



## **HUB SmartFruit-ALC: Soluciones Inteligentes para Sistemas Familiares Frutícolas ALC, en el Escenario de Cambio Climático.**

### **Productos 19**

### **Documento Científico del Modelo Predictivo Preliminar OpenFruit Preparado**

Alejandra Ribera, Patricio Acevedo, Manuel Castro y Ariel Muñoz, UFRO, Chile.

Abel González, INIA-Carillanca, Chile.

Luis Felipe Arauz, Carlos Henríquez, Emmanuel Céspedes, UCR, Costa Rica.

Omar Mejías, Consultor Impediente, Costa Rica.

**2023**



Códigos JEL: Q16

ISBN:

FONTAGRO (Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria) es un mecanismo único de cooperación técnica entre países de América Latina, el Caribe y España, que promueve la competitividad y la seguridad alimentaria. Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), FONTAGRO, de sus Directorios Ejecutivos ni de los países que representan.

El presente documento ha sido preparado por Alejandra Ribera y Ariel Muñoz, Universidad de La Frontera, Temuco, Chile; Abel González, INIA-Carillanca, Chile; Luis Felipe Arauz, Carlos Henríquez Bryan Alemán y Emmanuel Céspedes, Universidad de Costa Rica, Costa Rica, con la participación activa de Omar Mejías, Consultor Impediente de Costa Rica.

Copyright © 2022 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional. Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Esta publicación puede solicitarse a:

**FONTAGRO**

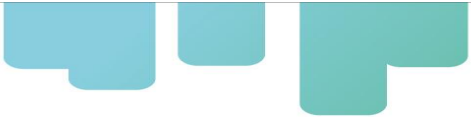
Correo electrónico: [fontagro@fontagro.org](mailto:fontagro@fontagro.org)

[www.fontagro.org](http://www.fontagro.org)



# Tabla de Contenidos

<b>1</b>	<b>Resumen</b> .....	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Resultados obtenidos en Costa Rica</b> .....	<b>7</b>
2.1	Comparación de los resultados de análisis químicos foliares del cultivo de papaya con relación a dos índices de vegetación. ....	7
2.1.1	Introducción .....	7
2.1.2	Materiales y Métodos .....	8
2.1.3	Resultados y Discusión .....	9
2.1.4	Conclusiones .....	16
2.2	Evaluación de las correlaciones espectrales entre el sensor satelital PlantetScope y datos generados mediante Vehículo aéreo no Tripulado (VANT) .....	17
2.2.1	Introducción .....	17
2.2.2	Materiales y Métodos .....	17
2.2.3	Resultados y Discusión .....	23
(A)	Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) .....	24
(B)	División simple (SR) .....	27
(C)	Índice de vegetación de diferencia normalizada verde (GNDVI) .....	29
(D)	Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) .....	31
(E)	Diferencia Normalizada de Borde Rojo (NDRE) .....	34
2.2.4	Conclusiones .....	39
<b>3</b>	<b>Resultados Obtenidos en Chile</b> .....	<b>41</b>
3.1	Validación de la Plataforma OpenFruit en Huertos de Arándano y Frambueso .....	41
<b>4</b>	<b>Referencias Bibliográficas</b> .....	<b>56</b>
<b>5</b>	<b>Instituciones Principales</b> .....	<b>58</b>
<b>6</b>	<b>Instituciones Asociadas</b> .....	<b>58</b>



# Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación de los lotes de los productores participantes en este estudio de Coopeparritatropical R.L..... 8

Figura 2. Índice NDRE calculado para el lote 1 (Víctor Carvajal Campos). ..... 9

Figura 3. Índice NDRE calculado para el lote 2 (Edwin Astúa Guzmán). ..... 10

Figura 4. Índice NDVI calculado para el lote 1 (Víctor Carvajal Campos). ..... 11

Figura 5. Índice NDVI calculado para el lote 2 (Edwin Astúa Guzmán). ..... 12

Figura 6. Ubicación del área de estudio. .... 18

Figura 7. Estado de crecimiento del cultivo de la papaya. CoopeParritaTropical R.L., Costa Rica..... 19

Figura 8. Mosaico obtenido con el VANT, representado en colores falsos (NIR, Rojo y Verde). ..... 20

Figura 9. Índices de vegetación calculados con el VANT. .... 23

Figura 10. Índices de vegetación calculados a partir de PS. .... 24

Figura 11. Correlación entre el índice NDVI P4M (layer1) con el NDVI PS (layer2). .... 25

Figura 12. Figura 12. Resultado de la correlación de vecindario entre el índice NDVI proveniente del P4M con relación a PS. .... 26

Figura 13. Regresión lineal del índice NDVI del P4M vs PS..... 26

Figura 14. Correlación entre el índice SR P4M (layer1) con el NDVI PS (layer2). .... 27

Figura 15. Regresión lineal del índice SR del P4M vs PS..... 28

Figura 16. Resultado de la correlación de vecindario entre el índice SR proveniente del P4M con relación a PS. .... 28

Figura 17. Correlación entre el índice GNDVI P4M (layer1) con el NDVI PS (layer2). .... 29

Figura 18. Regresión lineal del índice GNDVI del P4M vs PS..... 30

Figura 19. Resultado de la correlación de vecindario entre el índice GNDVI proveniente del P4M con relación a PS. .... 30

Figura 20. Correlación entre el índice SAVI P4M (layer1) con el NDVI PS (layer2)..... 31

Figura 21. Regresión lineal del índice SAVI del P4M vs PS. .... 32

Figura 22. Resultado de la correlación de vecindario entre el índice SAVI proveniente del P4M con relación a PS. .... 32

Figura 23. Correlación entre el índice NDRE P4M (layer1) con el NDVI PS (layer2). .... 34

Figura 24. Regresión lineal del índice NDRE del P4M vs PS..... 35

Figura 25. Resultado de la correlación de vecindario entre el índice NDRE proveniente del P4M con relación a PS. .... 35

Figura 26. Correlación entre el índice RECI P4M (layer1) con el NDVI PS (layer2). .... 37

Figura 27. Regresión lineal del índice RECI del P4M vs PS..... 38

Figura 28. Ejemplo de informe de resultados de análisis foliar de hojas de frambuesa, en el cual se indican los rangos óptimos para cada nutriente, en base a lo reportado por Hirzel (2008). ..... 43

Figura 29. Concentración foliar de macronutrientes en hojas de arándano alto colectadas en los huertos de estudio. .... 44

Figura 30. Concentración foliar de micronutrientes (ppm) en hojas de arándano alto colectadas en los huertos de estudio. .... 45

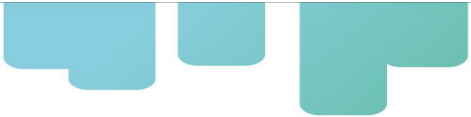
Figura 31. Concentración foliar de macronutrientes en hojas de frambuesa..... 46

Figura 32. Concentración foliar de micronutrientes (ppm) en hojas de frambuesa ..... 47

Figura 33. Relación entre el índice satelital NDVI y el avance fenológico de plantas de arándano en los huertos en estudio. .... 48

Figura 34. Relación entre el índice satelital NDVI y el avance fenológico de plantas de frambueso en los huertos en estudio. .... 48

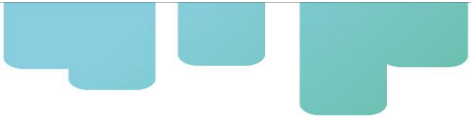
Figura 35. Relación entre el índice satelital NDVI y el avance fenológico de plantas de frambueso en los



huertos en estudio. ....	49
Figura 36. Dosis de riego aplicada mensualmente por los productores de arándano alto de los huertos en estudio, y su relación con el riego estimado por la plataforma OpenFruit.....	49
Figura 37. Dosis de riego aplicada mensualmente por los productores de frambuesa de los huertos en estudio, y su relación con el riego estimado por la plataforma OpenFruit.....	50
Figura 38. Relación entre el riego aplicado por los productores y el riego recomendado (estimado) por la plataforma OpenFruit de los huertos de arándano y frambuesa en estudio (Prod = Productor).....	51
Figura 39. Relación entre el riego aplicado por los productores y el riego recomendado (estimado) por la plataforma OpenFruit de los huertos de arándano y frambuesa en estudio y su relación con el rendimiento alcanzado por productor (P = Productor).....	52
Figura 40. Niveles de reservas en yemas y raíces de plantas de frambuesa en los huertos en estudio.	53
Figura 41. Niveles de reservas en yemas y raíces de plantas de frambuesa en los huertos en estudio.	53
Figura 42. Correlación entre índice satelital NDVI y el contenido foliar de N en hojas de arándano y frambueso de los huertos en estudio.....	54
Figura 43. Correlación entre índice satelital NDVI y el contenido de almidón en yemas de arándano y frambueso de los huertos en estudio.....	54
Figura 44. Correlación entre índice satelital NDVI y el contenido de arginina en raíces de arándano y frambueso de los huertos en estudio.....	55

## Índice de Cuadros

<b>Cuadro 1.</b> Definición de los índices de vegetación multiespectrales utilizados en el cultivo de la papaya en CoopeparritaTropical R.L., Costa Rica. ....	8
<b>Cuadro 2.</b> Resultados de los análisis químicos foliares de cada uno de los lotes estudiados.....	13
<b>Cuadro 3.</b> Tabla de interpretación de análisis foliar en cultivo de papaya (Mills y Jones, 1996). ....	13
<b>Cuadro 4.</b> Variación temporal del NDRE según estadísticas de zona para el lote 1. ....	14
<b>Cuadro 5.</b> Variación temporal del NDVI según estadísticas de zona para el lote 1. ....	14
<b>Cuadro 6.</b> Variación temporal del NDRE según estadísticas de zona para el lote 2. ....	15
<b>Cuadro 7.</b> Variación temporal del NDVI según estadísticas de zona para el lote 2. ....	15
<b>Cuadro 8.</b> Definición de los índices de vegetación multiespectrales utilizados en este estudio. ....	22
<b>Cuadro 9.</b> Estadísticas de zona de la correlación con vecindario realizada para el índice NDVI. ....	27
<b>Cuadro 10.</b> Estadísticas de zona (AI) de la correlación con vecindario realizada para el índice SR. ....	29
<b>Cuadro 11.</b> Estadísticas de zona (AI) de la correlación con vecindario realizada para el índice GNDVI. ....	31
<b>Cuadro 12.</b> Estadísticas de zona (AI) de la correlación con vecindario realizada para el índice SAVI. ....	33
<b>Cuadro 13.</b> Estadísticas de zona del área de interés de la correlación con vecindario realizada para el índice NDRE. ....	35
<b>Cuadro 14.</b> Estadísticas de zona del área de interés de la correlación con vecindario realizada para el índice RECI. ....	38
<b>Cuadro 15.</b> Resumen estadístico de las correlaciones de vecindario de cada índice evaluado. ....	38
<b>Cuadro 16.</b> Resumen estadístico de las regresiones lineales de cada índice evaluado. ....	39

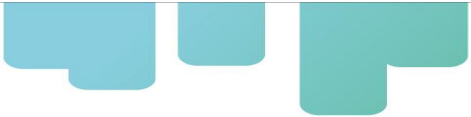


## 1 Resumen

El presente documento presenta el Producto 19 - Documento científico del Modelo Predictivo Preliminar OpenFruit preparado, asociado a la Actividad 2.5, donde se propuso seleccionar 8 huertos de experimentación en Chile y 2 en Costa Rica, cada uno de los cuales debía haber evidenciado en años anteriores alguna problemática productiva, ya sea de tipo fitosanitaria, hídrica o nutricional, que haya limitado los rendimientos y/o la calidad de la fruta. Para el desarrollo del Modelo Predictivo Preliminar, se propuso realizar un diagnóstico de la condición suelo, planta y clima de los sitios de estudio, además de la evaluación de sintomatología visual en las plantas y análisis de información meteorológica y edafoclimática de cada huerto. Por otra parte, se recopilaría información productiva y de manejo agronómico de los predios, a través de la participación de los productores, en la herramienta OpenFruit. La información antes mencionada, se relacionaría con la data obtenida a partir de imágenes satelitales, de drones habilitados con cámaras multiespectrales y de sensores portátiles (e.j. espectralradiómetros). Durante la Temporada 2021/2022, en Chile, se realizó un levantamiento de información productiva (sintomatología visual, propiedades de suelo, análisis foliares, brechas productivas, información de manejo agronómico), climática/meteorológica y de imágenes satelitales de 19 cuarteles pertenecientes a 12 productores frutícolas vinculados al proyecto (arándano alto y frambuesa). El análisis e integración de la información recopilada, la cual se describe en detalle en el Producto 18, permitirá desarrollar el Modelo Predictivo Preliminar, además de la selección adecuada de los 3 huertos de experimentación, con los cuales se trabajará en diciembre de 2022 y enero de 2023 para la ejecución de ensayos de campo para la obtención de los Productos 20 y 21.

Por otra parte, en Costa Rica, durante la misma temporada (2021/2022), se trabajó en la comparación de los resultados de análisis químicos foliares del cultivo de papaya con relación a dos índices de vegetación, obteniendo interesantes resultados, estudio que se describe a continuación.

**Palabras Clave:** Modelo Predictivo, Ensayos de Campo, Validación, Indices Satelitales, Riego.



## 2 Resultados obtenidos en Costa Rica

### 2.1 Comparación de los resultados de análisis químicos foliares del cultivo de papaya con relación a dos índices de vegetación.

---

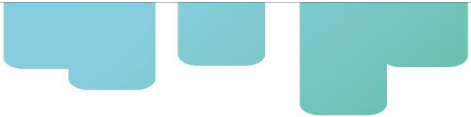
#### 2.1.1 Introducción

A continuación, se describe la comparación de los resultados de los análisis químicos foliares aplicados a dos lotes (de productores asociados de Coopeparritropical R.L en Costa Rica), con los datos satelitales del sensor PlanetScope (PS) que se utiliza en la plataforma “**OpenFruit**”.

Las dos fincas utilizadas fueron seleccionadas por mostrar deficiencias en algunos elementos químicos como potasio y fósforo por lo que se utilizaron para comparar estos resultados con las imágenes satelitales (específicamente con dos índices de vegetación) y verificar si visualmente en los índices de vegetación se muestran evidencias de estas deficiencias en el cultivo. Esto básicamente es para corroborar la aplicabilidad de la plataforma “**OpenFruit**” que utiliza este sensor satelital.

Los lotes evaluados con los análisis químicos foliares mostraron algunos valores fuera del rango óptimo (caso del fosforo, potasio y hierro). Mientras que los índices de vegetación evaluados, mostraron valores que pueden catalogarse como medio-altos y también permitieron observar diferencias a lo interno del lote que pueden asociarse con condiciones de menor vigor de la plantación de papaya. De tal forma los índices de vegetación permitieron corroborar los problemas nutricionales que se manifiesta en los análisis químicos foliares.

Considerando que la plataforma “**OpenFruit**” utiliza estos mismos índices en su sistema de consulta de datos satelitales, se puede concluir que, para los casos evaluados, permitió identificar este tipo de deficiencias nutricionales en los lotes de los productores de las cooperativas participantes.



**2.1.2 Materiales y Métodos**

El área de estudio corresponde a dos lotes de productores de CoopeparritaTropical R.L., ubicados en Parrita, Puntarenas, Costa Rica (Figura 1). Considerando estos lotes se determinaron dos índices de vegetación (Cuadro 1), utilizados por la plataforma “OpenFruit” y se calcularon con el fin de comparar visualmente los índices de vegetación, con los análisis químicos foliares (Cuadro 2). Para determinar si los índices eran capaces de evidenciar las deficiencias mostradas en el análisis químico foliar realizado en el lote cultivado.

**Cuadro 1.** Definición de los índices de vegetación multispectrales utilizados en el cultivo de la papaya en CoopeparritaTropical R.L., Costa Rica.

Índice	Fórmula	Fuente
Índice de vegetación de diferencia normalizada(NDVI)	$(NIR-R) / (NIR+R)$	Rouse <i>et al.</i> , (1974)
Diferencia normalizada de borde rojo(NDRE)	$(NIR-RedEdge) / (NIR+RedEdge)$	EOS., (2022)

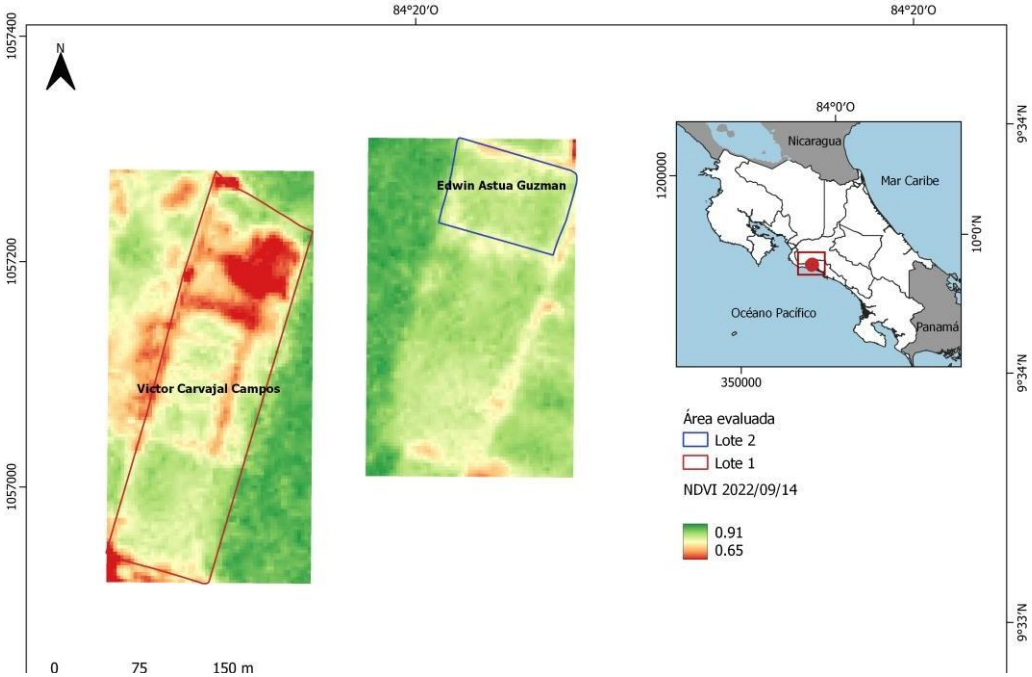
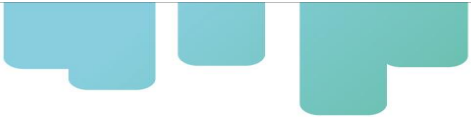


Figura 1. Ubicación de los lotes de los productores participantes en este estudio de Coopeparritatropical R.L.. A la izquierda los dos lotes seleccionados y a la derecha el mapa de ubicación en Costa Rica.





Con el fin de obtener evidencia de la presencia del cultivo, se realizó un cálculo temporal de la variación de los índices de vegetación, considerando 6 momentos diferentes (ver Figura 2, 3, 4 y 5). Además, es importante señalar que la recolección/recepción de los muestreos para el análisis químico foliar se ejecutó el 26/08/2022 y el cálculo de los índices de vegetación abarca desde el 4/06/2022 al 14/09/2022, de tal manera que se pueda comparar tanto temporal como espacialmente entre sí la fuente del sensor con el análisis realizado.

### 2.1.3 Resultados y Discusión

Los resultados de la variación de los índices de vegetación se muestran en las Figuras 2 y 3 para el NDRE y Figuras 4 y 5 para el NDVI.

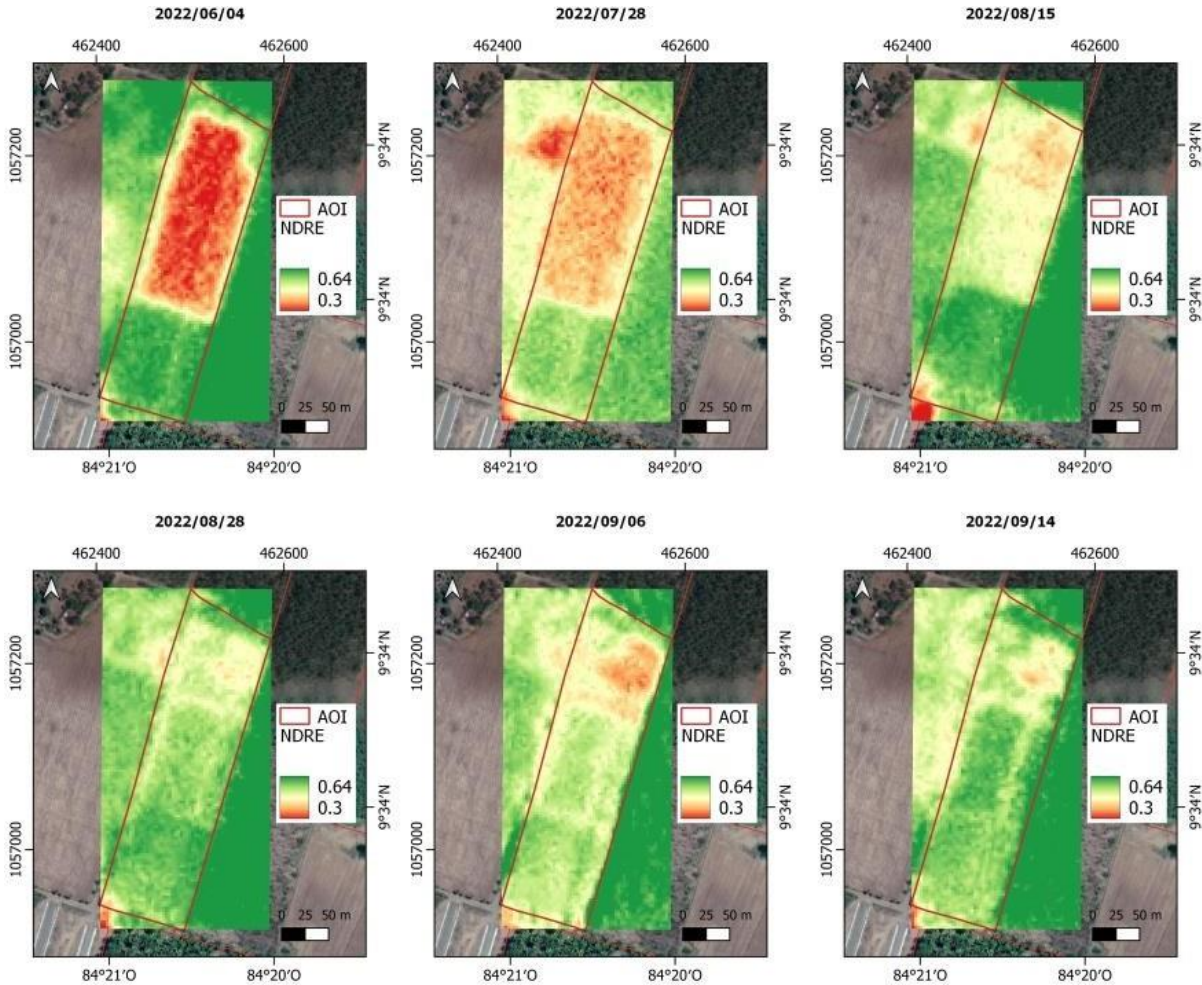


Figura 2. Índice NDRE calculado para el lote 1 (Víctor Carvajal Campos).

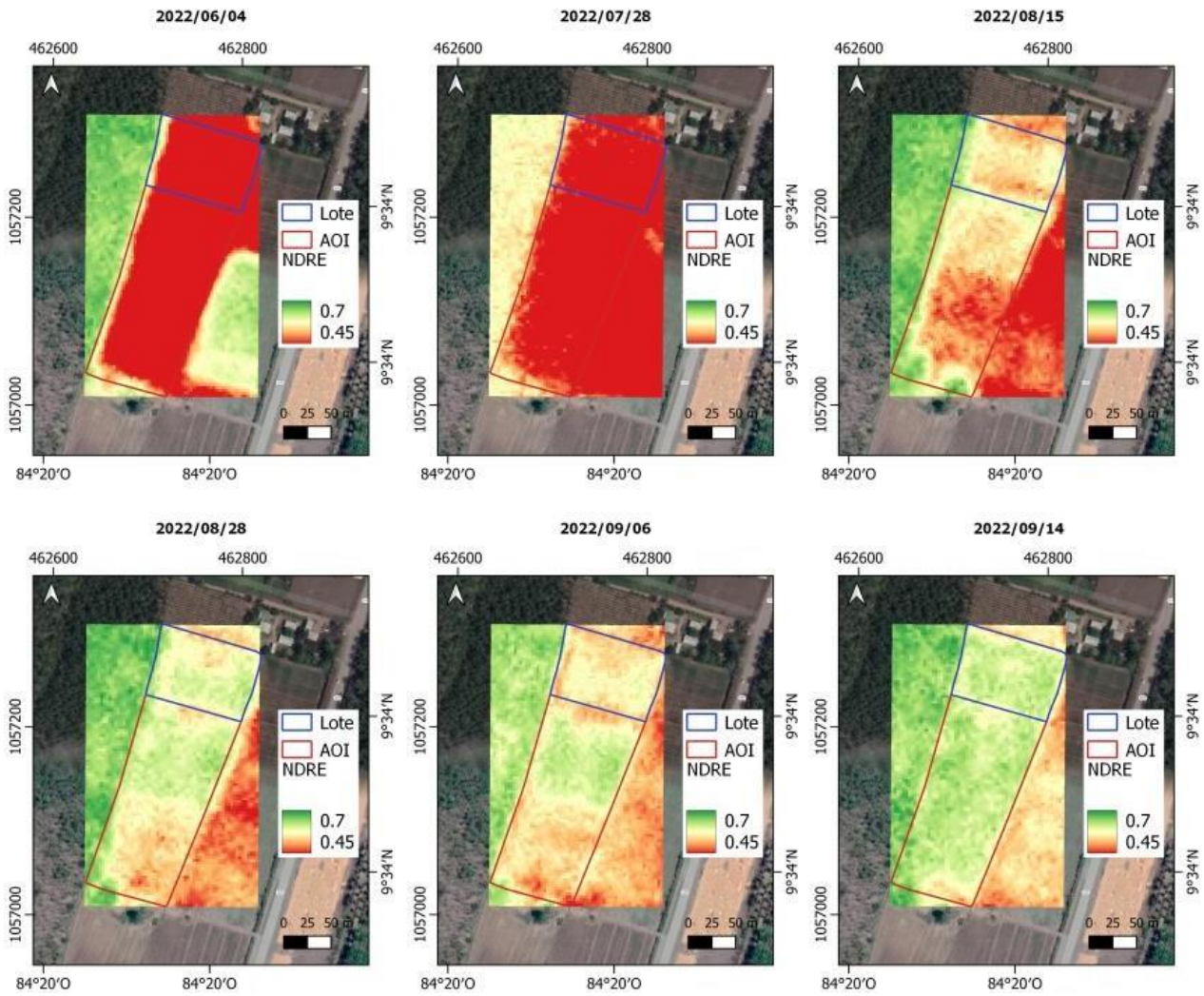
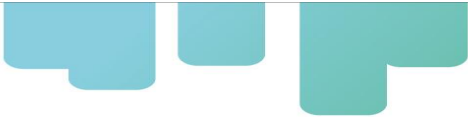


Figura 3. Índice NDRE calculado para el lote 2 (Edwin Astúa Guzmán).

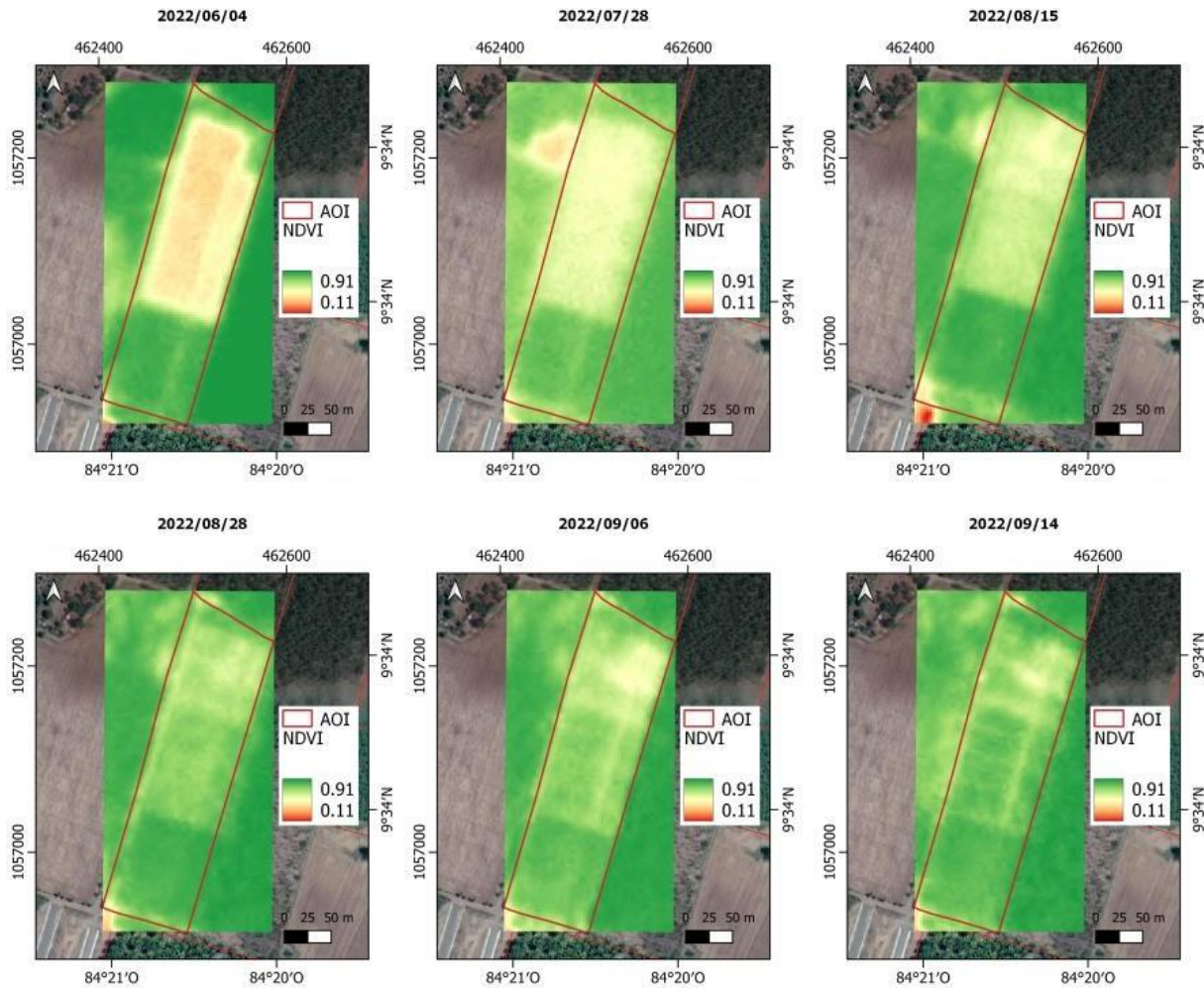


Figura 4. Índice NDVI calculado para el lote 1 (Víctor Carvajal Campos).

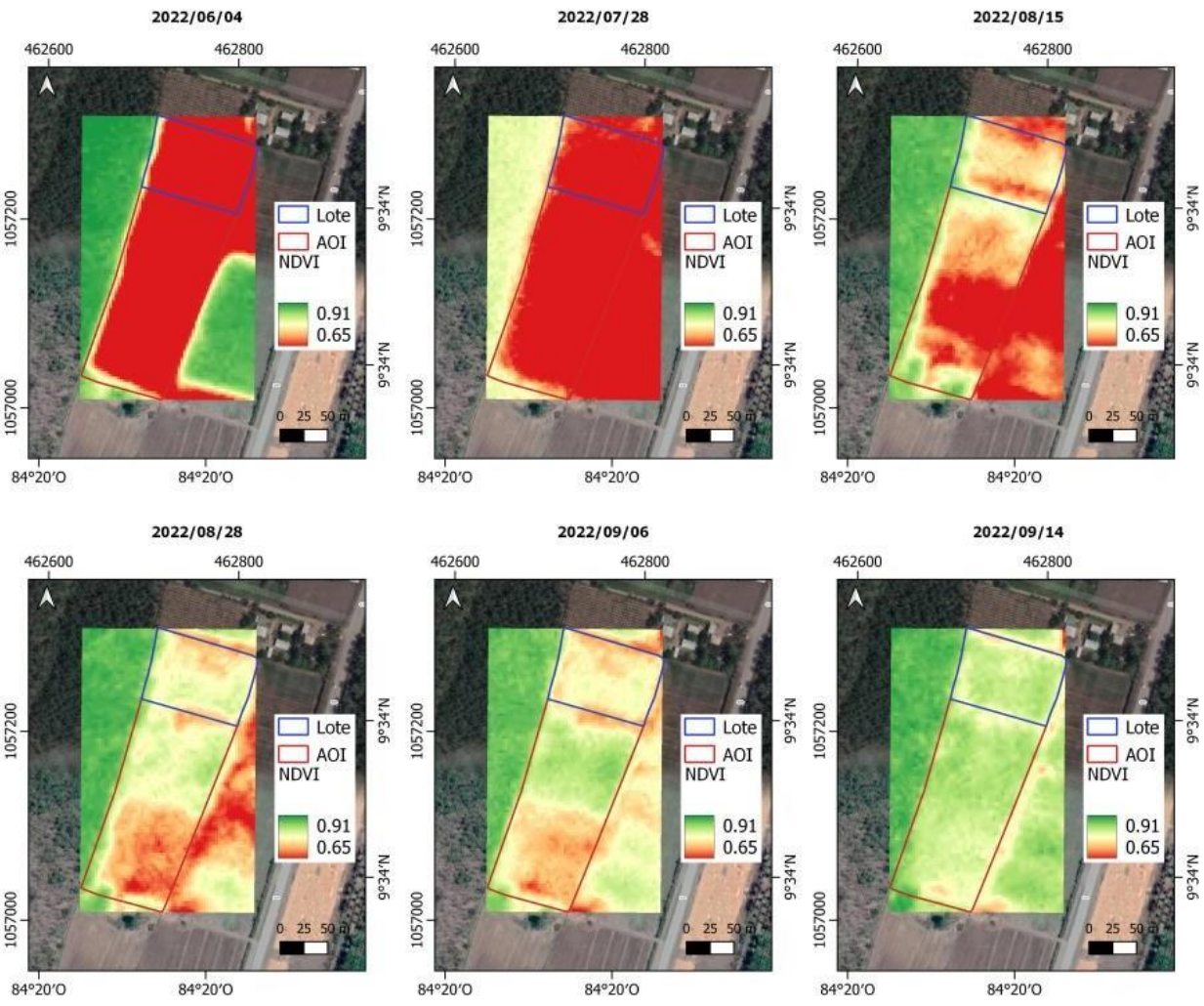


Figura 5. Índice NDVI calculado para el lote 2 (Edwin Astúa Guzmán).



Los resultados del análisis químico foliar para ambos lotes mostraron valores de P, K y Fe fuera del rango óptimo (cuadro 2 y cuadro 3), lo cual indica que el cultivo al momento del muestreo (2020/08/26) presentaba deficiencias en esos elementos. Al comparar estos resultados con los índices de vegetación es posible observar que a partir del 15/08/2022 el cultivo ya se encontraba en desarrollado y si se observan los valores y la variación a lo interno de los lotes en las fechas posteriores a la fecha de muestreo, es decir del 28/08/2022 en adelante, visualmente se puede observar que el cultivo posee valores NDVI y NDRE con valores promedio cercanos a 0,53 y 0,75 (cuadro 4 y 5) respectivamente para el lote 1 y 0,58 y 0,78 (Cuadro 6 y 7) para el lote 2. Considerando las categorías señaladas por la plataforma “OpenFruit” (<http://openfruit.cl/>) para cada índice, lo anterior implica que para el lote 1 el NDVI muestra un valor promedio de lote de “Moderado Crecimiento” y para el NDRE de “Alto Crecimiento” y lo mismo aplica para el lote 2. Por tanto, los lotes tenían un desarrollo importante del cultivo de papaya.

**Cuadro 2.** Resultados de los análisis químicos foliares de cada uno de los lotes estudiados.

Nombre del productor	% masa						mg/kg				
	N	P	Ca	Mg	K	S	Fe	Cu	Zn	Mn	B
Víctor Carvajal Campos (Lote 1)	1.01	0.12	1.61	0.25	2.43	0.17	13	2	12	45	21
Edwin Astúa Guzmán (Lote 2)	1.09	0.15	1.18	0.24	2.77	0.23	10	4	14	40	30

*\*En rojo los valores que no están en condiciones óptimas según Cuadro 3.*

**Cuadro 3.** Tabla de interpretación de análisis foliar en cultivo de papaya (Mills y Jones, 1996).

	Elemento	Niveles
		Óptimo
% masa	N	1,0-2,5
	P	0,2-0,4
	Ca	1,0-2,5
	Mg	0,21-1,5
	K	2,5-5,5
	S	0,1-0,4
mg/kg	Fe	15-100
	Cu	2,0-10
	Zn	10-40
	Mn	15-150
	B	15-30



En cuanto a los índices de vegetación, es posible apoyarse en las Figuras 2 y 3 para el NDRE y Figuras 4 y 5 para el NDVI, los cuales desde el punto de vista de evolución temporal permite observar que para ambos lotes se presenta, un inicio con suelo descubierto (el 04/06/2022) y conforme se va desarrollando el cultivo los valores de los índices van aumentando hasta mostrar la presencia de un cultivo ya desarrollado (14/09/2022). Esto mismo se puede evidenciar en las estadísticas de zona (cuadros 4, 5, 6 y 7) de cada lote e índice donde se muestra un aumento de los valores promedio y de mediana y una disminución de la desviación estándar a lo interno del lote, lo que señala el crecimiento del cultivo.

**Cuadro 4.** Variación temporal del NDRE según estadísticas de zona para el lote 1.

Fecha	Promedio	Mediana	Desviación estándar
2022/06/04	0,46	0,45	0,12
2022/07/28	0,46	0,43	0,07
2022/08/15	0,52	Promedio	0,51
<b>2022/08/28</b>	<b>0,55</b>	0,56	0,04
<b>2022/09/06</b>	<b>0,50</b>	<b>0,53</b>	0,05
<b>2022/09/14</b>	<b>0,55</b>	0,56	0,04

**Cuadro 5.** Variación temporal del NDVI según estadísticas de zona para el lote 1.

Fecha	Promedio	Mediana	Desviación estándar
2022/06/04	0,63	0,61	0,16
2022/07/28	0,65	0,62	0,10
2022/08/15	0,70	Promedio	0,68
<b>2022/08/28</b>	<b>0,76</b>	0,76	0,06
<b>2022/09/06</b>	<b>0,72</b>	<b>0,75</b>	0,07
<b>2022/09/14</b>	<b>0,77</b>	0,78	0,06



**Cuadro 6.** Variación temporal del NDRE según estadísticas de zona para el lote 2.

Fecha	Promedio	Mediana	Desviación estándar
2022/06/04	0,33	0,30	0,08
2022/07/28	0,42	0,41	0,03
2022/08/15	0,56	Promedio	0,03
<b>2022/08/28</b>	<b>0,59</b>	0,55	0,02
<b>2022/09/06</b>	<b>0,56</b>	<b>0,58</b>	0,02
<b>2022/09/14</b>	<b>0,61</b>	— 0,60	0,01

**Cuadro 7.** Variación temporal del NDVI según estadísticas de zona para el lote 2.

Fecha	Promedio	Mediana	Desviación estándar
2022/06/04	0,46	0,42	0,10
2022/07/28	0,60	0,61	0,04
2022/08/15	0,75	Promedio	0,04
<b>2022/08/28</b>	<b>0,78</b>	0,74	0,03
<b>2022/09/06</b>	<b>0,76</b>	<b>0,78</b>	0,02
<b>2022/09/14</b>	<b>0,81</b>	— 0,82	0,01

Entre los resultados que muestran los cálculos de los índices de vegetación, se puede observar que para las fechas cercanas al muestreo realizado (ver figuras 2, 3, 4 y 6) 28/08/2022 y 06/09/2022, a lo interno de cada lote (tanto lote 1 y 2) se observan valores visualmente amarillo-rojos que señalan afectaciones del cultivo, desde la presencia de vigorosidad del cultivo, lo cual concuerda con los resultados del muestreo químico foliar que señala deficiencias en P, K y Fe. Además, considerando cada índice el NDRE parece ser más sensible a esas variaciones internas en vigorosidad en comparación al NDVI, esto se puede deber a que el NDRE es un índice que considera el borde rojo, el cual es una banda más sensible al contenido de clorofila en la planta, mientras que el NDVI no posee esta característica debido a que se calcula a partir del infrarrojo cercano, banda menos sensible a estas variaciones (Chuvienco y Huete, 2009).



#### 2.1.4 Conclusiones

Los índices calculados, NDRE y NDVI mostraron capacidad de mostrar el crecimiento del cultivo de papaya y sus variaciones a lo interno de cada lote. El NDRE mostró ser más sensible a detectar cambios en vigorosidad a lo interno de los lotes.

La plataforma “**OpenFruit**” utiliza ambos índices y se muestran como herramienta que permitiría colaborar en la toma de decisiones de los usuarios y pequeños productores de las cooperativas participantes del proyecto. Por tanto, considerando los resultados y su comparación con los muestreos químicos foliares, se evidenció que estos índices permiten identificar problemas nutricionales en el cultivo de papaya.

**Nota:** Las referencias citadas de este estudio, se detallan al final del documento.

---

Por otra parte, el equipo de trabajo de Cosa Rica, avanzó durante la temporada 2021/2022, en la evaluación de las correlaciones espectrales entre el sensor satelital PlantetScope y datos generados mediante Vehículo aéreo no Tripulado (VANT), estudio que también se relaciona a la obtención del Producto 19. A continuación se describe en detalle el estudio realizado.





---

## **2.2 Evaluación de las correlaciones espectrales entre el sensor satelital PlanetScope y datos generados mediante Vehículo aéreo no Tripulado (VANT)**

---

### **2.2.1 Introducción**

A continuación, se describen los procedimientos realizados en la comparación de datos entre los sensores PlanetScope con relación a los obtenidos con un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) Phantom 4 multiespectral (P4M), en el cultivo de papaya en CoopeParritaTropical, ubicada en el cantón de Parrita, Costa Rica. Lo anterior se ejecutó con el objetivo de determinar si los datos satelitales utilizados en la Plataforma OpenFruit son comparables con los del VANT P4M para estudiar la variabilidad espacial que expresa las determinaciones de los índices de vegetación estudiados.

La importancia de esta comparación se fundamenta en la necesidad de obtener información cada vez más precisa para apoyar la toma de decisiones. La teledetección es una herramienta que permite acceder a información oportuna, sinóptica, rentable y repetitiva para fines de gestión de cultivos. El uso de series de tiempo donde se complementa el uso de distintos sensores e incluir la combinación de datos con origen fotogramétrico y satelitales es una de las formas de realizar este apoyo en la gestión de los cultivos (Pastonchi *et al.* 2020). Por tanto, con el fin de evaluar la factibilidad de esta herramienta, -aunque para un caso puntual- se evaluó la compatibilidad de los datos entre estas dos fuentes.

Los resultados muestran correlaciones media-alta entre la información obtenida de ambos sensores. A su vez, Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI), Diferencia Normalizada de Borde Rojo (NDRE) y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) son los índices mejores resultados evidenciaron.

### **2.2.2 Materiales y Métodos**

Para realizar el estudio se seleccionó como área de interés un lote de 4,49 ha situado en Parrita, Puntarenas, Costa Rica (Figura 6). Esta AI, abarca varios lotes pertenecientes a personas asociadas a la cooperativa CoopeParritaTropical R.L.

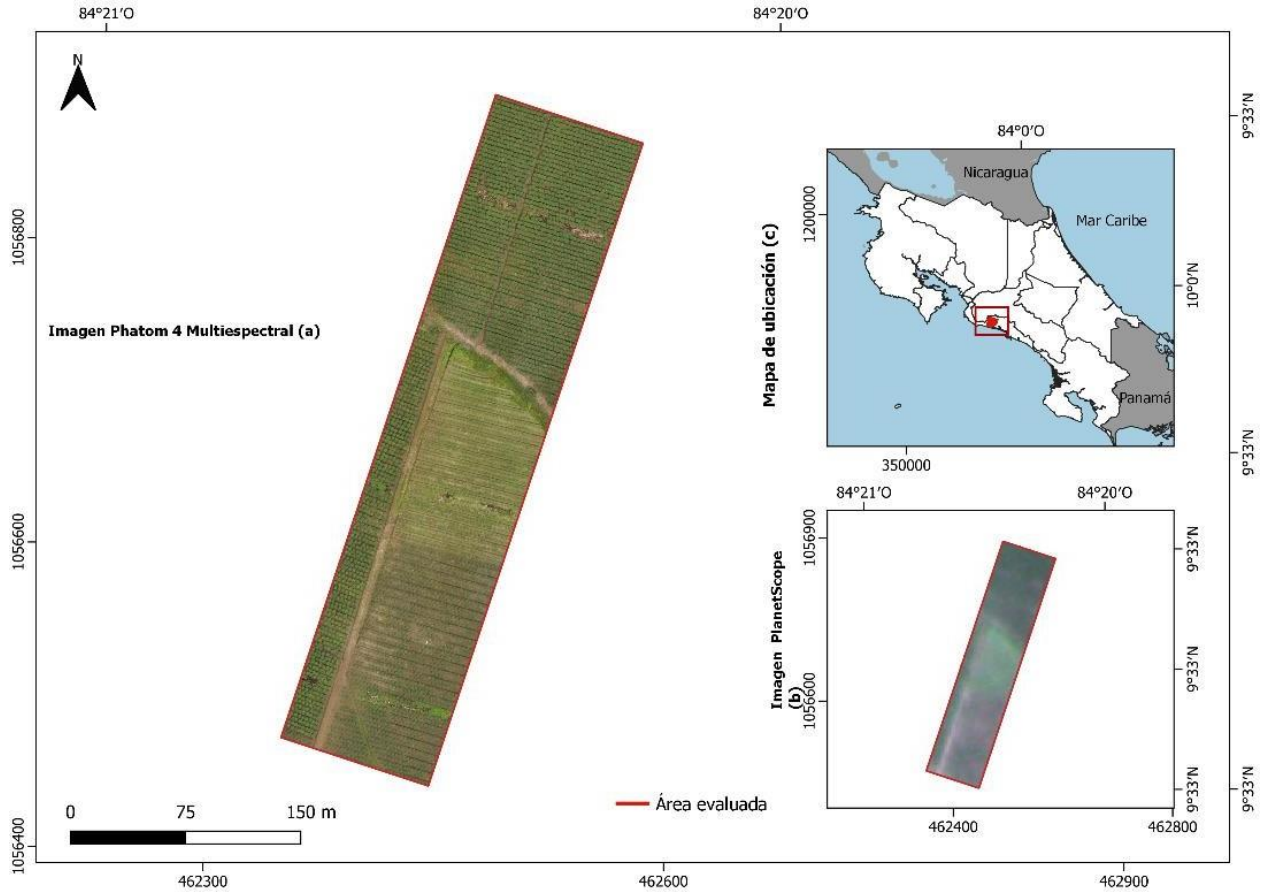


Figura 6. Ubicación del área de estudio: (a) a la izquierda se muestra el mosaico generado con el P4M y (b) a la derecha inferior la imagen PS utilizada y (c) el mapa de ubicación en Costa Rica. CoopeParritaTropical R.L. Parrita, Costa Rica.

Todos los lotes considerados se encontraban sembrados, y con el cultivo ya desarrollado, pero en sus primeras etapas de producción (1-4 meses), tal cual se muestra en la Figura 7.



Figura 7. Estado de crecimiento del cultivo de la papaya. CoopeParritaTropical R.L., Parrita, Costa Rica.

En cuanto a características del lote, este se ubica en un área de relieve plano, bajo suelos Inceptisoles de origen aluvial, con una elevación cercana a los 0 msnm. Se utilizó un VANT (DJI P4M) con el objetivo de mapear la variabilidad de las condiciones del cultivo a lo largo de lote; este vuelo se realizó el 29/09/2021.

El VANT utilizado cuenta con una cámara multiespectral que posee 5 cámaras multiespectrales integradas que cubren las bandas azules, verde, roja, borde rojo e infrarrojo cercano. Este equipo cuenta con un sensor de luz solar espectral integrado, el cual captura la radiación solar que permite contar con datos de alta la precisión y coherencia de tal forma que los resultados fuesen comparables con los de los sensores satelitales (DJI, 2022).



Los productos basados en el VANT se generaron con el software Agisoft PhotoScan (Agisoft, 2022). La trayectoria del VANT en el lote se planeó para mantener la altura de vuelo en los 100 m con respecto al terreno, mediante la definición adecuada de conjuntos de puntos de ruta para cada bloque de misión en la plataforma de guía del dron. Con esta especificación el mosaico resultó en una resolución espacial de 6 x 6 cm (Figura 8).

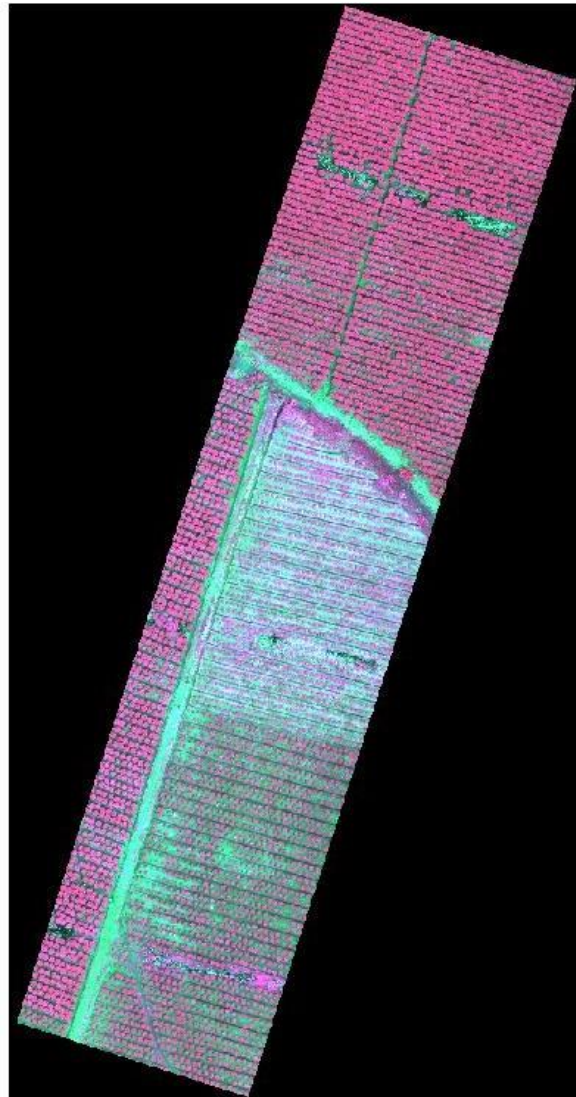


Figura 8. Mosaico obtenido con el VANT, representado en colores falsos (NIR, Rojo y Verde).



En el caso de las imágenes multispectrales satelitales, se utilizaron imágenes del sensor PlanetScope (PS) con una resolución espacial de 3 x 3 m, las cuales se descargaron en valores de reflectancia superficial, de tal forma que no presentaran afectación por efectos atmosféricos.

En el caso de PlanetScope cuenta con cuatro bandas espectrales: azul (455-515 nm), verde (500-590 nm), rojo (590-670 nm) y NIR (780-860 nm). El P4M por otro lado, cuenta con las bandas azul (B): 450 nm  $\pm$  16 nm; verde (G): 560 nm  $\pm$  16 nm; rojo (R): 650 nm  $\pm$  16 nm; borde rojo (RE): 730 nm  $\pm$  16 nm e Infrarrojo cercano (NIR): 840 nm  $\pm$  26 nm (DJI, 2022).

Considerando estas diferencias en la resolución espectral para poder comparar las variaciones en las imágenes, no se consideró la reflectancia, sino que se crearon índices de vegetación a partir de las bandas RGB y NIR que son las secciones del espectro electromagnético en las que ambos sensores coinciden. La fecha de adquisición de la imagen PS fue el 02/10/2021, es decir, la diferencia temporal entre ambas imágenes fue de 4 días lo que implica pocas variaciones en el ángulo solar y las condiciones fenológicas del cultivo.

Los índices de vegetación que se ejecutaron fueron: el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), la división simple (SR), el índice de vegetación de diferencia normalizada verde (GNDVI) y el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) (Cuadro 8).

Todos los procesos de cálculo y análisis de datos se ejecutaron en Rstudio, entorno de desarrollo integrado (IDE) del software de procesamiento R. A partir de este software de programación se procedió al cálculo de los índices de vegetación. Una vez ejecutado este proceso, se realizó un proceso de remuestreo del mosaico proveniente del VANT y se ajustó a una resolución coincidente con la de PlanetScope, en este caso, 3 x 3m; este remuestreo permitió la comparabilidad de los datos entre sensores. Además, se realizó un apilado de los índices de modo que cada X y Y de cada píxel fuese coincidente y se ubicaran espacialmente en el mismo lugar.



**Cuadro 8.** Definición de los índices de vegetación multispectrales utilizados en este estudio.

Índice	Formula	Fuente
Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)	$(\text{NIR}-\text{R}) / (\text{NIR}+\text{R})$	Rouse <i>et al.</i> (1974)
División simple (SR)	$\text{NIR}/\text{R}$	Jordan (1969)
Índice de vegetación de diferencia normalizada verde (GNDVI)	$(\text{NIR}-\text{G}) / (\text{NIR}+\text{G})$	Gitelson <i>et al.</i> (1996)
Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)	$((\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R} + \text{L})) * (1+\text{L})$ $\text{L}= 0.5$	Rondeaux <i>et al.</i> (1996)
Diferencia Normalizada de Borde Rojo (NDRE)	$(\text{NIR}-\text{RedEdge}) / (\text{NIR}+\text{RedEdge})$	EOS (2022)
Índice de Clorofila de Borde Rojo (RECI)	$\text{NIR}/\text{RedEdge}-1$	EOS (2022)

Para cada índice se ejecutaron análisis de correlación (Pearson), utilizando los valores de los índices (convirtiendo los datos ráster en una matriz y correlacionando las matrices) y utilizando un vecindario. Se aplicó con una ventana móvil de 5 x 5 píxeles, seguidamente a este resultado se le determinaron las estadísticas de zona del área de interés. Finalmente se categorizó las correlaciones resultantes bajo los siguientes criterios; alto: si el valor del coeficiente se encuentra entre  $\pm 0,50$  y  $\pm 1$ , moderada si el valor se encuentra entre  $\pm 0,30$  y  $\pm 0,49$ , y baja cuando el valor se encuentra por debajo de  $\pm 0,29$ .



### 2.2.3 Resultados y Discusión

Los índices de vegetación del P4M con la misma resolución espacial de PS, se muestran en la Figura 9.

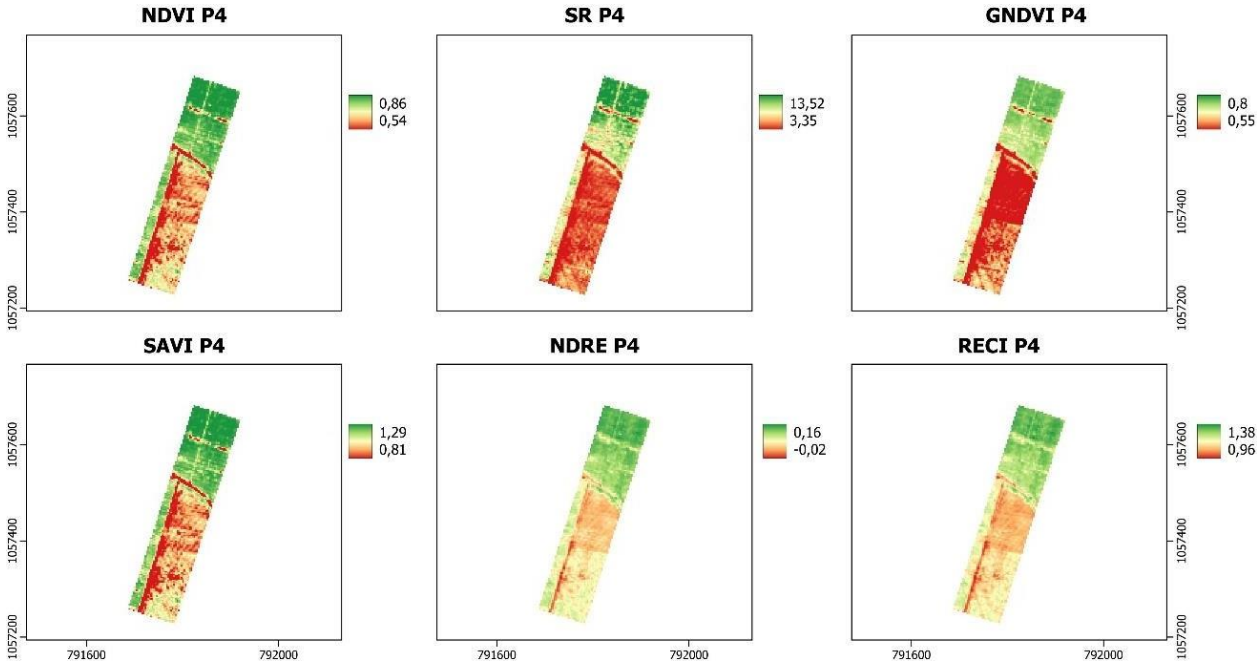


Figura 9. Índices de vegetación calculados con el VANT.

Estos mismos índices de vegetación fueron calculados para el sensor PS (Figura 10).

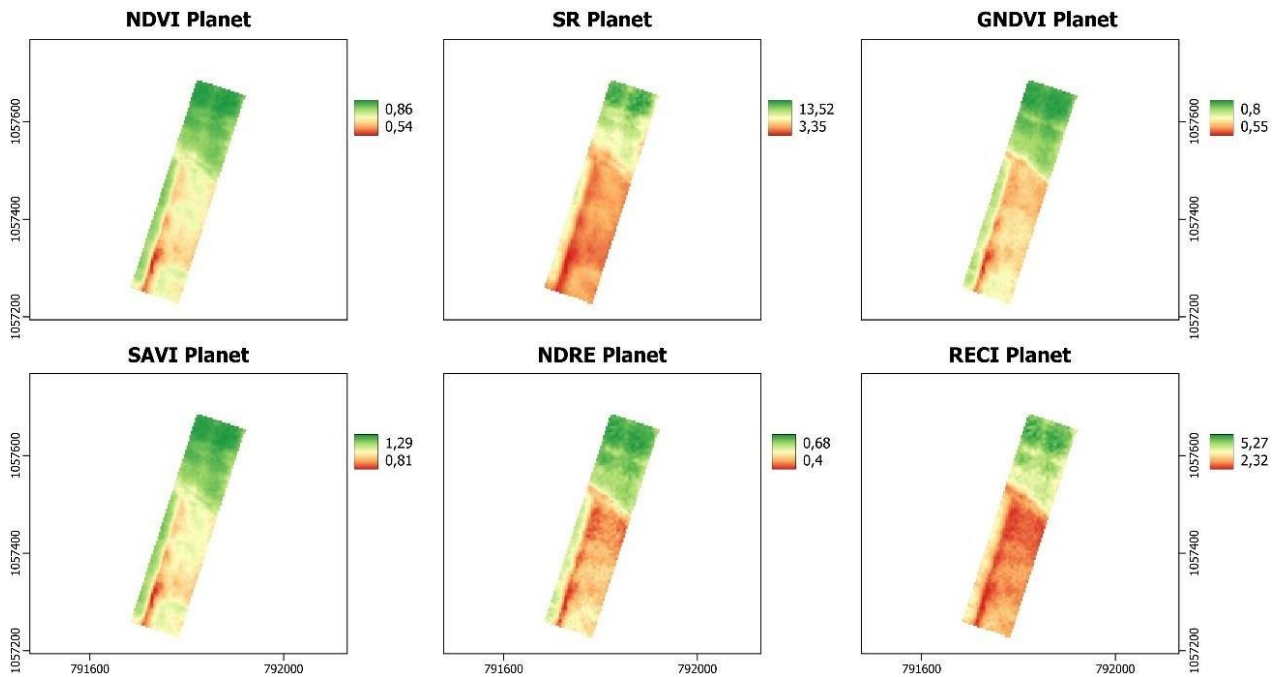


Figura 10. Índices de vegetación calculados a partir de PS.

Las correlaciones se ejecutaron considerando la distribución del histograma y el gráfico de dispersión de datos con cada una de las fuentes para cada índice (comparación entre matrices de los ráster).

### (A) Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

Para el caso del NDVI, al comparar ambos sensores la correlación entre los índices es de 0,72 con una gráfica de dispersión e histogramas que se puede observar en la Figura 11. El  $r^2$  de la regresión lineal ejecutada arrojó un valor de 0,51 (Figura 13), lo cual concuerda con la gráfica de dispersión (Figura 11) que muestra correlación espacial alta para el índice.



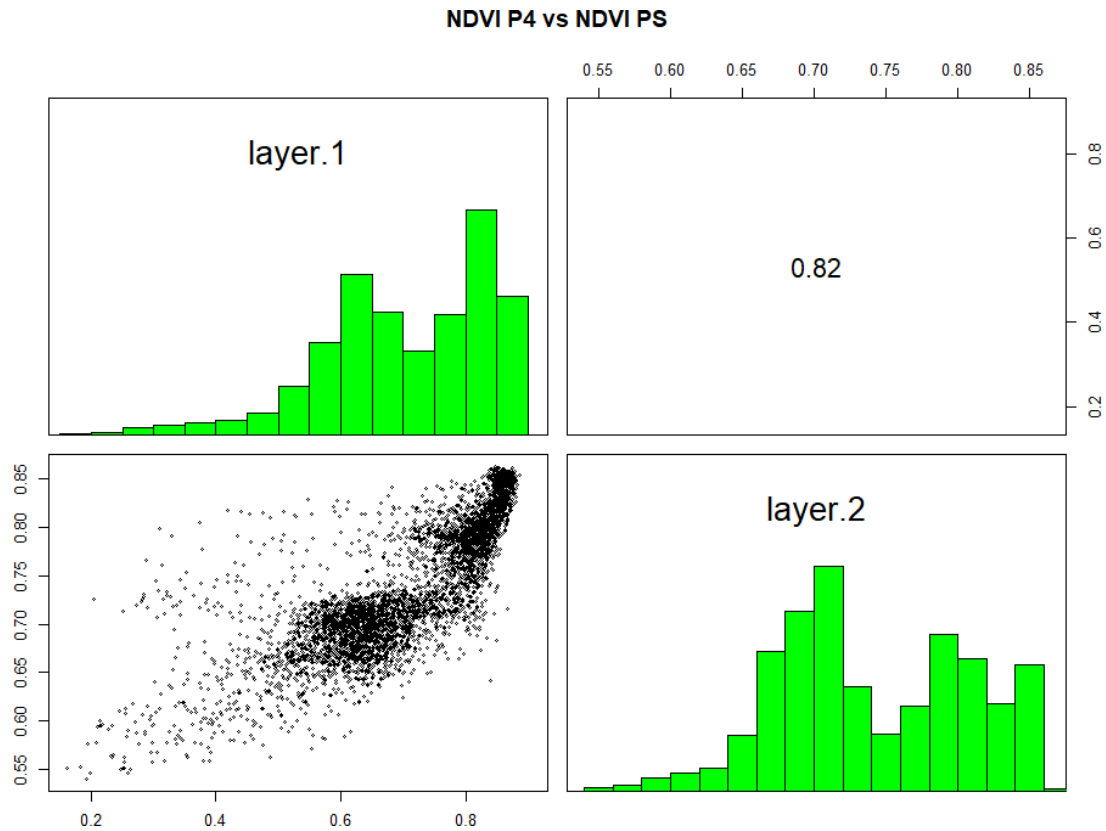


Figura 11. Correlación entre el índice NDVI P4M (layer1) con el NDVI PS (layer2).

La distribución de la correlación entre ambos índices -aplicando estadísticas de zona al vecindario con una ventana móvil de 5 píxeles como se indicó anteriormente- muestra una correlación promediobaja de 0,22 y una mediana de correlación de 0,23 (Figura 12 y Cuadro 9).

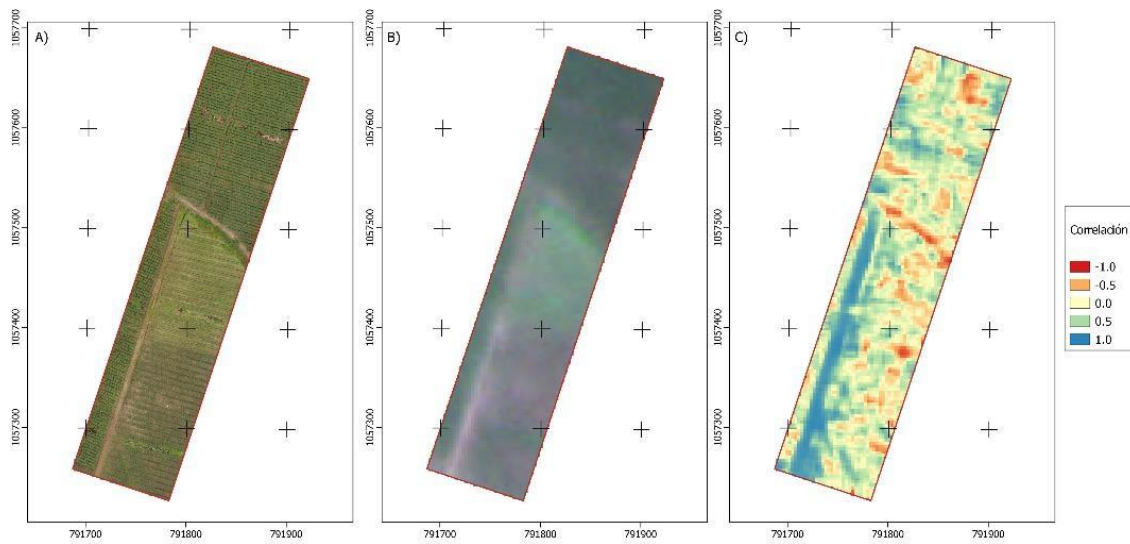


Figura 12. Resultado de la correlación de vecindario entre el índice NDVI proveniente del P4M con relación a PS.

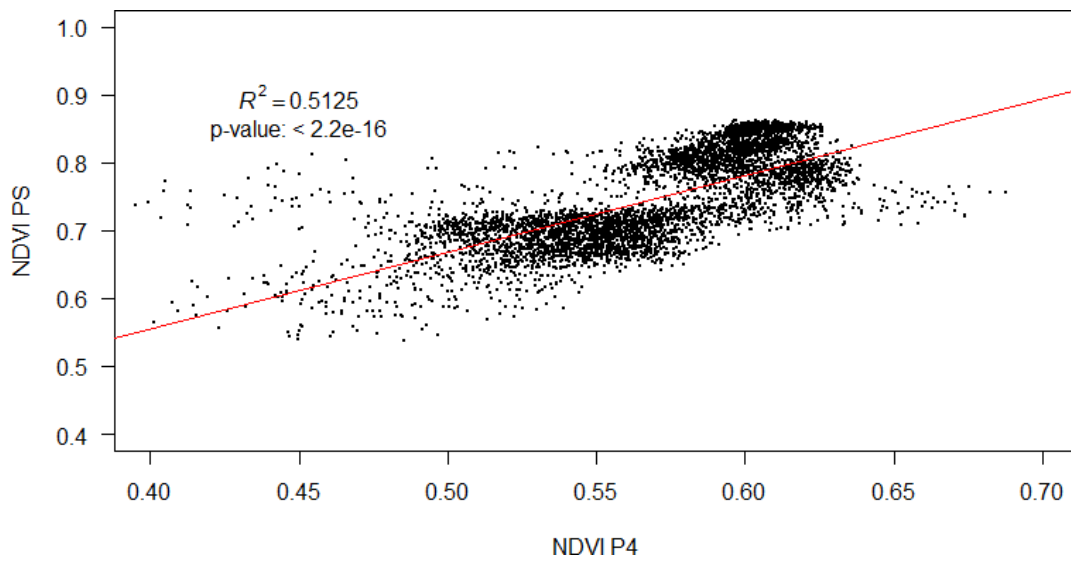


Figura 13. Regresión lineal del índice NDVI del P4M vs PS.

**Cuadro 9.** Estadísticas de zona de la correlación con vecindario realizada para el índice NDVI.

Estadística de zona	Valor
Promedio	0,22
Mediana	0,23
Desviación estándar	0,39

**(B) División simple (SR)**

El índice de división simple (SR) muestra que la correlación es alta de 0,88 (Figura 14), lo cual es menor comparativamente al NDVI (0,82).

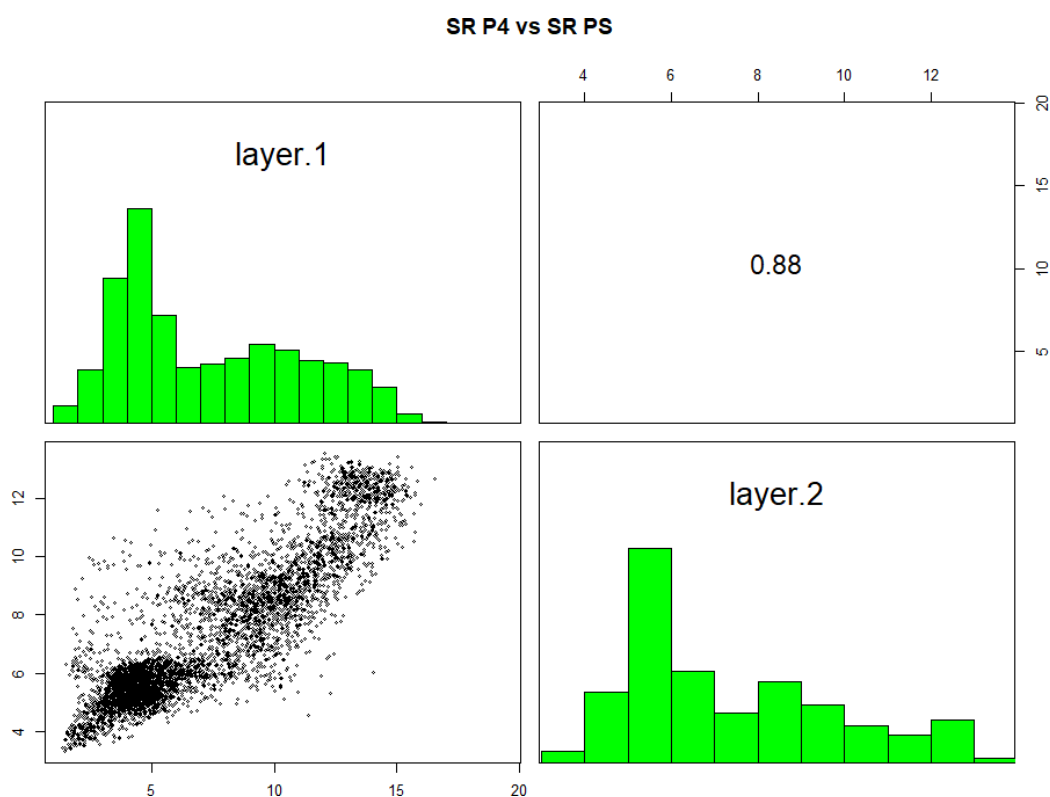


Figura 14. Correlación entre el índice SR P4M (layer1) con el NDVI PS (layer2).

Esta correlación (Figura 14) se encuentra acorde a lo mostrado por la regresión lineal de los datos, la cual presenta un valor muy medio de  $r^2$  ajustado (0,44) (Figura 15).

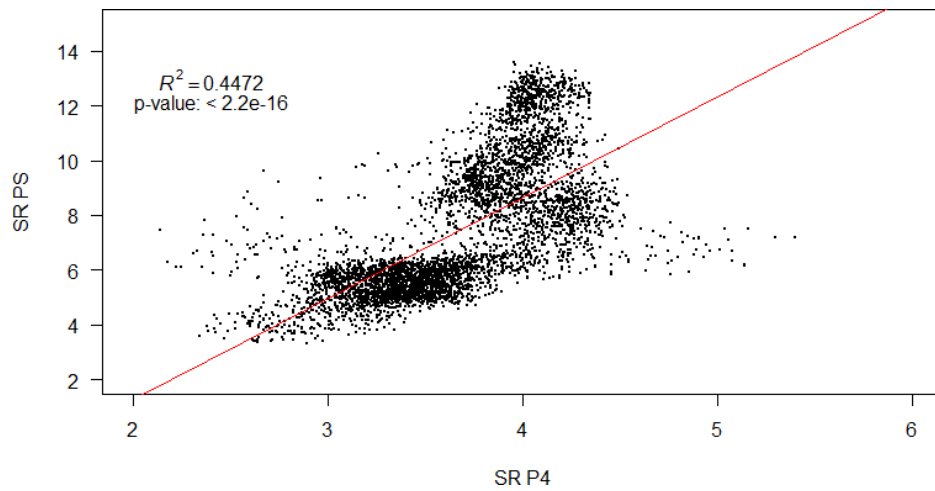


Figura 15. Regresión lineal del índice SR del P4M vs PS.

El mapeo de la correlación del SR considerando un vecindario (Figura 16) sigue las tendencias del NDVI (Figura 12). La correlación promedio obtenida para este índice a partir del área de interés es baja-media, 0,22 y posee una mediana de correlación de 0,24 (Cuadro 10).

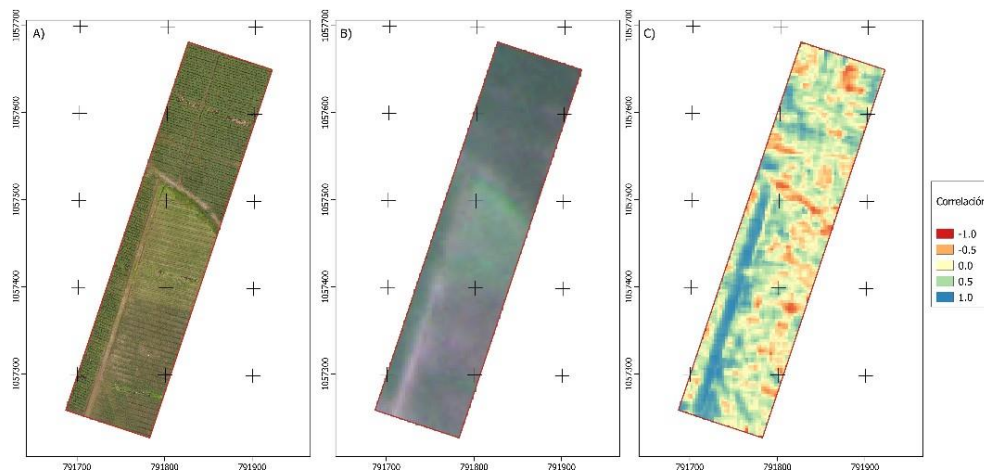


Figura 16. Resultado de la correlación de vecindario entre el índice SR proveniente del P4M con relación a PS.

**Cuadro 10.** Estadísticas de zona (AI) de la correlación con vecindario realizada para el índice SR.

Estadística de zona	Valor
Promedio	0,22
Mediana	0,24
Desviación estándar	0,39

**(C) Índice de vegetación de diferencia normalizada verde (GNDVI)**

Entre los índices evaluados se incluye el GNDVI que permite medir con mayor sensibilidad la concentración de clorofila (Gitelson *et al.*, 1996). El resultado de la correlación es de 0,89 (Figura 17) y los resultados de la regresión lineal muestra un r2 ajustado de 0,31 (Figura 18). Este resultado muestra una alta correlación espacial en la comparación del índice GNDVI y comparativamente más alta al NDVI (0,82) y SR (0,88).

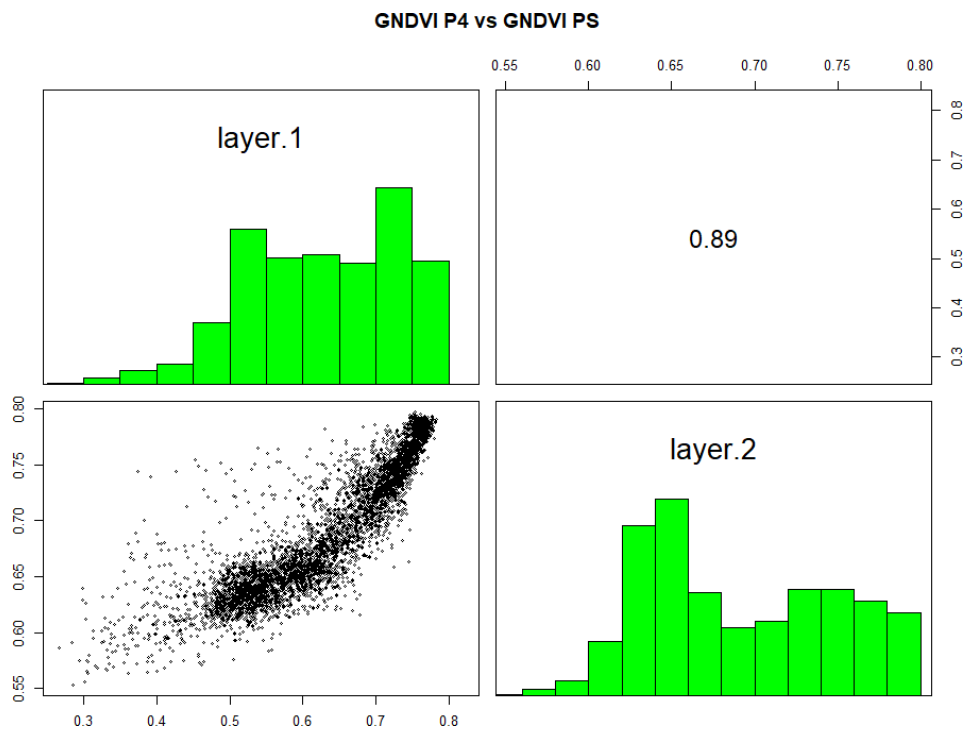


Figura 17. Correlación entre el índice GNDVI P4M (layer1) con el NDVI PS (layer2).

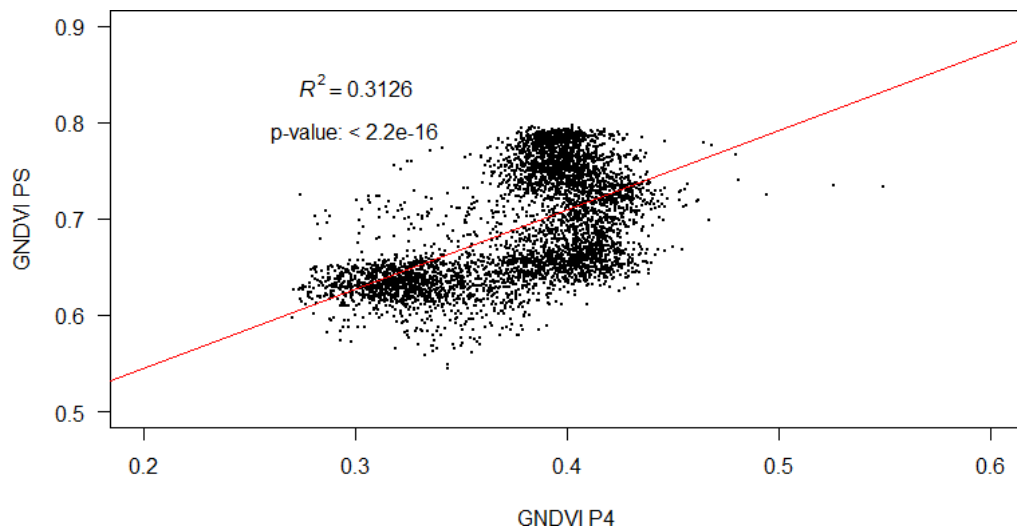


Figura 18. Regresión lineal del índice GNDVI del P4M vs PS.

La correlación promedio del GNDVI utilizando un vecindario es de 0,27 (Cuadro 11). La regresión lineal mostró un  $r^2$  de 0,31, en el primer caso se puede categorizar como una relación baja y en el segundo una relación moderada.

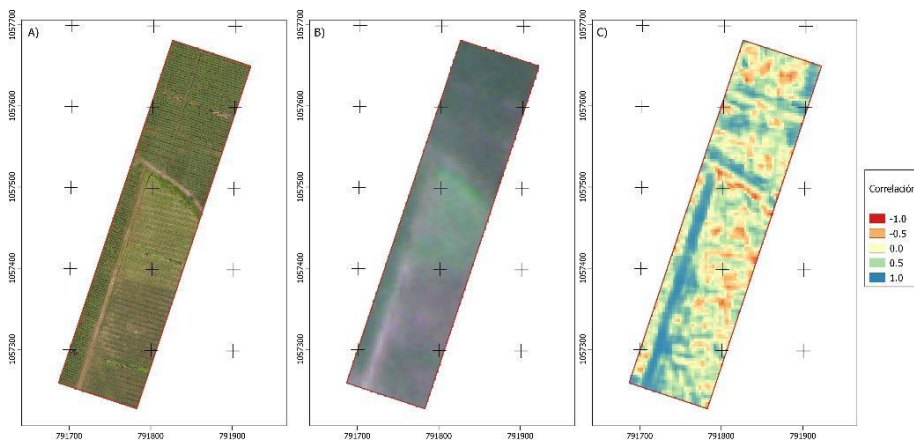


Figura 19. Resultado de la correlación de vecindario entre el índice GNDVI proveniente del P4M con relación a PS.

**Cuadro 11.** Estadísticas de zona (AI) de la correlación con vecindario realizada para el índice GNDVI.

Estadística de zona	Valor
Promedio	0,27
Mediana	0,29
Desviación estándar	0,38

**(D) Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)**

Se evaluó el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI), este es similar al NDVI, pero suprime el efecto ruido de los píxeles de suelo. Utiliza un valor de ajuste a partir de los valores del dosel (L) (Cuadro 8), que es una función de la densidad de vegetación. Se sugiere un valor óptimo de  $L=0.5$  para dar cuenta de las variaciones del suelo de primer orden en el fondo (Chuvieco & Huete, 2009).

Los resultados muestran que la correlación de este índice (SAVI) posee la misma correlación que el NDVI, con valor de 0,81 (Figura 20). Y el  $r^2$  correspondiente a la regresión lineal fue de 0,65 (Figura 21).

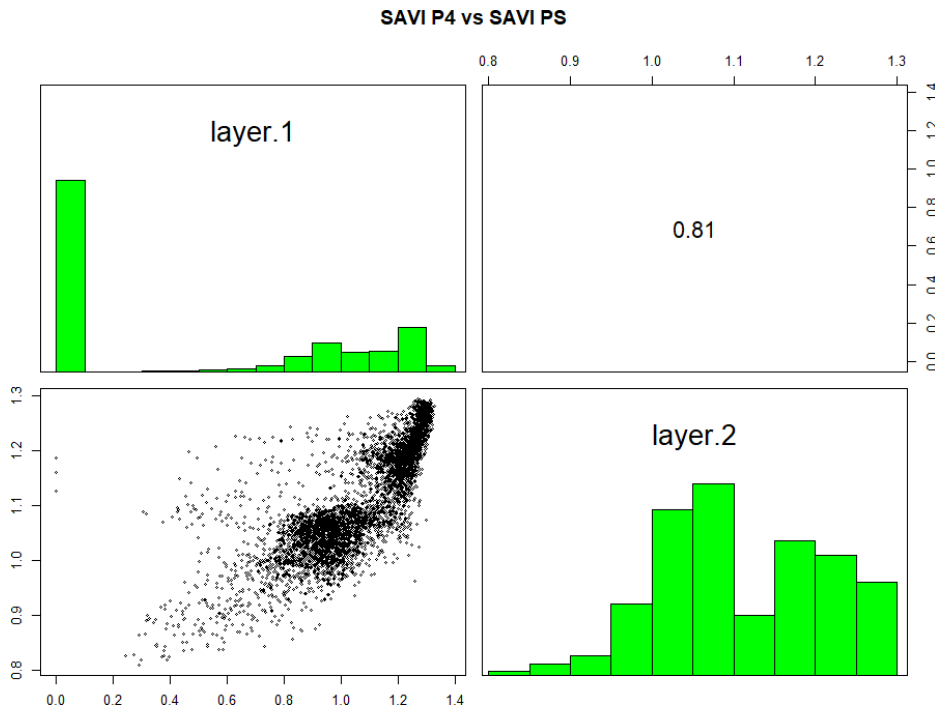


Figura 20. Correlación entre el índice SAVI P4M (layer1) con el NDVI PS (layer2).

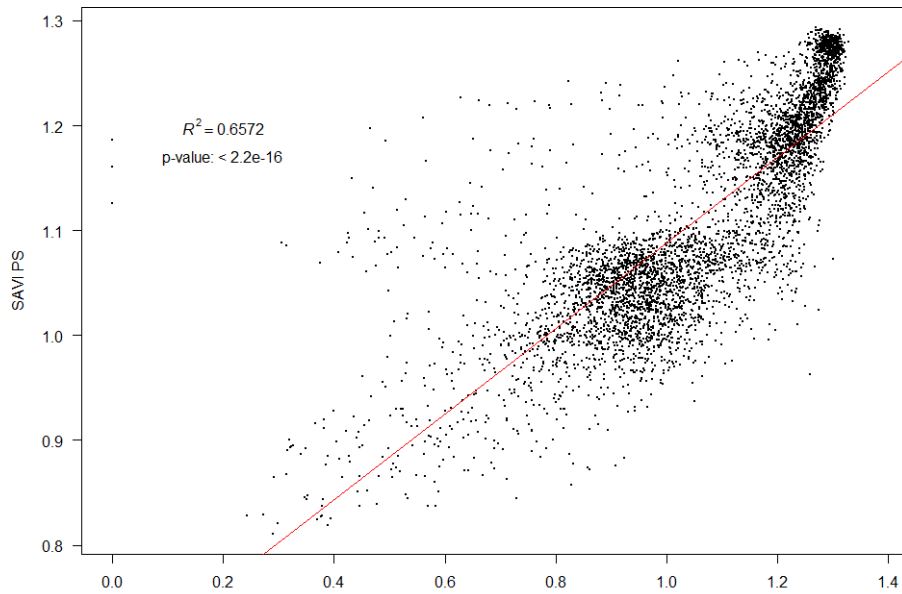


Figura 21. Regresión lineal del índice SAVI del P4M vs PS.

Los resultados de la estadística de zona aplicados a la correlación con vecindario se muestran en el cuadro 5, donde el promedio de correlación para el área de interés es de 0,22 es decir el patrón de correlación es bajo (Cuadro 12 y Figura 22).

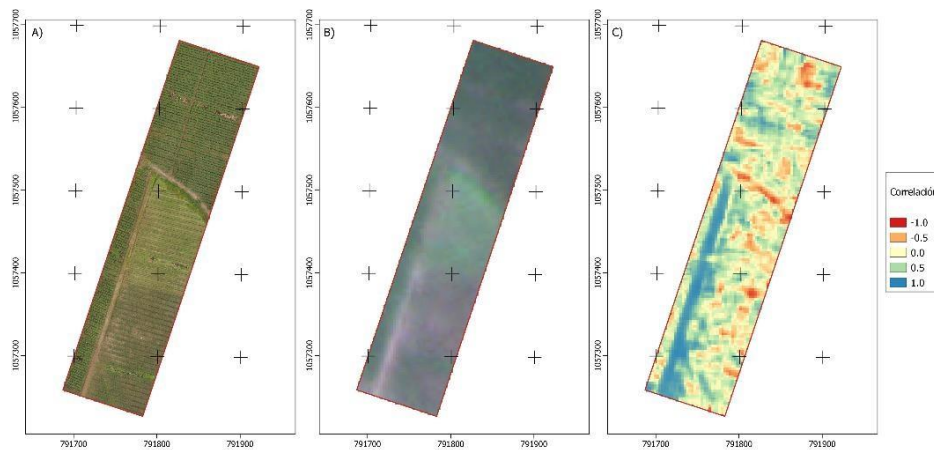


Figura 22. Resultado de la correlación de vecindario entre el índice SAVI proveniente del P4M con relación a PS.



**Cuadro 12.** Estadísticas de zona (AI) de la correlación con vecindario realizada para el índice SAVI.

<b>Estadística de zona</b>	<b>Valor</b>
Promedio	0,22
Mediana	0,23
Desviación estándar	0,38

### (E) Diferencia Normalizada de Borde Rojo (NDRE)

En cuanto al NDRE es un índice que utiliza la banda del borde rojo, la cual es más sensible al contenido de clorofila, a su vez es un mejor indicador de las condiciones de las plantas en comparación al NDVI (EOS 2022). La correlación entre imágenes muestra un valor alto de 0,93 (Figura 23), la regresión lineal de ambos resultados arroja un  $r^2$  ajustado de 0,85 lo cual también se categoriza como alta relación del índice entre ambos sensores.

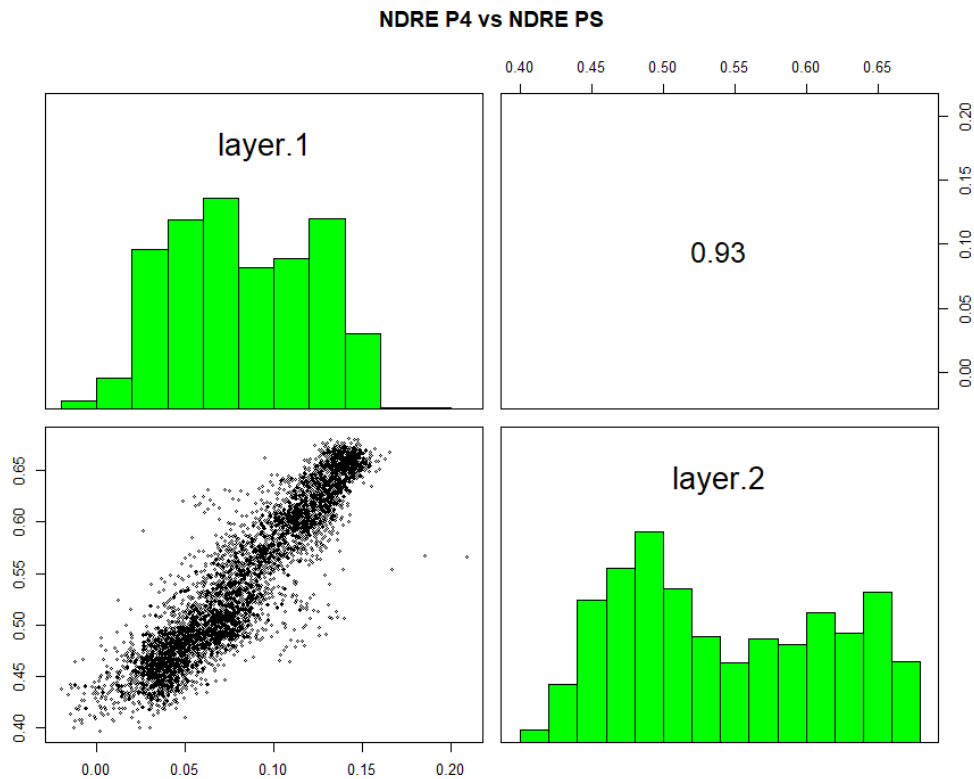


Figura 23. Correlación entre el índice NDRE P4M (layer1) con el NDVI PS (layer2).

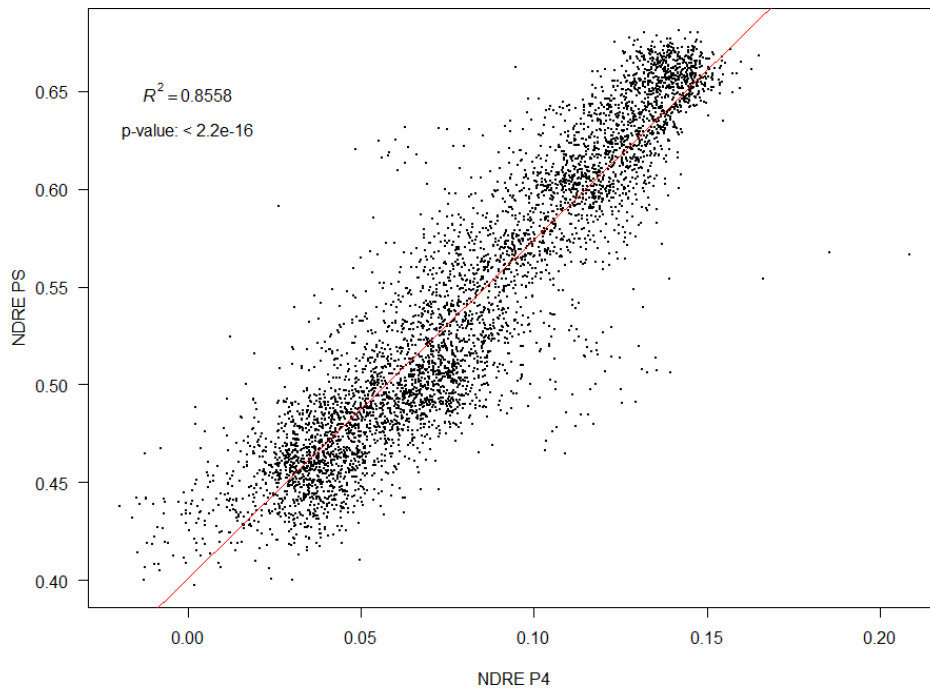
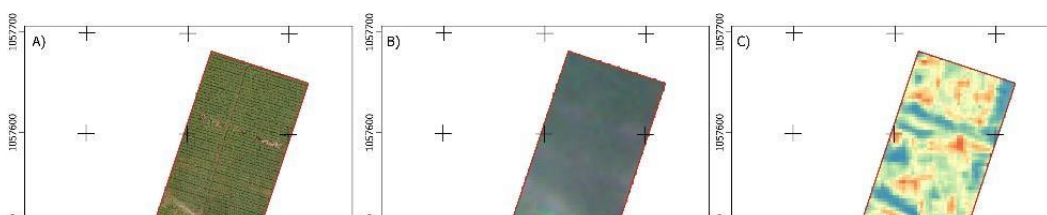


Figura 24. Regresión lineal del índice NDRE del P4M vs PS.

La correlación con vecindario (ventana de 5 x 5 píxeles) muestra una correlación promedio baja de 0,29 y una mediana de correlación de 0,31 y desviación estándar de 0,37 (moderada) (Cuadro 13 y Figura 25).

**Cuadro 13.** Estadísticas de zona del área de interés de la correlación con vecindario realizada para el índice NDRE.

Estadística de zona	Valor
Promedio	0,29
Mediana	0,31
Desviación estándar	0,37





(F) Índice de Clorofila de Borde Rojo (RECI)

Finalmente se evaluó el índice RECI, este un índice enfocado a determinar contenido de clorofila relacionado a concentración de Nitrógeno en la hoja (EOS 2022). La correlación mostró un valor de 0,58, el cual es alto. A su vez, la regresión lineal ejecutada mostró un  $r^2$  ajustado de 0,33 lo cual indica un resultado de moderada explicación de la regresión ejecutada.

RECI P4 vs RECI PS

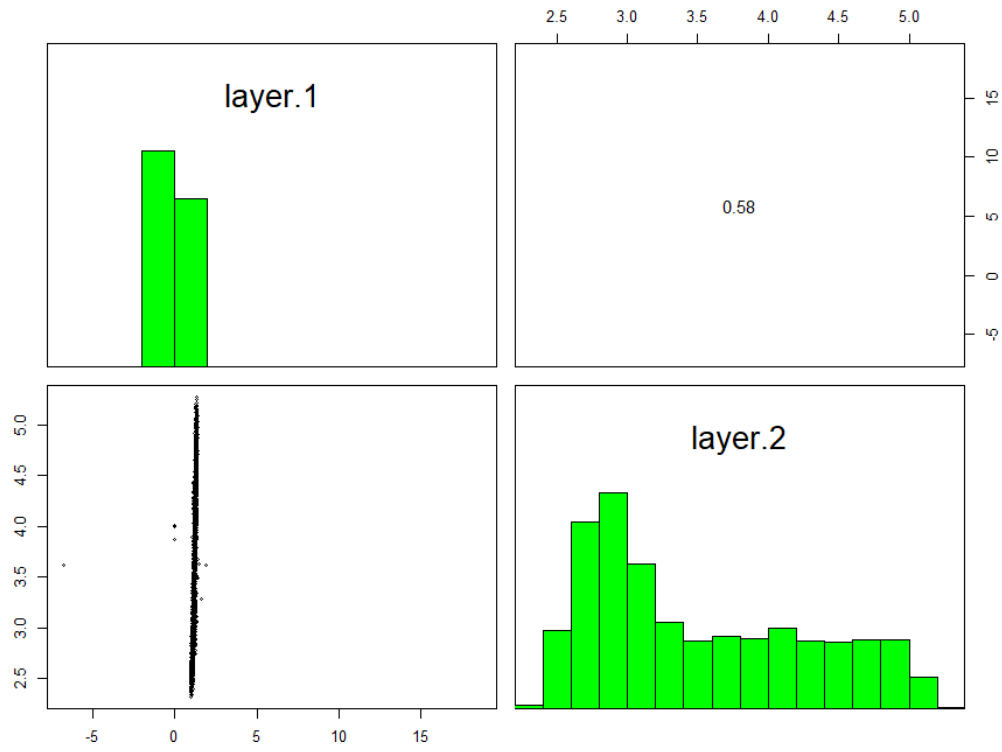


Figura 26. Correlación entre el índice RECI P4M (layer1) con el NDVI PS (layer2).

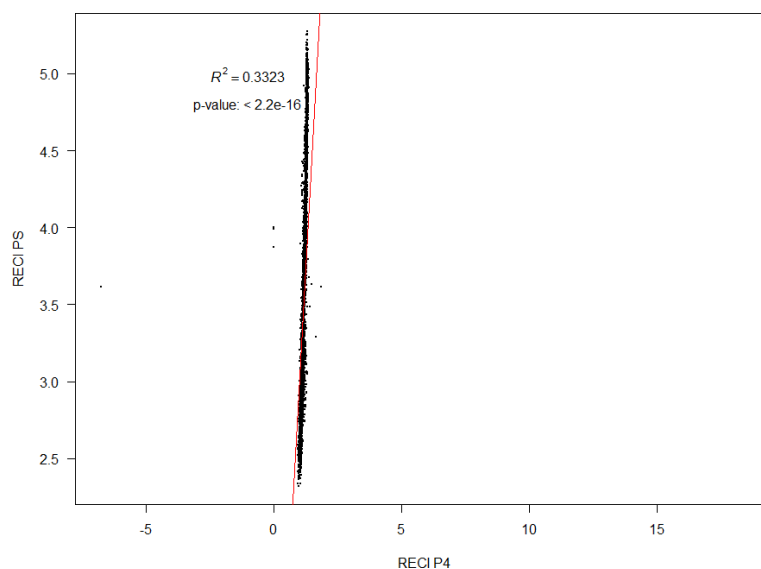


Figura 27. Regresión lineal del índice RECI del P4M vs PS.

Para el caso de la correlación de vecindario, la correlación promedio fue baja con un valor de 0,29, una correlación moderada de mediana y desviación estándar con valores de 0,31 y 0,37 respectivamente.

**Cuadro 14.** Estadísticas de zona del área de interés de la correlación con vecindario realizada para el índice RECI.

Estadística de zona	Valor
Promedio	0,29
Mediana	0,31
Desviación estándar	0,37

Comparación de resultados entre los índices evaluados

En términos comparativos, el NDRE es el índice con mejor correlación (0,29), para el caso de los otros índices su correlación promedio se encuentra en torno a 0,23, con una correlación positiva. Los valores de correlación de la desviación estándar y mediana son prácticamente los mismos para todos los índices con excepción del GNDVI (Cuadro 15).

**Cuadro 15.** Resumen estadístico de las correlaciones de vecindario de cada índice evaluado.



Estadística de zona	NDVI	SR	GNDVI	SAVI	NDRE	RECI
Promedio	0,22	0,22	0,27	0,22	0,29	0,29
Mediana	0,23	0,24	0,29	0,23	0,31	0,31
Desviación estándar	0,39	0,38	0,38	0,38	0,37	0,37

La evaluación de las regresiones lineales de los datos muestra que el índice con mejor evaluación son el NDRE, SAVI y NDVI con 0,85, 0,65 y 0,51 de  $r^2$  ajustado, sin embargo, para los demás índices SR, GNDVI y RECI los  $r^2$  ajustados son moderados, respectivamente con valores de 0,44, 0,31 y 0,33 (Cuadro 16).

**Cuadro 16.** Resumen estadístico de las regresiones lineales de cada índice evaluado.


Regresión lineal	NDVI	SR	GNDVI	SAVI	NDRE	RECI
$r^2$	0,51	0,44	0,31	0,65	0,85	0,33
Valor p	< 2.2e-16	< 2.2e-16	< 2.2e-16	< 2.2e-16	< 2.2e-16	< 2.2e-16

#### 2.2.4 Conclusiones

En este estudio se muestra que la comparabilidad de los datos entre el VANT DJI Phantom 4 Multiespectral y los datos del sensor PlanetScope, presentan valores aceptables. En el caso del GNDVI, NDRE, RECI y SAVI son lo que mejores correlaciones muestran, con valores que pueden categorizarse como altos e indican que su utilización para monitoreo de cultivos de papaya posee un fuerte potencial y permitiría complementarse con los datos de PlanetScope.

Se debe tener en cuenta que este estudio se realizó para un caso específico y no mediante una evaluación temporal más robusta. Se debe evaluar con precaución principalmente el caso del NDVI y SR, los cuales presentan los  $r^2$  más bajos en las regresiones lineales y correlaciones de vecindario bajas. Considerando tanto las regresiones lineales como las correlaciones de vecindario, resultó que el NDVI, NDRE y el SAVI son los índices que mayor comparabilidad presentan y que poseen mayor factibilidad de ser utilizados para monitoreo del cultivo en una combinación de ambos sensores.

Sin embargo, es necesario considerar que la resolución espacial de 0,6 cm del P4M (mosaico



generado) con relación a la de PS -3 m- tiene diferencia de 2,94 m, lo que hace de PS un sensor para fines de monitoreo de mayor escala que un VANT, generando que estas diferencias pueden influir en los resultados obtenidos. También es importante de considerar que estas diferencias también se pueden deber a que los sectores del espectro que abarcan son diferentes.





### **3 Resultados Obtenidos en Chile**

#### **3.1 Validación de la Plataforma OpenFruit en Huertos de Arándano y Frambueso**

Como se destacó en el resumen, para el desarrollo del Modelo Predictivo Preliminar, se propuso realizar un diagnóstico de la condición suelo, planta y clima de los sitios de estudio, siendo éstos 4 huertos de pequeños productores vinculados al proyecto, todos de la Región de La Araucanía, además de la evaluación de sintomatología visual en las plantas y análisis de información meteorológica y edafoclimática de cada huerto.

Por otra parte, se recopiló información productiva (rendimiento) y de manejo agronómico de los predios, principalmente la relacionada a la dosis y frecuencia de riego. Esta información fue recopilada mediante de visitas en campo como también a través de la participación de los productores en la plataforma OpenFruit.

El objetivo de este estudio fue relacionar el riego aplicado por el productor, sin considerar la recomendación de la Plataforma OpenFruit, y compararlo con el riego recomendado por la plataforma, y relacionar estas diferencias con los niveles productivos, el estado nutricional y de reservas del cultivo.

Para esto, se colectaron muestras de los predios en estudio, al menos 3 muestras independientes por unidad, con el propósito de determinar la concentración foliar de macro y micronutrientes, contenido de arginina en raíces y de almidón en yemas.

Los principales resultados obtenidos se describen a continuación.

Para analizar los resultados de análisis mineralógicos, los valores obtenidos para cada nutriente, para arándano alto, se contrastaron con los indicados por Retamales (2012), Vidal (2012), Hirzel (2008) y Pinochet et. al. (2011).

**Tabla 1.** Estándares para arándano alto, cultivados en suelos volcánicos del Sur de Chile y fechas adecuadas de muestreo, de acuerdo a Pinochet et al. (2011).

Nutriente	Normal	Fecha de Muestreo
Nitrógeno (%)	< 2.20	noviembre
Fósforo (%)	0.07 – 0.08	marzo–abril
Potasio (%)	0.55 – 0.80	marzo–abril
Calcio (%)	0.40 – 0.60	marzo–abril
Magnesio (%)	0.09 – 0.14	marzo–abril
Azufre (%)	0.09 – 0.20	noviembre – diciembre
Aluminio (mg kg <sup>-1</sup> )	< 60	noviembre – diciembre

**Tabla 2.** Niveles de referencia adecuados para análisis foliar en arándanos (estándares nacionales), en base a lo reportado por Retamales (2012), Vidal (2012) y Hirzel (2008).

Nutriente	% Peso Seco	Nutriente	Concentración
N	1.7 - 2.1 %	B	30 - 70 ppm
P	0.15 - 0.4 %	Cu	5.0 - 20 ppm
K	0.5 - 0.65 %	Fe	60 - 200 ppm
Ca	0.4 - 0.8 %	Mn	40 - 350 ppm
Mg	0.2 - 0.25 %	Zn	25 - 30 ppm
S	0.12 - 0.2 %		

Para analizar los resultados de análisis mineralógicos, los valores obtenidos para cada nutriente, mientras para el caso de las muestras de hojas de frambuesa, los valores obtenidos se contrastaron con los indicados por Hirzel (2008), los cuales venían incluidos en el informe de resultados del Laboratorio (Tabla 3).



**INFORME DE RESULTADOS - Nº Orden: 186.104**  
**ANALISIS DE TEJIDOS VEGETALES**

Productor : Jose Olivares  
Predio :  
Empresa : Inia-carillanca

Especie : Frambuesa  
Tejido : Hoja  
Remite : Ariel Muñoz - Abel Gonzalez

Provincia : Cautin  
Comuna : Villarrica  
Localidad : Villarrica

Fecha muestreo : 03-04-2023 F.ingreso : 05-04-2023  
Fecha análisis : 05-04-2023 F.informe : 26-04-2023

Pág. 1/3

Identificación Cuartel			R1	R2	R3	Rango Adecuado*
Variedad						
Edad						
Nº de Laboratorio			445262	445263	445264	
Nitrógeno total	(N)	%	2,00	1,86	1,91	2,30 - 4,00
Fósforo	(P)	%	0,22	0,19	0,32	0,20 - 0,60
Potasio	(K)	%	0,83	0,90	0,93	1,00 - 3,00
Calcio	(Ca)	%	2,14	1,71	1,69	0,60 - 2,50
Magnesio	(Mg)	%	0,40	0,32	0,30	0,25 - 1,00
Hierro	(Fe)	ppm	184	184	189	> 50
Manganeso	(Mn)	ppm	137	78	80	> 20
Zinc	(Zn)	ppm	21	20	23	> 15
Cobre	(Cu)	ppm	7	6	6	> 4

\*Rango adecuado frambuesa. Epoca de muestreo: inicio de madurez frutos (Enero-Febrero). Tejido: hojas trifoliadas recientemente maduras o expandidas, de cañas laterales del año. El rango sólo es una guía para la interpretación del resultado.

Figura 28. Ejemplo de informe de resultados de análisis foliar de hojas de frambuesa, en el cual se indican los rangos óptimos para cada nutriente, en base a lo reportado por Hirzel (2008).

Para arándano alto, los resultados de análisis foliares para de macronutrientes (Figura 28), indicaron niveles adecuados de Nitrógeno (N) y Potasio (K), no obstante, se detectaron niveles deficientes de Fósforo (P). Esto último responde a los bajos niveles de P disponibles en los suelos Andisoles, derivados de cenizas volcánicas, típicos de esta zona de Chile, siendo esta una de las principales brechas productivas de los agricultores en esta área. La fertilización fosfatada tiene un alto costo y muchas en la mayor parte de los casos se puede adquirir en formato de gran volumen, lo cual dificulta la opción de fertilización por parte de los sistemas familiares frutícolas. Por otra parte, los resultados revelaron niveles suficientes a altos de Calcio (Ca), lo cual respondería a la aplicación constante, por lo general anual, de enmiendas calcáreas del tipo calcita, con el propósito de corregir la alta acidez que caracteriza a estos suelos. Respecto al Magnesio (Mg), se detectaron niveles deficientes de este elemento en todos los huertos, por lo

que se sugirió a los productores reemplazar el uso de Calcita por Dolomita.

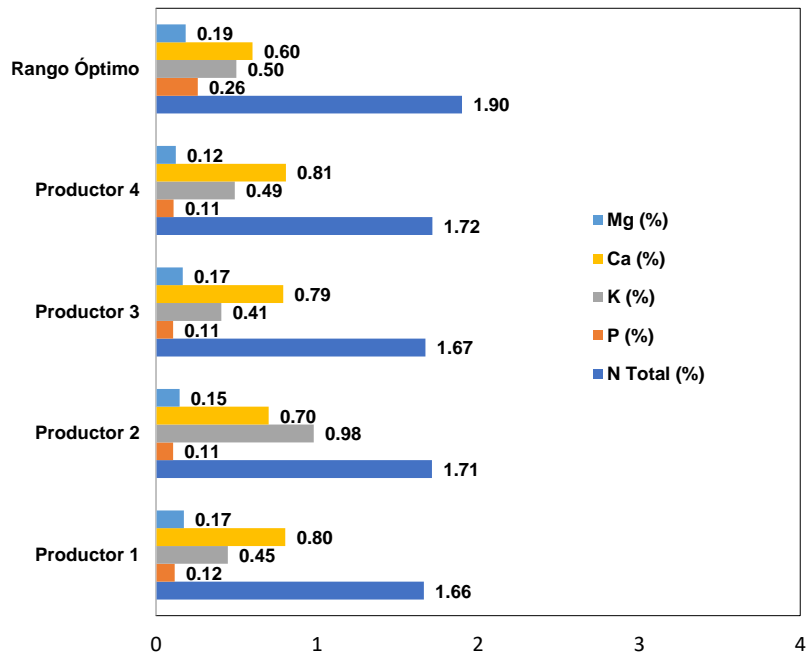


Figura 29. Concentración foliar de macronutrientes en hojas de arándano alto colectadas en los huertos de estudio.

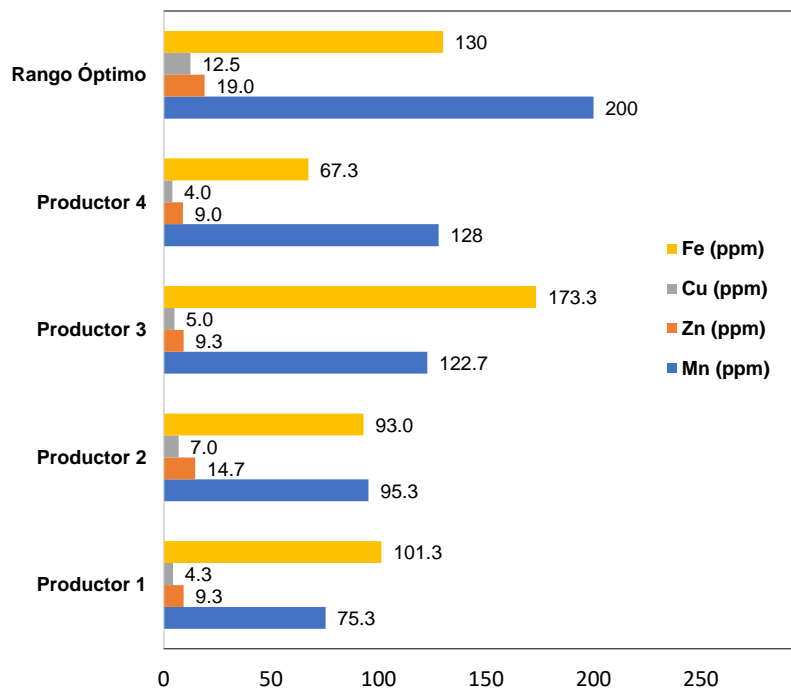


Figura 30. Concentración foliar de micronutrientes (ppm) en hojas de arándano alto colectadas en los huertos de estudio.

En lo que refiere a los niveles de micronutrientes en hojas de arándano (Figura 29), los resultados indicaron una alta variabilidad entre los huertos en estudio, detectando niveles normales a deficientes de Zinc (Zn), Manganeso (Mn), Cobre (Cu) y menos notoriamente de Hierro (Fe).

Estos resultados eran esperables, ya que los pequeños productores no suelen realizar aplicaciones foliares de micronutrientes constantemente, debido a que no es parte de su rutina productiva y con motivo de reducir los costos del sistema productivo frente a un panorama de rentabilidad altamente amenazante y complejo, como es el que sufre la industria del arándano actualmente.

Para el caso de los huertos de frambueso en estudio, los resultados de análisis mineralógico por macronutrientes (Figura indicaron niveles deficientes de N y P y suficientes de K. Respecto a los niveles de Ca y Mg, se observó la misma tendencia que para hojas de arándano alto, con niveles altos de Ca y deficientes de Mg.

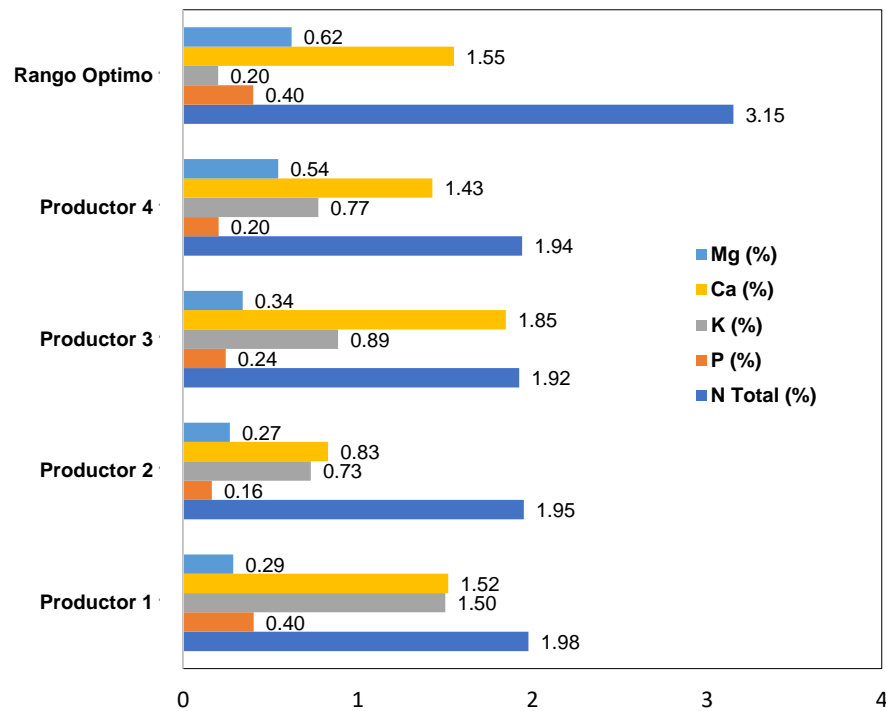


Figura 31. Concentración foliar de macronutrientes en hojas de frambuesa de los huertos de estudio.

En lo refiere a la concentración de micronutrientes en hojas de frambuesa, los resultados indicaron que los niveles de Zn fueron adecuados, y los de Cu variables pero cercanos al rango adecuado. En este caso, se detectaron niveles potencialmente tóxicos, muy por sobre el rango óptimo de Fe y Mn. En este contexto, estudios han demostrado que niveles muy elevados de Fe y Mn pueden causar toxicidad en especies de cultivo.

Los suelos característicos de la zona (Andisoles y Ultisoles), suelen contener concentraciones muy altas de Mn debido a la acidez de suelo, por lo que este resultado era esperable. La fitotoxicidad por Mn se refleja en una disminución notoria del desempeño fotosintético y por tanto en la capacidad productiva del cultivo, por lo que podría representar otra de las brechas de rendimiento para los productores del área.

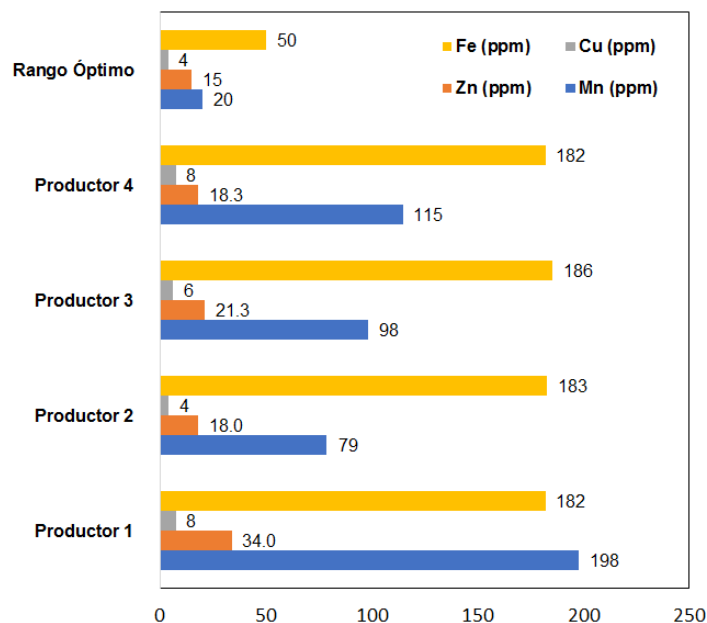


Figura 32. Concentración foliar de micronutrientes (ppm) en hojas de frambuesa colectadas en los huertos de estudio.

El financiar y compartir estos análisis fue muy relevante y valorado por parte de los productores, quienes nunca antes habían tenido información respecto a aspectos nutricionales de sus cultivos. Esta información será clave para la futura implementación de estrategias de fertilización por parte de los productores.

Por otra parte, el equipo de investigación realizó un análisis de la relación entre el índice NDVI y el estado fenológico del cultivo, tanto para los huertos de arándano (Figura 33) y frambueso (Figura 34). Los resultados indicaron que NDVI, en el cual se basa el cálculo de la dosis de riego en la plataforma OpenFruit, refleja el desarrollo fenológico a través de la temporada, no obstante se detecta una alta variabilidad en los valores, sobre todo para arándano alto, lo cual se relacionaría a la heterogeneidad de los huertos analizados.

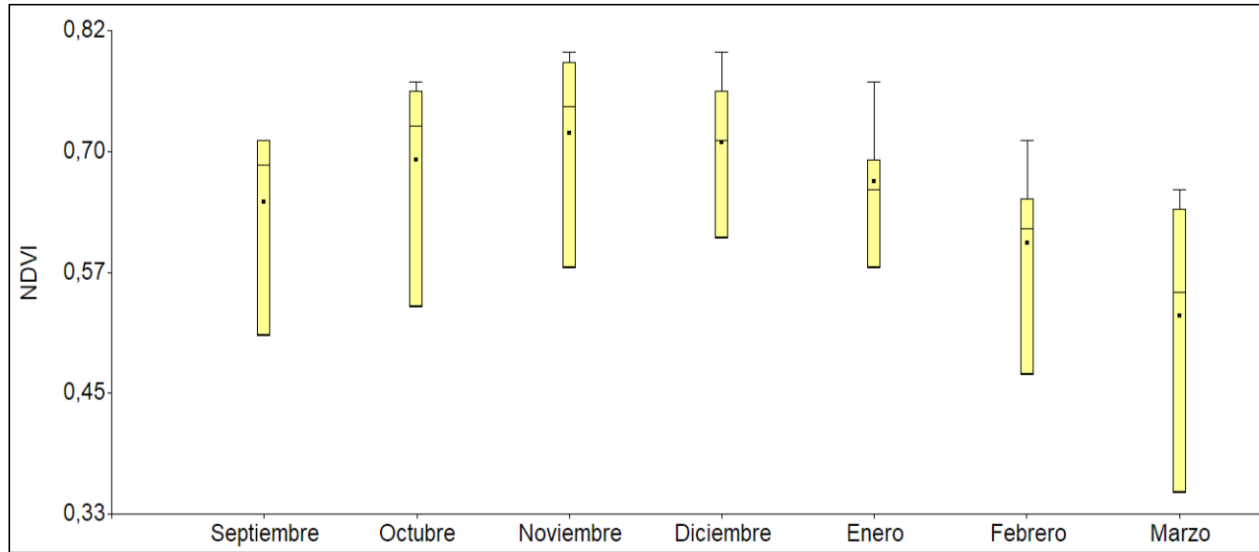


Figura 33. Relación entre el índice satelital NDVI y el avance fenológico de plantas de arándano en los huertos en estudio.

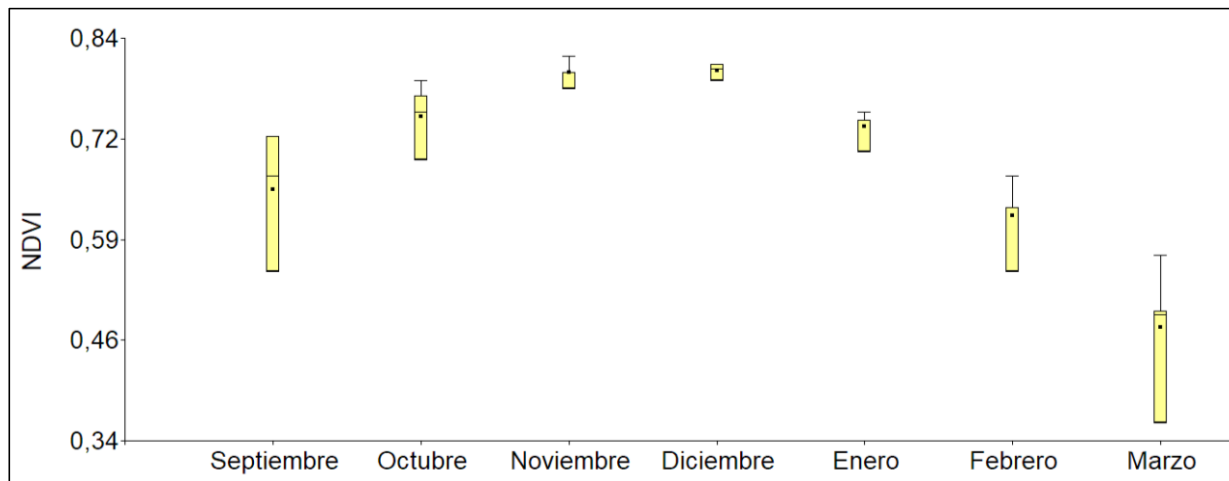


Figura 34. Relación entre el índice satelital NDVI y el avance fenológico de plantas de frambueso en los huertos en estudio.

Además, se detectó una correlación positiva y significativa entre riego aplicado y NDVI (Vigor), pero solamente para frambueso.



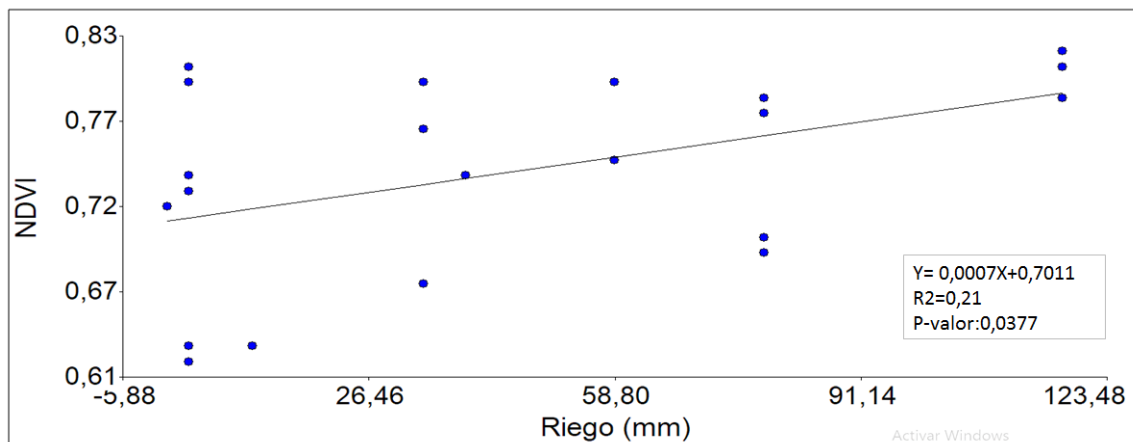


Figura 35. Relación entre el índice satelital NDVI y el avance fenológico de plantas de frambueso en los huertos en estudio.

Las Figuras 36 y 37 muestran la relación entre las dosis de riego aplicado por los productores durante la temporada 2022/2023 y el riego estimado (recomendado) por la plataforma OpenFruit para la misma temporada.

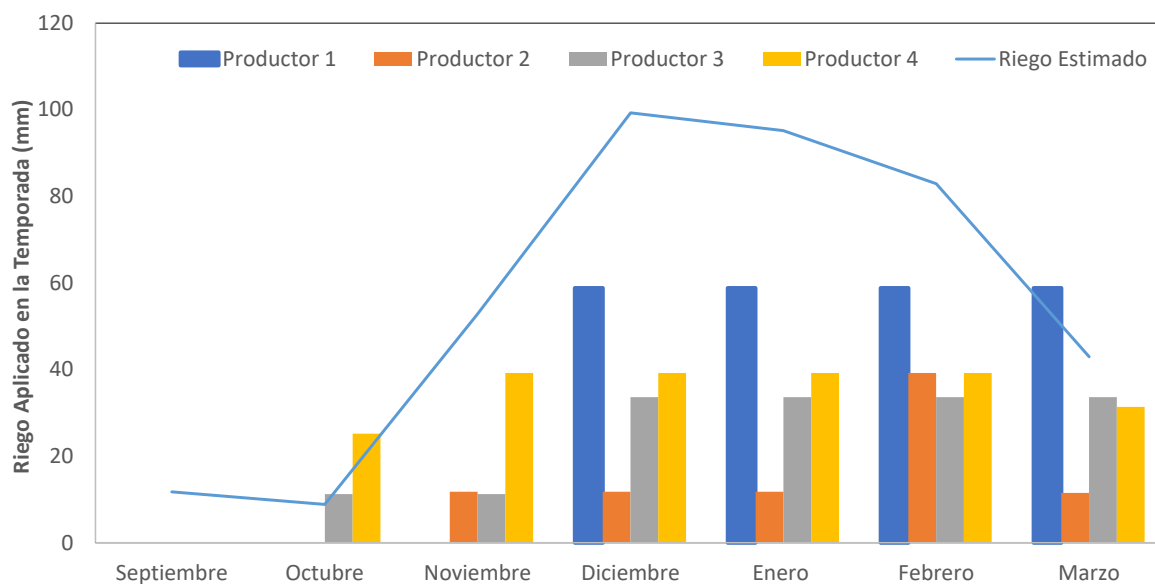


Figura 36. Dosis de riego aplicada mensualmente por los productores de arándano alto de los huertos en estudio, y su relación con el riego estimado por la plataforma OpenFruit.

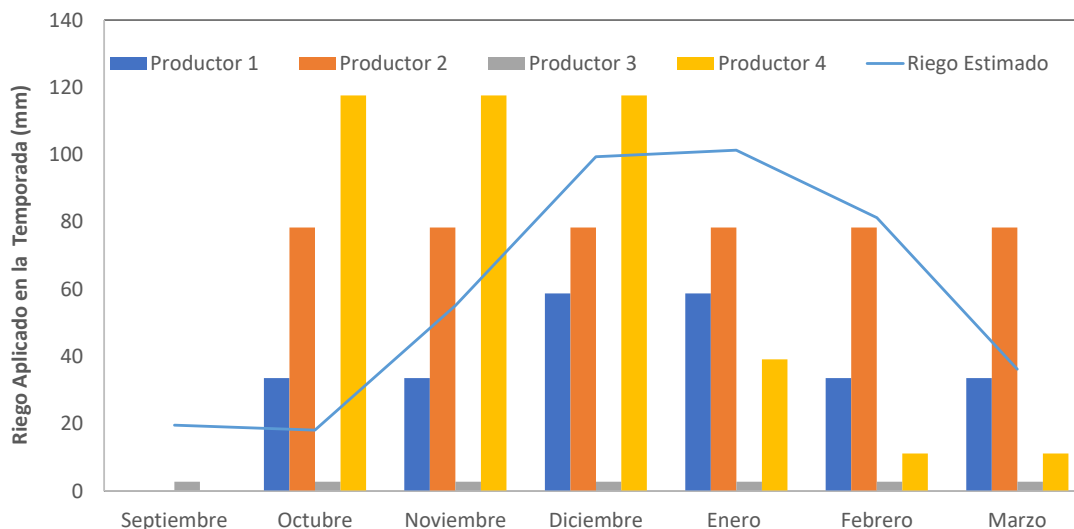


Figura 37. Dosis de riego aplicada mensualmente por los productores de frambuesa de los huertos en estudio, y su relación con el riego estimado por la plataforma OpenFruit.

Los resultados indican que en general, los productores de arándano riegan menos de lo que debería regar, considerando el riego recomendado por la Plataforma OpenFruit, lo cual particularmente notorio durante los meses de mayor demanda del cultivo (diciembre, enero y febrero). Además, los productores estarían comenzando a regar antes de lo que deberían. Por otro lado, los resultados indican que existe una alta variabilidad respecto a las dosis de riego aplicadas entre los productores, aun cuando pertenecen a la misma zona agroecológica y que cultivan la misma especie.

Para el caso de productores de frambuesa, los datos indicaron que los productores riegan más de lo que deberían regar, pero sólo al inicio de temporada, mientras entre enero y marzo, sólo para un productor (Productor 1), los riegos aplicados fueron más cercanos a lo recomendado por la Plataforma OpenFruit. Por otro lado, algunos productores estarían regando menos de lo que debería o bien aplican la misma dosis cada mes, lo cual no debería ser eficiente, considerando que la demanda hídrica varía en el tiempo.

Lo mencionado anteriormente, es confirmado con los datos que presenta la Figura 38, en la cual se muestra el total de riego aplicado en la temporada (mm) respecto al volumen total de riego que recomienda la plataforma. Los productores de arándano aplican volúmenes de riego muy por debajo de lo recomendado pro OpenFruit, mientras, en general, los productores de frambuesa aplicaría volúmenes de riego más cercanos a lo que recomienda OpenFruit, no obstante la variabilidad entre la cantidad de agua aplicada en la temporada entre los productores es muy alta. Como muestra la Figura 39, los productores que riegan con mayores volúmenes de agua o con riegos más cercanos a la plataforma, no siempre son quienes obtienen mayores

rendimientos. Esto podría responder a que los productores no estén entregando la información correcta respecto a sus niveles productivos, lo mismo que en la cantidad de agua aplicada, ya por lo general no llevan un registro de las actividades y data de campo; o bien, a que los niveles productivos además dependen de los estados nutricionales y otras prácticas de manejo aplicadas. Para arándano, se detectó una correlación positiva significativa ( $R^2 = 0,7$ ), entre riego aplicado y rendimiento. De acuerdo al análisis de datos de frambuesa, se detectó una correlación negativa ( $R^2 = 0,77$ ) entre el delta de riego (riego recomendado por la plataforma & riego aplicado por los productores) y el rendimiento, vale decir que los productores que regaron más cercano a lo sugerido por la plataforma, en general presentaron mayores rendimiento, con lo cual se estaría validando indirectamente las dosis de riego estimadas por la plataforma.

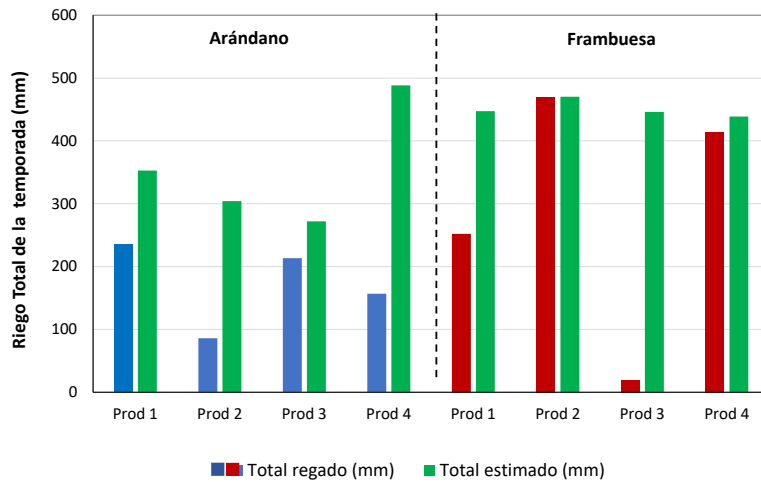


Figura 38. Relación entre el riego aplicado por los productores y el riego recomendado (estimado) por la plataforma OpenFruit de los huertos de arándano y frambuesa en estudio (Prod = Productor).

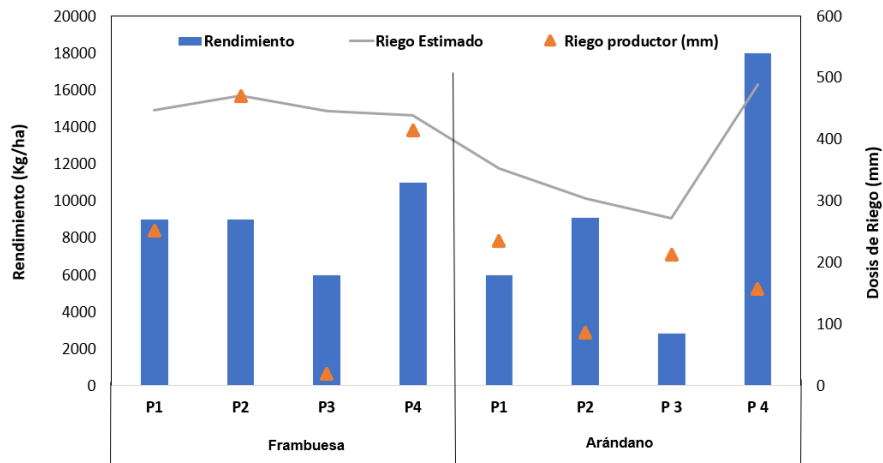


Figura 39. Relación entre el riego aplicado por los productores y el riego recomendado (estimado) por la plataforma OpenFruit de los huertos de arándano y frambuesa en estudio y su relación con el rendimiento alcanzado por productor (P = Productor).

Los resultados respecto a los niveles de reserva (arginina en raíces, Figura 30; almidón en yemas, Figura 41) en las plantas de los huertos de estudio, indican que los niveles de ambos parámetros no varían sustancialmente entre los productores, a pesar de la variación detectadas para éstos en términos de contenido de agua aplicada. Por otro lado los datos revelaron una diferencia en el contenido de almidón y arginina en raíces entre las especies en estudio y que además la proporción entre ambas reservas es inversa entre ambas especies. Es importante destacar que los niveles de ambas reservas son bastante altos respecto a lo reportado en literatura, lo cual podría responder a la fecha tardía en la cual se realizaron los muestreos (marzo), ya que para realizar estos análisis lo recomendado es coleccionar muestras en junio.

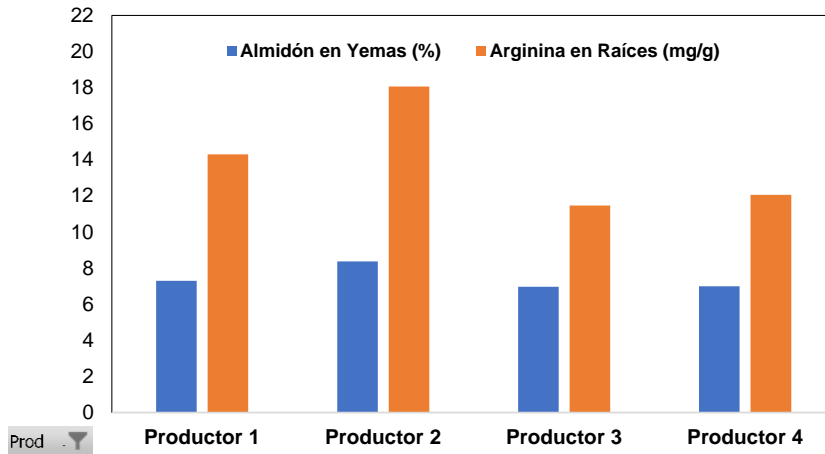


Figura 40. Niveles de reservas en yemas y raíces de plantas de frambuesa en los huertos en estudio.

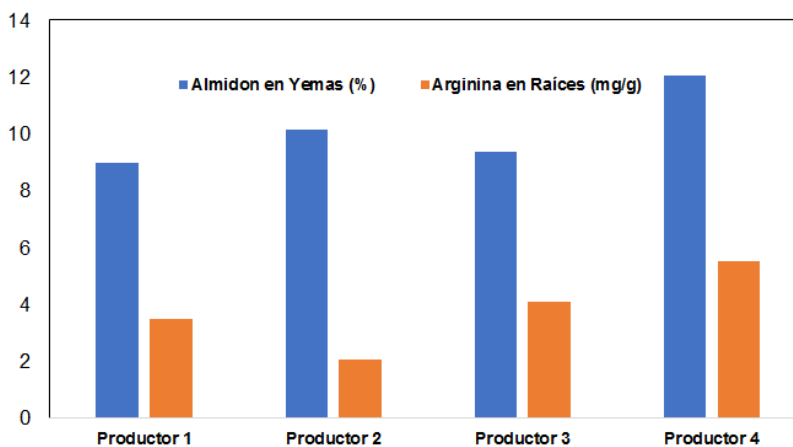


Figura 41. Niveles de reservas en yemas y raíces de plantas de frambuesa en los huertos en estudio.

El grupo de trabajo además consideró importante analizar la relación entre el índice NDVI y algunos de los parámetros determinados, tales como N foliar (Figura 42), almidón en yemas (Figura 43) y arginina en raíces (Figura 44). Para calcular estas correlaciones, se utilizaron datos tanto de arándano como de frambuesa, en un solo set de datos.

Los resultados muestran que la correlación entre N y NDVI fue positiva y significativa, como un R2 muy bajo, lo cual indica que este índice tal vez sería el apropiado para estimar dosis de N a través de la plataforma. La correlación entre NDVI y otros macro/micro nutrientes no fue significativa.

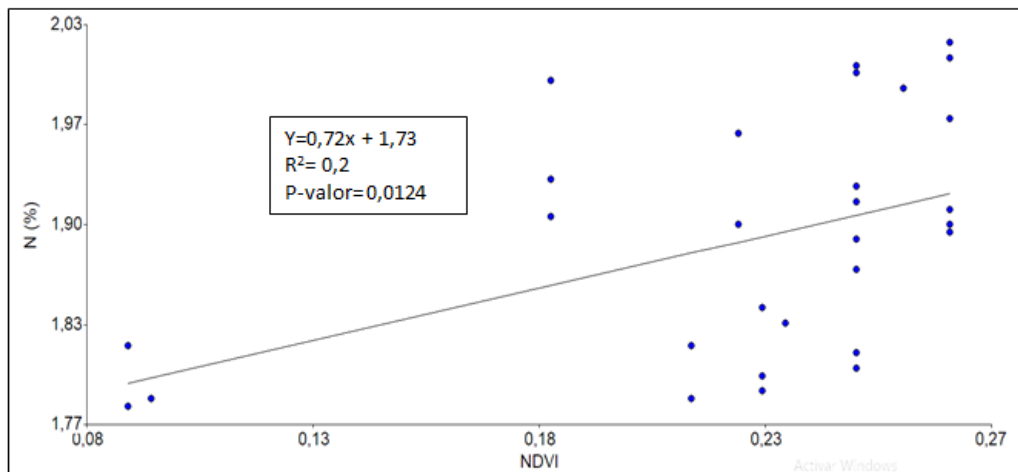


Figura 42. Correlación entre índice satelital NDVI y el contenido foliar de N en hojas de arándano y frambueso de los huertos en estudio.

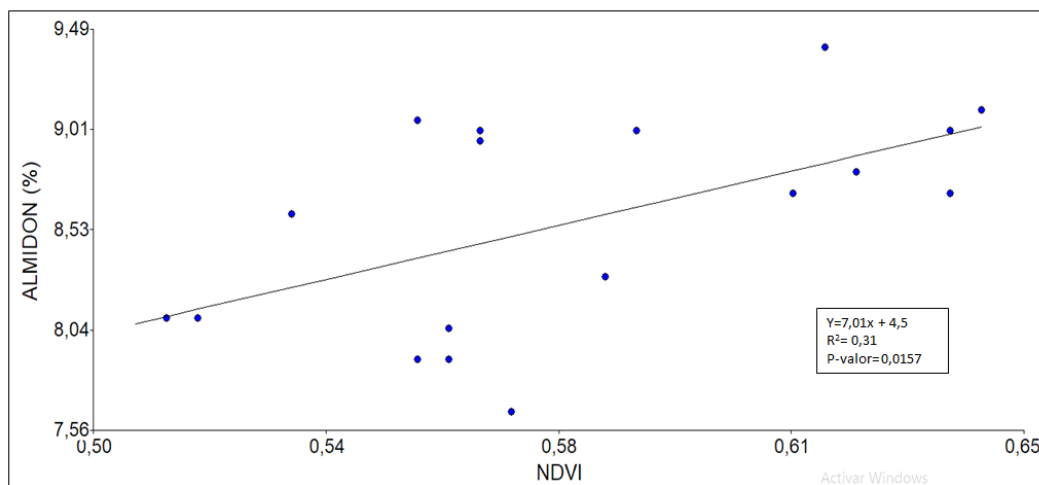


Figura 43. Correlación entre índice satelital NDVI y el contenido de almidón en yemas de arándano y frambueso de los huertos en estudio.

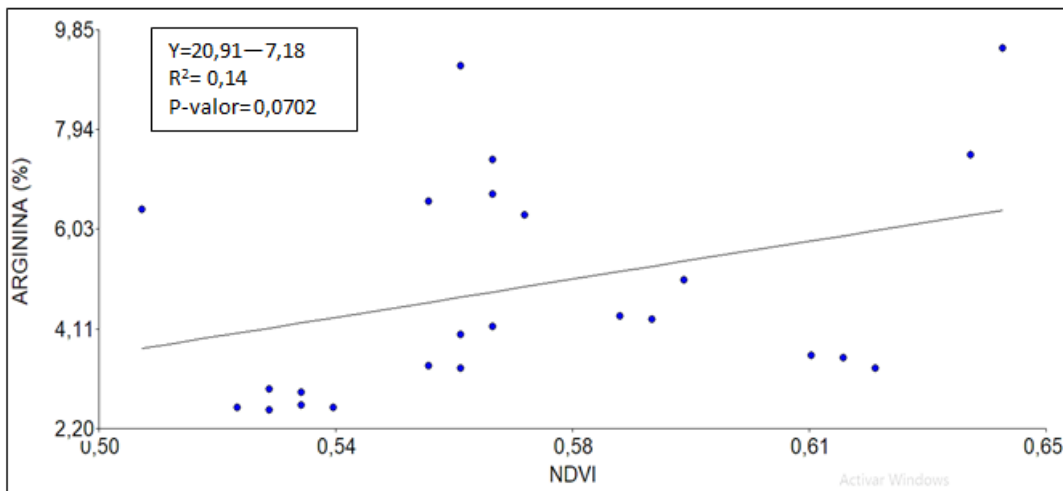



Figura 44. Correlación entre índice satelital NDVI y el contenido de arginina en raíces de arándano y frambueso de los huertos en estudio.

Finalmente, los datos muestran que la correlación entre NDVI y almidón en yemas fue significativa y positiva, con un  $R^2$  de 0,3, lo cual es interesante considerando el bajo número de datos disponibles para realizar el análisis. En lo que refiere a arginina, no se detectó una correlación significativa con los valores de NDVI. Estos resultados indican que NDVI podría representar un índice apropiado para la estimación remota de almidón en yemas, parámetro que es determinada para la ruptura del receso invernal y el crecimiento inicial post dormancia en especies de hoja caduca.

## 4 Referencias Bibliográficas

- Agisoft. (2022). Agisoft Metashape: Agisoft Metashape. <https://www.agisoft.com/>
- Chuvieco, E., & Huete, A. (2009). Fundamentals of satellite remote sensing. En *Fundamentals of Satellite Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1201/b18954>
- Chuvieco, E., & Huete, A. (2009). Fundamentals of satellite remote sensing. En *Fundamentals of Satellite Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1201/b18954>
- DJI. (2022). P4 Multispectral - DJI. <https://www.dji.com/p4-multispectral>  
Ecology, 50(4), 663-666. <https://doi.org/10.2307/1936256>
- EOS. (2022). *Índices De Vegetación Y Su Aplicación En La Agricultura Digital*. EOS. <https://eos.com/es/blog/indices-de-vegetacion/>
- EOS. (2022). *Índices De Vegetación Y Su Aplicación En La Agricultura Digital*. EOS. <https://eos.com/es/blog/indices-de-vegetacion/>
- Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., & Merzlyak, M. N. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 289-298. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00072-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7)
- González G., Abel (ed.) (2017) Adaptación de la metodología cropcheck para el cultivo de arándanos en el Sur de Chile [en línea]. Temuco, Chile: Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. no. 346. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14001/6572>
- Hirzel, J. 2008. El suelo como fuente nutricional. En: Diagnóstico nutricional y principios de fertilización en frutales y vides. pp 51-82. Colección libros INIA N° 24. Capítulo 2. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación Quilamapu, Chillán.
- Jordan, C. F. (1969). Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor.
- Mills, H., & Jones, J. (1996). *Plant Analysis Handbook II: A practical sampling, preparation, analysis, and interpretation guide*. 422p.
- Remote Sensing of Environment*, 55(2), 95-107. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00186-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00186-7).





Retamales, J., & Hancock, J. 2012. Blueberries Crop Production science in Horticulture. 323 p. series: Nº 21. CABI International. England.

Rondeaux, G., Steven, M., & Baret, F. (1996). Optimization of soil-adjusted vegetation indices.

W. (1974). Monitoring vegetation systems in the great plains with erts. *NASA. Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1 Symp., Vol. 1, Sect. A.*

## 5 Instituciones Principales



## 6 Instituciones Asociadas



Secretaría Técnica Administrativa



Con el apoyo de:



[www.fontagro.org](http://www.fontagro.org)

Correo electrónico: [fontagro@fontagro.org](mailto:fontagro@fontagro.org)