

REPÚBLICA DOMINICANA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DEL CIBAO ORIENTAL
(UTECO)

Universidad Patrimonio de la Comunidad



Facultad de Ingeniería y Recursos Naturales
Escuela de Agropecuaria

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Agrónomo, Mención
Producción de Cultivos

Título:
APLICACIÓN DE AERONAVE PILOTADA REMOTAMENTE (DRONE) PARA
EL MAPEO DE NUTRIENTES EN ARROZ (*Oryza sativa* L.) A ESCALA DE
FINCAS

Sustentantes:
Johanny Vargas José
Nicol Manzueta Ventura
Ramona Morel Vásquez

Asesora:
Dra. Glenny López Rodríguez

Cotuí, provincia Sánchez Ramírez
Año Académico 2026

Título:
**APLICACIÓN DE AERONAVE PILOTADA REMOTAMENTE (DRONE) PARA
EL MAPEO DE NUTRIENTES EN ARROZ (*Oryza sativa* L.) A ESCALA DE
FINCAS**

Hoja de Evaluación

APLICACIÓN DE AERONAVE PILOTADA REMOTAMENTE (DRONE) PARA EL MAPEO DE NUTRIENTES EN ARROZ (*Oryza sativa* L.) A ESCALA DE FINCAS

Por:

Johanny Vargas José, Nicol Manzueta Ventura y Ramona Morel Vásquez

Trabajo de Grado sometido a la Universidad Tecnológica del Cibao Oriental (UTECO), como requisito parcial para obtener el título de ingeniero Agrónomo, mención Producción Agrícola.

Dra. Glenney López Rodríguez
Profesor asesor

Dra. Marianela Conce Conce
Miembro de Comité Evaluador

Ing. Margarita de la Cruz Ángeles
Miembro de Comité Evaluador

Lic. Luz María Jiménez
Miembro de Comité Evaluador

Lic. Sigfredo A. Rodríguez González
Director Escuela de Agropecuaria

Ing. Juan Antonio Graciano Domínguez
Decano de la Facultad de Ingeniería y Recursos Naturales

Calificación: _____

Cotuí, prov. Sánchez Ramírez, República Dominicana
Enero 2026

Nota Aclaratoria

Este trabajo de investigación, titulado **“Aplicación de una aeronave pilotada remotamente (drone) para el mapeo de nutrientes en arroz (*Oryza sativa* L.) a escala de fincas”**, se realizó en el marco del proyecto **“Utilización de RPAS (Remotely Piloted Aircraft Systems) para el mapeo de nutrientes en el cultivo de arroz en República Dominicana (IDIAF-FONDOCYT 2020-2021-3A5-027)”**. El proyecto contó con financiamiento del **Ministerio de Educación Superior, Ciencia y Tecnología (MESCYT)**, a través del **Fondo Nacional de Innovación y Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDOCYT)**, y del **Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (IDIAF)**, bajo la dirección de la **Dra. Glenny Llinee López Rodríguez, Investigadora Principal** del mismo.

Índice de Contenido

	Pág.
Hoja de Evaluación	ii
Nota Aclaratoria	iii
Índice de Contenido	iv
Índice de Cuadros.....	xi
Índice de Figuras	xiii
Índice de Anexos	xviii
Agradecimientos	xix
Dedicatoria	xxi
Resumen	xxiv
CAPITULO I: MARCO INTRODUCTORIO	25
1.1. Introducción	25
1.2. Antecedentes	26
1.3. Planteamiento del problema	31
1.4. Justificación.....	33
1.5. Objetivos	35
1.5.1 Objetivo general.....	35
1.5.2 Objetivos específicos	35
1.6. Operacionalización de las variables	35
1.7. Hipótesis.....	37
1.7.1. H ₁ (Hipótesis general).....	37
1.7.2. H ₀ (Hipótesis nula general).....	37
1.7.3. Hipótesis específicas.....	37
1.8. Alcances y limites	38

1.8.1.	Alcance investigativo.....	38
1.8.2.	Límites	38
1.9.	Definición de términos	39
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO		42
2.1.	Generalidades del cultivo de arroz	42
2.1.1	Importancia del cultivo de arroz	42
2.1.2	Origen, historia y expansión del cultivo de arroz	44
2.1.3	Clasificación taxonómica.....	45
2.1.4	Morfología del cultivo	45
2.1.5	Requerimientos edafoclimáticos	46
2.1.5.1.	Clima y temperatura.....	46
2.1.5.2.	Precipitación y humedad.....	47
2.1.5.3.	Suelo y pH.....	47
2.1.5.4.	Agua y riego.....	47
2.1.6	Requerimiento y manejo nutricional del cultivo de arroz.....	48
2.1.7	Fertilización y nutrientes esenciales	48
2.1.8	Nutrientes esenciales: macro y micronutrientes	49
2.1.9	Etapas fenológicas del cultivo de arroz	52
2.2.	Sistemas de Aeronaves Pilotadas Remotamente (RPAS) para el mapeo de nutrientes en arroz	54
2.2.1.	Introducción a los RPAS en agricultura de precisión.....	54
2.2.1.1.	Concepto y definición de RPAS/drones	54
2.2.1.2.	Tipos de RPAS utilizados en agricultura (multirrotor, ala fija, híbridos)	55
2.2.1.3.	Ventajas frente a métodos tradicionales de monitoreo	57
2.2.1.4.	Limitaciones y precisión de la información obtenida	58

2.2.2. Fundamentos del mapeo de nutrientes en cultivo de arroz.....	58
2.2.3. Sensores y tecnologías embarcadas en RPAS para monitoreo nutricional	59
2.2.3.1 Uso de cámaras RGB y NIR en aplicaciones agrícolas mediante UAVs .	61
2.2.3.2. Tipos de sensores: multiespectrales, hiperespectrales, RGB, térmicos ...	63
2.2.4. Índices vegetativos: principios de medición de nutrientes mediante índices vegetativos (NDVI, GNDVI, etc.).....	64
2.2.5. Índices RGB	66
2.2.6. Procesamiento de datos y generación de mapas de nutrientes	67
2.2.6.1. Pre-procesamiento de imágenes y calibración radiométrica.....	68
2.2.6.2. Modelos de correlación entre reflectancia y contenido nutricional	68
2.2.6.3. Software y plataformas de análisis geoespacial aplicadas a RPAS.	69
2.2.7. Aplicaciones prácticas en sistemas arroceros	70
2.2.8. Optimización de la fertilización mediante mapas de nutrientes	70
2.2.9. Integración de drones con otras tecnologías de agricultura de precisión	71
2.9.10. Productos fotogramétricos y satelitales	73
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	80
3.1. Área de estudio: delimitación espacial	80
3.1.1. Ubicación geográfica de los campos arroceros objetos de estudio.....	80
3.1.2. Caracterización agroclimática.....	80
3.1.3. Delimitación temporal	82
3.2. Tipo y diseño de investigación.....	82
3.3. Materiales, equipos, métodos y procedimientos técnicos	82
3.3.1. Características agronómicas y manejo del cultivo en las fincas de estudio	82
3.3.2. Características físico-químicos de suelos (inicial y final) y agua de riego.	83
3.3.3. Captura de imágenes mediante RPAS (dron) en distintas etapas fenológicas del cultivo de arroz e índices visibles (RGB)	85

3.3.3.1. Plataforma RPAS utilizada en el estudio y especificaciones técnicas y placa de calibración para imágenes multiespectrales	85
3.3.3.2. Planificación y ejecución de vuelos con dron.....	87
3.3.3.3. Configuración de planes de vuelos	87
3.3.3.4. Flujograma de trabajo para la captura de imágenes con dron en distintas etapas fenológicas del cultivo de arroz y análisis de información obtenida	88
3.3.4. Monitoreo mediante RPAS según fecha de captura (calendario) y etapas fenológicas evaluadas	88
3.3.4.1. Captura de imágenes en distintas etapas fenológicas	88
3.3.4.2. Recolección de tejido vegetal para análisis nutricional y nutrientes evaluados.....	90
3.3.4.3. Cálculo de índices visibles (RGB) sobre el ortomosaico.....	90
3.3.5. Análisis imágenes de RPAS/dron e imágenes satelitales y Productos fotogramétricos RGB (Ortomosaico RGB por vuelo).....	91
3.3.5.1. Procesamiento fotogramétrico en Pix4Dmapper	92
3.3.5.2. Análisis agronómico en Pix4Dfields	92
3.3.5.3. Índices satelitales (EOSDA Crop Monitoring).....	93
3.3.6. Componentes de producción y rendimiento del cultivo de arroz	93
3.3.6.1. Cosecha del cultivo en campo.....	93
3.3.6.2. Manipulación de material cosechado.....	93
3.3.6.3. Componentes de producción y rendimiento	94
3.4. Procesamiento y análisis de la información	95
3.4.1. Recolección de datos espectrales y nutricionales	95
3.4.2. Análisis estadístico y descriptivo de los datos.....	96
3.4.3. Análisis de correlación.....	96
3.4.4. Comparación con rangos deseados	96

3.4.5.	Visualización de los Datos.....	96
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES.....		97
4.1	Resultados Objetivo 1. Parámetros físico-químicos de suelos y agua de riego provenientes de tres fincas de arroz ubicadas en: Jima Arriba, Rincón y Las Cabuyas	97
4.1.1.	Características físico-químicas presentada en los suelos estudiados.....	97
4.1.1.1.	Textura y fracciones granulométricas.....	97
4.1.1.2.	Conductividad eléctrica (CE) y sodio (Na) disponible	99
4.1.1.3.	Reacción del suelo (pH) y caliza activa	99
4.1.1.4.	Materia orgánica (MO), nitrógeno total (N-total) y relación C/N	99
4.1.1.5.	Fósforo disponible (P Olsen) y cationes intercambiables.....	100
4.1.1.6.	Potasio disponible (K) y cationes intercambiables	100
4.1.1.7.	Cationes intercambiables: calcio (Ca), magnesio (Mg) y sodio (Mg) ...	100
4.1.2	Calidad físico-química del agua de riego	101
4.2	Resultados Objetivo 2. Imágenes obtenidas con RPAS en distintas etapas fenológicas del cultivo de arroz, generación y procesamiento de ortomosaicos RGB y e índices visibles (RGB) para la variabilidad intra-parcela	104
4.2.1.	Productos fotogramétricos obtenidos mediante RPAS	104
4.2.1.1.	Etapas vegetativas (macollamiento): vuelo 1.....	104
4.2.1.2.	Etapas reproductivas temprana (embuchamiento): vuelo 2 y avanzada (floración/antesis): vuelo 3	105
4.2.1.3.	Etapas de maduración (llenado de grano, estado lechoso a pastoso): vuelo 4	108
4.2.2.	Índices visibles (RGB) de vigor: TGI (<i>Triangular Greenness Index</i>) y VARI (<i>Visible Atmospherically Resistant Index</i>) según etapa fenológica	109
4.3	Resultados Objetivo 3. Relación entre imágenes obtenidas con RPAS e imágenes satelitales (<i>EOSDA Crop Monitoring</i>) y niveles de nutrientes foliares del cultivo	118
4.3.1.	Índices satelitales (Plataforma <i>EOSDA Crop Monitoring</i>)	118

4.3.1.1. Comportamiento espacial y temporal de los índices satelitales.....	118
4.3.1.2. Índices asociados al verdor y biomasa del dosel (NDVI y MSAVI).....	118
4.3.1.3. Índices asociados al contenido relativo de clorofila del dosel: NDRE y RECI	120
4.3.2. Índices espectrales satelitales provenientes de la plataforma digital <i>EOSDA Crop Monitoring</i>	122
4.3.2.1. Concentración de nutrientes foliares en el cultivo de arroz	125
4.3.2.2. Análisis de la relación entre índices espectrales y nutrientes foliares ...	128
4.4 Resultados Objetivo 4. Componentes de producción para la caracterización del rendimiento del cultivo de arroz bajo las condiciones de manejo existentes.....	130
4.4.1. Cantidad promedio de panículas (espigas) por metro cuadrado	130
4.4.2. Longitud de panícula (LP, cm)	130
4.4.3. Número de ramificaciones por panícula (RP, ramas/ panícula)	131
4.4.4. Número de granos totales producidos por panícula.....	131
4.4.5. Número de granos cosechados (granos llenos/ panícula)	132
4.4.6. Número de granos vanos por panícula (GV, granos vanos/ panícula).....	133
4.4.7. Peso de 1,000 semillas (granos).....	133
4.4.8. Pureza física de la semilla.....	134
4.4.9. Porcentaje de germinación	134
4.4.10. Rendimiento de grano (g/m ²)	135
4.4.11. Rendimiento de grano (kg/ parcela).....	136
4.4.12. Rendimiento de grano (T/ha)	136
4.4.13. Concentración de nutrientes foliares y su relación con el rendimiento total y rendimiento ajustado del cultivo de arroz.....	137
4.4.14. Análisis de la relación entre NDVI y rendimiento ajustado (t/ha) del cultivo de arroz.....	139

4.4.14.1. Análisis de la distribución y correlación de nutrientes foliares, índices espectrales y rendimiento.....	141
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	145
5.1. Conclusiones	145
5.1.1. Conclusiones asociadas al objetivo específico a.....	145
5.1.2. Conclusiones asociadas al objetivo específico b	146
5.1.3. Conclusiones asociadas al objetivo específico c.....	147
5.1.4. Conclusiones asociadas al objetivo específico d	148
5.2. Recomendaciones.....	149
Referencias Bibliográficas	151
Anexos.....	173

Índice de Cuadros

No.	Descripción	Pág.
Cuadro 1.	Matriz de operacionalización de las variables.	36
Cuadro 2.	Clasificación taxonómica del arroz.	45
Cuadro 3.	Función y síntomas de deficiencia/exceso de nutrientes secundarios y micronutrientes en arroz (<i>Oryza sativa</i> L.).....	50
Cuadro 4.	Principales índices de vegetación utilizados para el diagnóstico nutricional y análisis de vigor en cultivos.	65
Cuadro 5.	Caracterización agronómica y de manejo del cultivo de arroz en las fincas evaluadas (Jima Arriba, Rincón y Las Cabuyas; 2025).	83
Cuadro 6.	Especificaciones técnicas del dron multiespectral DJI Mavic 3M.....	86
Cuadro 7.	Calendario de vuelos RPAS por finca, según fecha de captura (campaña 2025).	89
Cuadro 8.	Programación de vuelos con dron (DDS: días después de la siembra) por etapa fenológica.	90
Cuadro 9.	Propiedades físico-químicas inicial y final de suelos procedentes de tres fincas arroceras ubicadas en Jimá Arriba, Rincón y Las Cabuyas, provincia La Vega, República Dominicana.	98
Cuadro 10.	Parámetros fisicoquímicos del agua de riego en tres fincas arroceras (Jimá Arriba, Rincón y Las Cabuyas), provincia La Vega, República Dominicana.....	102
Cuadro 11.	Índices espectrales satelitales calculados para las fincas de estudio, obtenidos a partir de la plataforma digital EOSDA Crop Monitoring.....	123
Cuadro 12.	Concentración de nutrientes foliares (N, P, K, Ca, Mg y S) en el cultivo de arroz por finca, vuelo y etapa fenológica.	126
Cuadro 13.	Longitud promedio de panícula (cm).....	131
Cuadro 14.	Número promedio de ramificaciones por panícula (RP, ramas/ panícula). .	131
Cuadro 15.	Número promedio de granos totales producidos por panícula.....	132
Cuadro 16.	Número promedio de granos cosechados por panícula (GLL, granos llenos/ panícula)	132
Cuadro 17.	Número promedio de granos vanos por panícula (GV, granos vanos/ panícula)	133
Cuadro 18.	Número promedio de peso de 1000 semillas (granos) (g)	134
Cuadro 19.	Porcentaje de pureza física de la semilla.....	134
Cuadro 20.	Porcentaje de germinación (PG. %).....	134
Cuadro 21.	Rendimiento de grano (g/m ²).....	135

Cuadro 22. Rendimiento de grano (T/ha)	137
Cuadro 23. Rendimiento de grano ajustado (T/ha).....	137
Cuadro 24. Concentración de nutrientes foliares, rendimiento total y rendimiento ajustado del cultivo de arroz.....	138

Índice de Figuras

No.	Descripción	Pág.
Figura 1.	Regionales agropecuarias, según división territorial del Ministerio de Agricultura.....	43
Figura 2.	Etapas fenológicas del cultivo de arroz (<i>Oryza sativa</i> L.).....	52
Figura 3.	Dron agrícola de ala giratoria (multirrotor, hexarrotor) para monitorización y fotografía aérea (Izquierda-arriba); dron DJI Phantom 4 Multispectral (derecha-arriba); dron de alas fijas (izquierda-abajo) y dron híbrido (derecha-abajo).....	55
Figura 4.	Espectro Electromagnético hasta los 6 GHz y las Tecnologías Asociadas.	60
Figura 5.	Sensor multispectral para análisis de cultivos y gestión de vegetación en agricultura de precisión (superior), cámara multispectral DJI Mavic 3M (inferior).	61
Figura 6.	Diferencia entre una cámara tradicional (RGB) con una multispectral (NIR).63	
Figura 7.	Integración de drones y agricultura de precisión.....	71
Figura 8.	Imágenes satelitales de las parcelas objeto de estudio, ubicadas en la provincia La Vega.	81
Figura 9.	Instrumento utilizado para el muestreo de suelo: barreno Edelman.....	84
Figura 10.	DJI Mavic 3 Multispectral y placa de calibración reflectante Micasense utilizada para garantizar la consistencia radiométrica de las imágenes multispectrales.	86
Figura 11.	Planificación de vuelo en plataforma de operación de vuelo DJI Pilot 2 (arriba) y plan de vuelo registrado en Jima Arriba (abajo).	87
Figura 12.	Representación esquemática para la obtención de mapeo de nutrientes en arroz con drones y satélites.....	88
Figura 13.	Ortomosaico RGB (izquierda) y Modelo Digital de Superficie (MDS) (derecha) correspondientes a la etapa vegetativa (macollamiento) del cultivo de arroz (<i>Oryza sativa</i> L.), obtenidos en el vuelo 1 realizado con RPAS en finca Jima Arriba.	104
Figura 14.	Ortomosaico RGB (izquierda) y Modelo Digital de Superficie (MDS) (derecha) correspondientes a la etapa vegetativa (macollamiento) del cultivo de arroz (<i>Oryza sativa</i> L.), obtenidos a partir del vuelo 1 realizado con RPAS en finca Rincón. ..	105
Figura 15.	Ortomosaico RGB (izquierda) y Modelo Digital de Superficie (MDS) (derecha) correspondientes a la etapa vegetativa (embuchamiento) del cultivo de arroz (<i>Oryza sativa</i> L.), obtenidos en el vuelo 1 realizado con RPAS en finca Las Cabuyas....	105
Figura 16.	Ortomosaico RGB (izquierda) y Modelo Digital de Superficie (MDS) (derecha) correspondientes a la etapa reproductiva temprana (embuchamiento) del cultivo de arroz (<i>Oryza sativa</i> L.), obtenidos en el vuelo 2 realizado con RPAS en finca Jima Arriba.....	106

- Figura 17. Ortomosaico RGB (izquierda) y Modelo Digital de Superficie (MDS) (derecha) correspondientes a la etapa reproductiva avanzada (floración (antes)) del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), obtenidos en el vuelo 3 realizado con RPAS en finca Jima Arriba..... 106
- Figura 18. Ortomosaico RGB (izquierda) y Modelo Digital de Superficie (MDS) (derecha) correspondientes a la etapa reproductiva temprana (embuchamiento) del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), obtenidos en el vuelo 2 realizado con RPAS en finca Rincón. 106
- Figura 19. Ortomosaico RGB (izquierda) y Modelo Digital de Superficie (MDS) (derecha) correspondientes a la etapa reproductiva avanzada (floración) del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), obtenidos en el vuelo 3 realizado con RPAS en finca Rincón. 107
- Figura 20. Ortomosaico RGB (izquierda) y Modelo Digital de Superficie (MDS) (derecha) correspondientes a la etapa reproductiva temprana (embuchamiento) del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), obtenidos en el vuelo 2 realizado con RPAS en finca Las Cabuyas. 107
- Figura 21. Ortomosaico RGB (izquierda) y Modelo Digital de Superficie (MDS) (derecha) correspondientes a la etapa reproductiva avanzada (floración (antes)) del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), obtenidos en el vuelo 3 realizado con RPAS en finca Las Cabuyas. 107
- Figura 22. Ortomosaico RGB (izquierda) y Modelo Digital de Superficie (MDS) (derecha) correspondientes a la etapa de maduración (llenado de grano, estado lechoso a pastoso) del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), obtenidos en el vuelo 4 realizado con RPAS en finca Jima Arriba. 108
- Figura 23. Ortomosaico RGB (izquierda) y Modelo Digital de Superficie (MDS) (derecha) correspondientes a la etapa de maduración (llenado de grano, estado lechoso a pastoso) del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), obtenidos en el vuelo 4 realizado con RPAS en finca Rincón..... 108
- Figura 24. Ortomosaico RGB (izquierda) y Modelo Digital de Superficie (MDS) (derecha) correspondientes a la etapa de maduración (llenado de grano, estado lechoso a pastoso) del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), obtenidos en el vuelo 4 realizado con RPAS en finca Las Cabuyas..... 109
- Figura 25. Índices visibles (RGB) de vigor: TGI (*Triangular Greenness Index*) (izquierda) y VARI (*Visible Atmospherically Resistant Index*) (derecha) correspondientes a la etapa vegetativa (macollamiento) del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), obtenidos en el vuelo 1 realizado con RPAS en finca Jima Arriba. 110
- Figura 26. Índices visibles (RGB) de vigor: TGI (*Triangular Greenness Index*) (izquierda) y VARI (*Visible Atmospherically Resistant Index*) (derecha) correspondientes a la etapa fenológica vegetativa (macollamiento) del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), obtenidos en el vuelo 1 realizado con RPAS en finca Rincón. 110
- Figura 27. Índices visibles (RGB) de vigor: TGI (*Triangular Greenness Index*) (izquierda) y VARI (*Visible Atmospherically Resistant Index*) (derecha) correspondientes a la

etapa vegetativa (macollamiento) del cultivo de arroz (<i>Oryza sativa</i> L.), obtenidos en el vuelo 1 realizado con RPAS en finca Las Cabuyas.....	111
Figura 28. Índices visibles (RGB) de vigor: TGI (<i>Triangular Greenness Index</i>) (izquierda) y VARI (<i>Visible Atmospherically Resistant Index</i>) (derecha) correspondientes a la etapa reproductiva temprana (embuchamiento) del cultivo de arroz (<i>Oryza sativa</i> L.), obtenidos en el vuelo 2 realizado con RPAS en finca Jima Arriba.....	112
Figura 29. Índices visibles (RGB) de vigor: TGI (<i>Triangular Greenness Index</i>) (izquierda) y VARI (<i>Visible Atmospherically Resistant Index</i>) (derecha) correspondientes a la etapa reproductiva temprana (embuchamiento) del cultivo de arroz (<i>Oryza sativa</i> L.), obtenidos en el vuelo 2 realizado con RPAS en finca Rincón.	112
Figura 30. Índices visibles (RGB) de vigor: TGI (<i>Triangular Greenness Index</i>) (izquierda) y VARI (<i>Visible Atmospherically Resistant Index</i>) (derecha) correspondientes a la etapa reproductiva temprana (embuchamiento) del cultivo de arroz (<i>Oryza sativa</i> L.), obtenidos en el vuelo 2 realizado con RPAS en finca Las Cabuyas.	113
Figura 31. Índices visibles (RGB) de vigor: TGI (<i>Triangular Greenness Index</i>) (izquierda) y VARI (<i>Visible Atmospherically Resistant Index</i>) (derecha) correspondientes a la etapa reproductiva avanzada (floración, antesis) del cultivo de arroz (<i>Oryza sativa</i> L.), obtenidos en el vuelo 3 realizado con RPAS en finca Jima Arriba.....	114
Figura 32. Índices visibles (RGB) de vigor: TGI (<i>Triangular Greenness Index</i>) (izquierda) y VARI (<i>Visible Atmospherically Resistant Index</i>) (derecha) correspondientes a la etapa reproductiva avanzada (floración) del cultivo de arroz (<i>Oryza sativa</i> L.), obtenidos en el vuelo 3 realizado con RPAS en finca Rincón.	114
Figura 33. Índices visibles (RGB) de vigor: TGI (<i>Triangular Greenness Index</i>) (izquierda) y VARI (<i>Visible Atmospherically Resistant Index</i>) (derecha) correspondientes a la etapa reproductiva avanzada (floración, antesis) del cultivo de arroz (<i>Oryza sativa</i> L.), obtenidos a partir del vuelo 3 realizado con RPAS en finca Las Cabuyas.....	115
Figura 34. Índices visibles (RGB) de vigor: TGI (<i>Triangular Greenness Index</i>) (izquierda) y VARI (<i>Visible Atmospherically Resistant Index</i>) (derecha) correspondientes a la etapa de maduración (llenado de grano, estado lechoso a pastoso) del cultivo de arroz (<i>Oryza sativa</i> L.), obtenidos en el vuelo 4 realizado con RPAS en finca Jima Arriba.	116
Figura 35. Índices visibles (RGB) de vigor: TGI (<i>Triangular Greenness Index</i>) (izquierda) y VARI (<i>Visible Atmospherically Resistant Index</i>) (derecha) correspondientes a la etapa de maduración (llenado de grano, estado lechoso a pastoso) del cultivo de arroz (<i>Oryza sativa</i> L.), obtenidos en el vuelo 4 realizado con RPAS en finca Rincón.	117
Figura 36. Índices visibles (RGB) de vigor: TGI (<i>Triangular Greenness Index</i>) (izquierda) y VARI (<i>Visible Atmospherically Resistant Index</i>) (derecha) correspondientes a la etapa de maduración (llenado de grano, estado lechoso a pastoso) del cultivo de arroz (<i>Oryza sativa</i> L.), obtenidos a partir del vuelo 4 realizado con RPAS en finca Las Cabuyas..	117

Figura 37. Distribución espacial de NDVI (izquierda) y MSAVI (derecha) estimados a partir de imágenes satelitales, como indicadores del verdor y la biomasa del dosel, para la evaluación del vigor del arroz (<i>Oryza sativa</i> L.) en la finca Jima Arriba.	119
Figura 38. Distribución espacial de NDVI (izquierda) y MSAVI (derecha) estimados a partir de imágenes satelitales, como indicadores del verdor y la biomasa del dosel, para la evaluación del vigor del arroz (<i>Oryza sativa</i> L.) en finca Rincón.	119
Figura 39. Distribución espacial de NDVI (izquierda) y MSAVI (derecha) estimados a partir de imágenes satelitales, como indicadores del verdor y la biomasa del dosel, para la evaluación del vigor del arroz (<i>Oryza sativa</i> L.) en finca Las Cabuyas....	120
Figura 40. Distribución espacial de NDRE (izquierda) y RECI (derecha) estimados a partir de imágenes satelitales, como indicadores del contenido relativo de clorofila del dosel, para evaluar el estado fisiológico del arroz (<i>Oryza sativa</i> L.) en finca Jima Arriba.....	121
Figura 41. Distribución espacial de NDRE (izquierda) y RECI (derecha) estimados a partir de imágenes satelitales, como indicadores del contenido relativo de clorofila del dosel, para evaluar el estado fisiológico del arroz (<i>Oryza sativa</i> L.) en finca Rincón.	121
Figura 42. Distribución espacial de NDRE (izquierda) y RECI (derecha) estimados a partir de imágenes satelitales, como indicadores del contenido relativo de clorofila del dosel, para evaluar el estado fisiológico del arroz (<i>Oryza sativa</i> L.) en finca Las Cabuyas.	122
Figura 43. Jima Arriba. Matriz de correlación.....	128
Figura 44. Rincón. Matriz de correlación.	129
Figura 45. Las Cabuyas. Matriz de correlación.	129
Figura 46. Cantidad promediode panículas/ m ² , según finca de estudio.	130
Figura 47. Rendimiento de grano de arroz kg/parcela, según finca de estudio.	136
Figura 48. Jima Arriba. Gráfico de dispersión NDVI vs. rendimiento ajustado (T/ha). 140	
Figura 49. Rincón. Gráfico de dispersión NDVI vs. rendimiento ajustado (T/ha).	140
Figura 50. Las Cabuyas. Gráfico de dispersión NDVI vs. rendimiento ajustado (T/ha).141	
Figura 51. Boxplots de variables numéricas, finca Jima Arriba.	142
Figura 52. Boxplots de variables numéricas, finca Rincón.	143
Figura 53. Boxplots de variables numéricas finca Las Cabuyas.	144
Figura 56. Diagrama de clasificación de suelos y aguas de riego según la relación de adsorción de sodio (RAS) y la conductividad eléctrica (CE).....	182
Figura 57. Aplicación de instrumentos de recolección de datos a los propietarios de las fincas evaluadas (de arriba hacia abajo).	189

Figura 58. Muestreo de suelos y agua de riego antes de la siembra del cultivo. Actividades realizadas y financiadas en el marco del proyecto Fondocyt-IDIAF 2020-2021-3A5-027.	190
Figura 59. Recolección de material vegetal de arroz. posterior al vuelo con el dron. actividad realizada en cuatro etapas fenológicas del cultivo.	190
Figura 60. Recolección de material vegetal de arroz. posterior al vuelo con el dron con el cultivo más avanzado.	191
Figura 61. Vista aérea de finca La Modelo, ubicada en Jima Arriba, Rincón, , prov. La Vega, República Dominicana. Fotografía RGB tomada con un dron DJI Mavic 3 M (2025).	191
Figura 62. Vista aérea de J.P. Pérez, ubicada en Rincón, prov. La Vega, República Dominicana. Fotografía RGB tomada con un dron DJI Mavic 3 M (2025).	192
Figura 63. Vista aérea de finca J.L. Bencosme, ubicada en Las Cabuyas, prov. La Vega, República Dominicana. Fotografía RGB tomada con un dron DJI Mavic 3 M (2025).	192
Figura 64. Último vuelo y recolección de material vegetal para posterior análisis de nutrientes en laboratorio. Estudiantes de agronomía de la UTECO.	193
Figura 65. Recolección de material de cosecha. para determinación de componentes de producción.	194
Figura 66. Marco utilizado en la cosecha del cultivo para determinación de componentes de producción (foto superior-izquierda); separación de espigas de biomasa en material de cosechado (foto superior-derecha); conteo de espigas (foto inferior-izquierda) y determinación de componentes de producción en laboratorio (foto inferior-derecha).	195
Figura 67. Determinación de porcentaje de germinación.	196
Figura 68. Participación en el 2do. Entrenamiento Básico Uso de Drone para Captura de Imágenes Aéreas, realizado el 13 de agosto 2025, en el Salón de Reuniones del Centro Norte, IDIAF y Campus Universitario UCATECI, La Vega, República Dominicana.	196

Índice de Anexos

No.	Descripción	Pág.
Anexo 1.	Formulario diagnóstico para la recolección de la información de manejo del predio agrícola.	173
Anexo 2.	Entrevista sobre el uso de drones en la agricultura: sector arroz.	176
Anexo 3.	Actividades realizadas durante el periodo de estudio.	178
Anexo 4.	Combinación de drones con tecnologías de agricultura de precisión	180
Anexo 5.	Clasificación y recomendación de manejo de la salinidad (tabla 1) y sodicidad (tabla 2) en aguas de riego.....	181
Anexo 6.	Clasificación de suelos y aguas de riego según la relación de adsorción de sodio (RAS) y la conductividad eléctrica (CE). indicando el peligro de sodificación y salinidad para distintas combinaciones de ambos parámetros.	182
Anexo 7.	Análisis estadísticos de los componentes de producción.....	183
Anexo 8.	Banco de imágenes de las actividades realizadas en el marco del estudio “Aplicación de aeronave pilotada remotamente (drone) para el mapeo de nutrientes en arroz (<i>Oryza sativa</i> L.) a escala de fincas”.....	189
Anexo 9.	Representación esquemática de la captura y procesamiento de imágenes RPAS en el cultivo de arroz.	197

Agradecimientos

Expresamos nuestra gratitud a la **Universidad Tecnológica del Cibao Oriental (UTECO)**, por su compromiso con la educación superior en la región y por su labor en la formación de jóvenes talentosos en la carrera de Agronomía a través de la Escuela de Agropecuaria.

Queremos agradecer al **Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (IDIAF)**, por su constante apoyo y por proporcionarnos todas las herramientas necesarias para llevar a cabo esta tesis.

Extendemos nuestro agradecimiento al **Ministerio de Educación Superior, Ciencia y Tecnología (MESCYT)**, a través del **Fondo Nacional de Innovación y Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDOCYT)**, por financiar esta investigación a través del proyecto: "**Utilización de RPAS (*Remotely Piloted Aircraft Systems*) para el mapeo de nutrientes en el cultivo de arroz en República Dominicana (IDIAF-FONDOCYT 2020-2021-3A5-027) (Proyecto RPAS)**".

Agradecemos de manera especial a la **Dra. Glenny Llinee López Rodríguez, Investigadora Principal del proyecto RPAS**, por su acogida, guía, colaboración y acompañamiento en la conducción del ensayo y por gestionar los medios, recursos necesarios para el éxito del mismo. Asimismo, le agradecemos en **Calidad de Asesora**, por su constante presencia, su incondicional apoyo, su orientación durante la realización de esta investigación y sobre todo por ser fuente constante de conocimiento e inspiración. Su ayuda ha sido invaluable.

Damos las gracias al equipo de investigación del proyecto IDIAF-FONDOCYT 2020-2021-3A5-027, especialmente a la **Ing. Leocadia Sánchez, colaboradora del proyecto RPAS y maestra de la UTECO**, por su valiosa colaboración, dedicación y aportes fundamentales que enriquecieron el desarrollo de este trabajo. Su conocimiento y compromiso fueron clave para el éxito de la investigación.

A la **Escuela de Agropecuaria y Facultad de Ingeniería y Recursos Naturales**, en las personalidades de los señores **Lic. Sigfredo Rodríguez e Ing. Juan Antonio Graciano Domínguez**, por ser figuras de admiración y ejemplos a seguir, por impulsarnos

hacia nuestras metas y objetivos. Agradecemos su apoyo y visión favor de este proyecto. También, agradecemos a **Lic. Margaret Reinoso e Ing. Marileysi Jeréz**, por facilitar los procesos administrativos en la Escuela.

Queremos extender nuestro más sincero agradecimiento a los estudiantes que participaron en las evaluaciones, **Priscila Santos, Pamela Santos, Nicol Marte, Luz Isaira Marte**, especialmente a **Rocelys Díaz Caba y Elix Díaz Caba** por su contribución y apoyo durante el proceso de instalación y toma de datos. Su colaboración fue fundamental para alcanzar nuestros objetivos. Gracias por ser parte esencial de esta tesis y por compartir su conocimiento y amistad.

Agradecemos a **JG Agro (Jerson Gómez Agroservicios S.R.L.)**, en la persona del **Ing. Jerson Gómez**, por ser el enlace y guía fundamental en la ubicación de las fincas, facilitando el acceso a las áreas de estudio y su colaboración constante en el desarrollo de este proyecto. Su apoyo ha sido invaluable para la realización de esta investigación.

Agradecemos de una forma muy especial a los productores de las fincas estudiadas **Jesús Padilla (finca La Modelo, Jima Arriba), Juan Pablo Pérez (Factoría La Nueva, finca Rincón) y José Luis Bencosme (finca Las Cabuyas)**, por proporcionarnos el espacio en el que se enfocó este trabajo de investigación, su disposición y amabilidad fue esencial para la realización del mismo. Gracias por su confianza y colaboración.

Las Sustentantes

Dedicatoria

Señor, gracias por darme la vida, por la bendición de cumplir mi más grande sueño, por nunca dejarme en los momentos difíciles, por darme fuerzas para seguir adelante cuando todo se tornaba difícil, por siempre ser mi guía, este logro te lo debo a ti mi Señor.

Agradezco a mis padres **Ramón Vargas Mendoza y Aniberkis José Vásquez**, por su amor y apoyo incondicional, por todos los sacrificios que han hecho para que hoy esto sea posible, por ser el motor que conduce mi vida, por siempre estar cuando más los he necesitado, por siempre instarme a lograr todo lo que me propongo por enseñarme a mantenerme firme en mis metas, ustedes han sido mi pilar y mi inspiración, gracias por siempre apostar a mí, todo esto es por y para ustedes, los amo.

Hermanos **Roberto Vargas José y Haidelis Vargas José**, gracias por siempre apoyarme y ayudarme a ser mejor cada día, por ser quienes me motivan para lograr mis metas y por acompañarme en este y todos mis procesos. Los amo.

Mi amado esposo Jean Carlos Ureña Edua, eres una parte fundamental en mi vida y en todo este trayecto, gracias por tu amor y apoyo incondicional, por ser mi soporte por estar presente en todo momento y circunstancia, te amo.

Tía **Nuris José Vásquez**, gracias por tu apoyo, por ser un ejemplo para mí en todo el sentido de la palabra, gracias por siempre acompañarme y creer en mí.

Crisnélsida Vásquez, Yanibel Báez, María Celeste Paula, Esther coronado, Geneiri Sánchez, Alfredo Coronado, Leoanna Pichardo, Delsire tavera y Adrianny Heredia, amigas que de una forma u otra han sido parte esencial para que hoy este logro sea posible, les agradezco infinitamente.

Mis compañeras **Ramona Morel y Nicol Manzueta**, gracias por el apoyo, la comprensión y el respeto durante este camino, cada desafío y frustración se hizo más fácil de sobrellevar con el apoyo de ustedes.

Dra. Glenny Llinee López Rodríguez, gracias porque siempre ha sido una maestra digna de admiración por su paciencia, dedicación y por el amor que siempre les pone a todos sus proyectos. Gracias por compartir sus conocimientos, por guiarme y motivarme a dar lo mejor.

Johanny Vargas José

Dedicatoria

A **Dios**, por estar presente en cada momento de mi vida, demostrándome que está guiándome en cada paso. Siendo el que me acompaña en cualquier dificultad, gracias por siempre sostenerme.

Mis padres Altagracia Ventura de los Santos y Henry Manzueta, que siempre complementan mi vida, por el gran apoyo a lo largo de este proceso y de mi vida, por todo su sacrificio para mi bienestar. Gracias a ustedes puedo culminar este camino lleno de enseñanzas.

Inoel Nicolas Fernández Ventura y Noeli Altagracia Fernández Ventura, por ser mi gran orgullo, porque siempre puedo contar con su apoyo incondicional, gracias por siempre creer en mí, por verme como su pequeña hermana y demostrarme tanto amor en cada momento.

Máxima de los Santos y Nicolas Ventura, por darme tanto de ustedes sin esperar nada a cambio, por estar cada momento al pendiente, aconsejándome y cuidándome fueron parte de mi motivación en este camino.

Bismairy de León y Emmanuel Coronado, quienes me han demostrado que la familia se extiende más allá de los lazos de sangre. Gracias por su cariño, por su apoyo sincero, por ser parte de este trayecto.

Engel Octavio Ventura Núñez, por ayudarme de manera significativa este camino, aconsejándome y dándome la dirección que muchas veces necesité, por hacer de este trayecto más ligero, gracias poner tu confianza en mí.

Ramona Morel y Johanny Vargas, por brindarme el apoyo que necesité, han hecho de este camino más llevadero, por cada ayuda y cada momento compartido.

A cada una de las personas que contribuyeron de manera única y especial; cada gesto de amor, apoyo y familiaridad han hecho que mi vida sea más bonita, por eso comparto y les dedico este logro, estoy agradecida con Dios por permitirme tenerlos en mi vida.

Nicol Manzueta Ventura

Dedicatoria

Porque en tus planes **Mi Dios**, no hay fallo alguno, gracias por sostenerme cuando más lo necesite, por darme la fortaleza para culminar este proyecto y por mostrarme la luz cuando yo solo veía oscuridad. Gracias **Señor** por no dejarme sola en ningún momento.

Juana Vásquez Álvarez, mami eres el motor que mueve mi vida y la razón por la que me esfuerzo cada día, por ser una madre excepcional, dedicada y sobre todo por amarme de la manera en que lo haces, este y todos mis logros son tuyos, te amo.

Santiago Morel Fabián, papi eres mi roca, mi cable a tierra y mi héroe personal, por ser mi guía, por mostrarme que yo sí puedo, pero más importante, por tu infinito amor. Gracias por todos los sacrificios que has hecho para que yo pueda sostener mi título universitario. Este y todos mis logros son tuyos, te amo.

A mi prima-hermana Emily Altagracia Fabián, por ser mi apoyo incondicional, por ser mi refugio cuando las cosas se ponen difíciles, por ser mi mejor amiga y mi más fiel confidente, porque aun en la distancia fuiste parte fundamental en este proceso, por siempre creer en mí, te quiero infinitamente.

Cesarina, Yonairy, Crismeiry y Alfredo, por apoyarme en todos los procesos, por creer en mí y por darme fuerzas aún sin saberlo, por acompañarme durante este camino y por hacer más liviana mi carga cuando más lo necesite. Los quiero.

María Celeste, Carina, Leoanna, Biqui y Taneirys, por acompañarme en el camino académico y por brindarme su cariño, apoyo y amistad, las aprecio.

Johanny Vargas y Nicol Manzueta, por ser parte clave en la realización de este proyecto, por ser mis soportes y por nunca dudar de que seríamos capaces de salir victoriosas en este escalón que nos conduce al éxito, las aprecio y las admiro.

Por último, pero no menos importante quiero dedicarme este logro **a mí**, por aguantar los trasnochos, los momentos de estrés y tensión, porque gracias a mi deseo de superación estoy hoy aquí, a mi cuerpo por soportar y a mi mente por persistir, por sacar fuerzas de donde no las había para continuar y cumplir con mi propósito, a todos mis sacrificios, a todas mis debilidades y fortalezas, me dedico esto a mi.

Ramona Morel Vásquez

REPÚBLICA DOMINICANA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DEL CIBAO ORIENTAL
Facultad de Ingeniería y Recursos Naturales
Escuela de Agropecuaria



Resumen

Título: Aplicación de una aeronave pilotada remotamente (drone) para el mapeo de nutrientes en arroz (*Oryza sativa* L.) a escala de fincas

Sustentantes: Johanny Vargas José, Nicol Manzueta Ventura y Ramona Morel Vásquez

Asesora: Dra. Glenney Llinee López Rodríguez

Este estudio evaluó la utilidad de integrar teledetección de alta resolución mediante aeronaves pilotadas remotamente (RPAS) y monitoreo satelital para caracterizar la variabilidad del cultivo de arroz bajo condiciones reales de manejo en tres fincas de la provincia de La Vega, con el fin de mejorar el diagnóstico agronómico y la toma de decisiones basada en evidencia. El objetivo general fue analizar imágenes RPAS y satelitales en arroz (*Oryza sativa* L.), considerando las condiciones edafológicas y el estado nutricional foliar, para interpretar la dinámica espacial y temporal del dosel y su relación con la nutrición y el desempeño productivo. La metodología se estructuró en cuatro componentes: (i) caracterización físico-química de suelos (muestreo inicial y final) y del agua de riego en Jima Arriba, Rincón y Las Cabuyas; (ii) adquisición multitemporal de imágenes RPAS en etapas fenológicas contrastantes para generar ortomosaicos RGB y modelos digitales de superficie (MDS), y derivar índices visibles de vigor para evaluar variabilidad intra-parcela; (iii) extracción y análisis de series de índices satelitales mediante EOSDA Crop Monitoring, incluyendo índices de verdor/biomasa e índices asociados a red-edge/clorofila; y (iv) análisis integrado de índices espectrales con nutrientes foliares (N, P, K, Ca, Mg y S), nutrientes edáficos y componentes de producción. Los resultados indicaron que la variabilidad intra-parcela y entre fincas se asoció principalmente con un contexto edáfico contrastante (reacción del suelo, sales solubles y disponibilidad relativa de macronutrientes), mientras que el agua de riego se mantuvo, en general, dentro de condiciones compatibles con bajo riesgo inmediato de salinidad y sodicidad bajo manejo adecuado. Los productos RPAS evidenciaron heterogeneidad espacial desde fases tempranas y los índices visibles describieron una dinámica fenológica consistente, con incremento del vigor hacia la fase reproductiva y disminución en maduración asociada a senescencia. Los índices satelitales, especialmente los basados en red-edge/clorofila, resaltaron patrones de heterogeneidad y mostraron asociaciones con nutrientes foliares dependientes de finca y etapa, confirmando que la relación índice–nutriente–rendimiento no es universal y requiere interpretación contextual. En consecuencia, se recomienda implementar manejo de fertilidad diferenciado por finca, mantener monitoreo periódico de sales y sodio, estandarizar el protocolo de vuelo y procesamiento RPAS (metadatos y control de calidad), sincronizar temporalmente imagen y muestreo, usar mapas para verificación dirigida en campo y desarrollar criterios o modelos locales de interpretación espectral calibrados por finca.

Palabras claves: Agricultura 4.0, mapeo de nutrientes, RPAS, DJI Mavic 3M; imágenes RGB .

CAPITULO I: MARCO INTRODUCTORIO

En este capítulo se establecen los fundamentos principales que sustentan el presente trabajo de investigación, abordando aspectos introductorios, así como también, antecedentes, justificación, planteamiento del problema, objetivos generales y específicos, hipótesis y la definición de términos.

1.1. Introducción

La **teledetección con drones (RPAS/UAV) equipados con sensores multiespectrales** se ha consolidado como una tecnología clave de la agricultura de precisión para monitorear cultivos con alta resolución espacial y temporal, especialmente cuando integra bandas visibles, *red edge* y NIR para el mapeo agronómico y la toma de decisiones de manejo. (Carracelas et al., 2024; Agrawal et al., 2024). En este marco, la intensificación agrícola global y el aumento sostenido en la demanda de alimentos han elevado la presión sobre cereales básicos como el arroz, cuya producción debe incrementarse aproximadamente un **25 % hacia 2050** para sostener la seguridad alimentaria. (FAO, 2021). El arroz (*Oryza sativa* L.) es esencial para la seguridad alimentaria en regiones tropicales y subtropicales, y su **manejo nutricional** condiciona el rendimiento, la calidad del grano y la eficiencia en el uso de insumos (Carracelas *et al.*, 2024).

La **eficiencia del uso de fertilizantes** es hoy un eje crítico, considerando que el sector agrícola utiliza más del **60%** de los fertilizantes nitrogenados producidos a escala global y, al mismo tiempo, contribuye a pérdidas ambientales relevantes, como emisiones de óxidos de nitrógeno y lixiviación de nitratos (Lassaletta *et al.*, 2023). En América Latina, el arroz mantiene un rol estratégico como alimento básico y fuente de ingresos, con Brasil como principal productor regional, seguido por Perú, Ecuador, Colombia, República Dominicana y Cuba (FAO, 2023b). No obstante, los sistemas arroceros de la región enfrentan limitaciones asociadas a la baja eficiencia de fertilización, prácticas de riego ineficientes, presión sobre el recurso hídrico y problemas de degradación del suelo. (Barrera *et al.*, 2022). Tradicionalmente, el diagnóstico del estado nutricional se apoya en muestreos y mediciones puntuales (p. ej., análisis de tejido o SPAD), métodos precisos pero costosos y poco representativos de la variabilidad espacial a escala de finca (Xu *et al.*,

2023). Frente a ello, la adopción de **tecnologías emergentes** como la teledetección con drones se plantea como una estrategia para monitorear y optimizar la nutrición del cultivo con mayor oportunidad, contribuyendo a mejorar productividad y reducir impactos ambientales. (Guebsi *et al.*, 2024).

La agricultura de precisión incorpora tecnologías de teledetección y sistemas de información espacial para caracterizar la heterogeneidad espacial y temporal de los cultivos, con el objetivo de optimizar decisiones de manejo (fertilización, riego, control de plagas) reduciendo costos y externalidades ambientales (Guebsi *et al.*, 2024). En este marco, los sistemas de aeronaves pilotadas remotamente (RPAS o UAV, por sus siglas en inglés), comúnmente conocidos como drones, han demostrado ser herramientas eficaces, no solo para el monitoreo continuo y a tiempo real del cultivo, sino también para muestreo de suelo y foliar y se posicionan como plataformas accesibles y de alta resolución espacial y temporal para el mapeo agronómico, especialmente cuando se equipan con sensores multiespectrales que incluyen bandas visibles, red edge y NIR (Carracelas *et al.*, 2024; Agrawal *et al.*, 2024). En conjunto, la agricultura de precisión integra teledetección e información espacial para caracterizar la heterogeneidad espacio-temporal del cultivo y optimizar decisiones de manejo (fertilización, riego y sanidad), reduciendo costos y externalidades (Guebsi *et al.*, 2024).

1.2. Antecedentes

Investigaciones recientes confirman que la integración de índices derivados de UAV con datos de campo mejora notablemente la precisión en la prescripción de fertilizantes de tasa variable, contribuyendo a aumentar los rendimientos y reducir pérdidas de nitrógeno (Qiu *et al.*, 2025). Estos hallazgos han sentado las bases para la transferencia de metodologías hacia otras regiones productoras.

En el plano regional asiático, donde se concentra más del 90 % de la producción y consumo mundial de arroz, el uso de drones multiespectrales y modelos de aprendizaje automático ha demostrado alta eficacia para estimar parámetros biofísicos del cultivo, tales como el contenido de clorofila, nitrógeno foliar y biomasa (Wang *et al.*, 2025a). En Asia, especialmente en países como Filipinas, se han implementado sistemas con drones para monitorear arroz (mapeo de nutrientes y malezas) y mejorar la productividad con enfoque

de precisión. En China, estudios han combinado RPAS y redes neuronales profundas para clasificar deficiencias nutricionales mediante la fusión de índices espectrales y rasgos de imagen, reportando exactitudes superiores al 95 % (Chen *et al.*, 2025).

En China, Qiu *et al.* (2025) desarrollaron modelos que integran índices de vegetación derivados de UAV con variables meteorológicas y de fertilización para estimar el índice de nutrición de nitrógeno (NNI) en arroz, alcanzando valores de validación de R^2 entre 0.94 y 0.95 con modelos de tipo Random Forest (RF).

En Malasia, Mohidem *et al.* (2024) aplicó la integración de UAV multiespectrales para determinar concentración de clorofila en arroz mediante índices de vegetación, lo que permite inferir estado nutricional del cultivo.

En Europa, países con zonas productoras de arroz como Italia, Francia y Grecia están adoptando herramientas precisas de agricultura de precisión incluyendo RPAS para mejorar la eficiencia en la producción de arroz, con incrementos de rendimiento estimados entre 20-35% gracias al uso de drones para actividades como mapeo y monitoreo (Matese *et al.*, 2013; Candiago *et al.*, 2015; Bautista *et al.*, 2024; Quispe-Tito, 2024). También, se están usando tecnologías de teledetección y aprendizaje automático para evaluar la salud del suelo a nivel regional en Latinoamérica y el Caribe, lo que aporta indicadores valiosos para la gestión de nutrientes en cultivos (Castañeda-Íbáñez *et al.*, 2018). Se destaca el uso de RPAS en el Perú para la medición precisa de evapotranspiración en arrozales, lo que contribuye a optimizar el uso del agua en el cultivo de arroz (Fonseca-Salazar *et al.*, 2012; Heros-Aguilar, 2023).

Estudios recientes en países como Brasil, México y Colombia han demostrado que los drones multiespectrales permiten generar mapas de vigor y de estado nutricional en arroz, maíz y caña de azúcar, correlacionados con indicadores de nitrógeno y clorofila (Carracelas *et al.*, 2024). Además, iniciativas regionales promovidas por la FAO, el IICA y el CIAT buscan fomentar el uso de sensores remotos y plataformas UAV para la gestión integrada de nutrientes y agua en cultivos estratégicos (Palacios-Lopez, 2024; Bert, 2024; FAO, 2025).

En Brasil, el uso de drones para la aplicación localizada de agroquímicos, monitoreo de estado vegetativo, conteo de plantas y detección de malezas es una tendencia creciente, con estudios que confirman la eficacia para mejorar la productividad y reducir costos agronómicos (Coelho-Eugenio *et al.*, 2020; Coelho-Eugenio *et al.*, 2021; Lima *et al.*, 2023). Otros de los avances de Brasil, ha sido el uso de RPAS con sensores RGB y multiespectrales para la monitoreo de cultivos ha ido creciendo con soporte de algoritmos de aprendizaje automático que permiten análisis precisos para control de plagas, evaluaciones de rendimiento y manejo eficiente (Fantinel *et al.*, 2025; Alexandre *et al.*, 2025). Fantinel *et al.* (2025) en su artículo analiza el uso de aeronaves remotamente pilotadas (RPAS) en el conteo de especies agrícolas y forestales, destacando su eficacia en el monitoreo de la biodiversidad y la gestión de cultivos.

En 2022, la Universidad Federal de Santa María publicó una investigación sobre la aplicación de imágenes multiespectrales de alta resolución y técnicas de aprendizaje profundo para la identificación y conteo de especies forestales, demostrando el potencial de estas tecnologías en la gestión forestal, así como también, trabajos sobre plagas y enfermedades en plantaciones forestales (Duarte *et al.*, 2022).

Eugênio *et al.* (2020), evaluaron la utilización de imágenes multiespectrales obtenidas mediante aeronaves pilotadas remotamente (RPAS) combinadas con técnicas de aprendizaje automático para estimar el rendimiento del cultivo de soja. Los autores demostraron que la integración de datos multiespectrales con modelos predictivos basados en machine learning permite una estimación más precisa del rendimiento en comparación con métodos convencionales, ofreciendo una herramienta valiosa para la agricultura de precisión. Este enfoque no solo facilita la toma de decisiones agronómicas más informadas, sino que también optimiza el uso de recursos como agua y fertilizantes, contribuyendo a la sostenibilidad y eficiencia de la producción de soja.

En México, diversos estudios han evidenciado la aplicación de drones en la agricultura, destacando su potencial en la mejora de la productividad y sostenibilidad del sector (Godoy-Navarro, 2023; Pérez-Ramírez, 2025; Medranda y Solórzano, 2025). A continuación, se presentan algunos de los más relevantes:

Aranda-Bastida (2021) analizó cómo los drones se integran en el sector agropecuario del Valle del Mezquital, Estado de Hidalgo, enfocándose en su uso para el monitoreo de cultivos y la mejora de prácticas agrícolas sostenibles.

Terán-Varela *et al.* (2018) exploraron el uso de drones para el monitoreo geodemográfico en el sector agrícola del municipio de Ayapango, destacando su utilidad en la recopilación de datos espaciales para la planificación agrícola.

En un estudio realizado por Mosquera *et al.* (2015), se exploró el uso de drones equipados con sensores multiespectrales para el monitoreo de cultivos de papa en Cundinamarca, Colombia. A través del análisis de imágenes en el espectro del infrarrojo cercano (NIR), fue posible detectar variaciones en el estado vegetativo del cultivo, evidenciando el potencial de los sistemas de aeronaves pilotadas remotamente (RPAS) como herramienta de agricultura de precisión. De acuerdo a sus resultados, esta metodología es extrapolable a otros cultivos, como el arroz, para fines como el mapeo de nutrientes a escala de finca.

En la República Dominicana, el uso de drones en la agricultura ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años, respaldado por iniciativas institucionales, avances tecnológicos y aplicaciones prácticas en diversos cultivos. A continuación, se presentan algunos estudios y proyectos destacados que evidencian esta tendencia:

En 2024, Mota-Galán *et al.*, desarrollaron modelos predictivos basados en imágenes multiespectrales de alta resolución, utilizando algoritmos de aprendizaje automático para estimar indirectamente seis nutrientes esenciales en las hojas del cultivo de arroz bajo riego: nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S). La adquisición de imágenes se realizó mediante el dron DJI Mavic Multispectral®, cubriendo cuatro etapas fenológicas críticas del cultivo. A partir de las bandas espectrales obtenidas, se calcularon ocho índices de vegetación que sirvieron como predictores de las variables nutricionales, complementadas con mediciones *in situ*. Los análisis mediante la correlación de Spearman evidenciaron que la relación más fuerte entre los predictores y los nutrientes se presentó al final de la etapa vegetativa (V7). Asimismo, la aplicación de Redes Neuronales Artificiales (RNA) mostró un alto grado de ajuste y

capacidad de generalización, lo que confirma la eficacia de combinar la teledetección mediante RPAS con algoritmos de aprendizaje automático para la agricultura de precisión.

Estos hallazgos destacan el potencial de las imágenes multispectrales y la inteligencia artificial para optimizar la gestión de nutrientes en el cultivo de arroz bajo condiciones de riego (Mota-Galán *et al.*, 2024).

Un estudio realizado por la Universidad UNAPEC evaluó la viabilidad de utilizar drones en la agricultura dominicana. Realizaron una investigación donde analizaron la viabilidad de implementar drones en el cultivo de berenjena, con el propósito de maximizar la producción y cumplir con las normas internacionales de seguridad alimentaria ya que ésta hortaliza es altamente demandada en mercados de Estados Unidos, Canadá y Centro América. El análisis concluyó que la implementación de drones es legalmente viable en el país y puede tener un impacto positivo en los procesos agrícolas, mejorando la eficiencia y sostenibilidad de la producción (Güílamo *et al.*, 2018).

Martínez (2024), ha documentado aplicaciones prácticas en cultivos específicos, como por ejemplo, en San José de Ocoa, región destacada por la producción de tomates y pimientos, se ha implementado el uso de drones para la fumigación en invernaderos. Esta tecnología permite una aplicación más uniforme de pesticidas, disminuyendo la exposición directa de los trabajadores a químicos y reduciendo los costos operacionales, lo que contribuye a una agricultura más segura y eficiente. Asimismo, en cultivos de caña y tomate, los drones han demostrado su eficacia para la aspersión de agroquímicos, optimizando el uso de agua y fertilizantes y promoviendo prácticas agrícolas más sostenibles (Castro *et al.*, 2025).

Desde 2022 un equipo de investigadores del Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (IDIAF) desarrolla estudios sobre la utilización de sistemas de aeronaves pilotadas remotamente (RPAS) para el mapeo de nutrientes en el cultivo de arroz, para la optimización la gestión agronómica y nutricional de este cultivo a escala de finca. Esto indica que el país está consolidando un entorno innovador para la aplicación de drones en la agricultura, respaldado por apoyo institucional, capacitación especializada y avances tecnológicos, promoviendo una producción agrícola más eficiente y sostenible, en el sector arroz (López-Rodríguez *et al.*, 2024).

1.3. Planteamiento del problema

El arroz constituye uno de los cultivos más importantes de la República Dominicana, tanto por su valor estratégico en la seguridad alimentaria como por su peso en la economía nacional (IICA, 2017). Es el alimento básico de mayor consumo en la dieta dominicana, con una demanda estimada de 15.2 millones de quintales, equivalentes a aproximadamente 689,500 toneladas métricas, mientras que la producción local se sitúa en 14.7 millones de quintales, es decir, unas 666,800 toneladas métricas (Alvarado, 2024). Esto evidencia una diferencia de alrededor de 22,700 toneladas métricas entre la producción estimada y la alcanzada localmente, lo que refleja que, aunque el país es altamente productivo, enfrenta un crecimiento acelerado de la demanda.

Desde el punto de vista económico, el arroz en cáscara representó aproximadamente un 9 % del valor de la producción agrícola nacional en 2024, con un valor de producción superior a RD\$29,000 millones al precio de productor (Delgado, 2025). Este aporte lo convierte en uno de los principales rubros del sector agrícola y en una fuente de ingresos clave para miles de productores, principalmente pequeños agricultores que dependen de este cultivo para su sustento y estabilidad económica (IICA, 2023). En otro aspecto, la importancia social del arroz se refleja en que su cultivo genera alrededor de 300 mil empleos directos e indirectos, dinamizando las economías rurales, además de contribuir a la estabilidad de precios de la canasta básica y al poder adquisitivo de la población (Brea-Baldera, 2024). No obstante, el sector enfrenta vulnerabilidades como sequías recurrentes, presión de importaciones en el marco del DR-CAFTA, costos de insumos y producción, y la necesidad de modernización tecnológica para mantener su competitividad (Alvarado, 2023; De la Cruz, 2023; Santos, 2024).

El arroz es un cultivo estratégico para la seguridad alimentaria en la República Dominicana, siendo la Región Norcentral parte fundamental. Su producción constituye una de las actividades agrícolas más relevantes para el desarrollo económico local (Durán, 2022). Sin embargo, uno de los principales desafíos en la producción arrocer a escala de finca es la gestión eficiente de nutrientes en el suelo, lo que limita la productividad y sostenibilidad del cultivo (FAO, 2021; Contreras-Reyes, 2025).

De acuerdo a Acosta-Bohorquez (2021), el uso excesivo de fertilizantes puede provocar escorrentía de nutrientes, lo que causa contaminación del agua y proliferación de algas en los ecosistemas acuáticos. Esta homogeneidad en la aplicación de insumos genera pérdidas económicas para el productor y aumenta el riesgo de contaminación de los recursos hídricos y atmosféricos por lixiviación o volatilización de nutrientes, principalmente nitrógeno (Daza *et al.*, 2015). Los métodos convencionales de monitoreo nutricional, como los muestreos de suelo y análisis de laboratorio, aunque fiables, presentan limitaciones en términos de representatividad espacial, costos y tiempos de respuesta. Esto impide que los productores adopten un manejo de precisión en sus fincas, lo que conduce a una aplicación homogénea de insumos en suelos heterogéneos (Carracelas *et al.*, 2024).

En términos de innovación, el país ha avanzado en la incorporación de tecnologías que buscan mejorar el rendimiento y la eficiencia de la producción. La introducción de variedades mejoradas, algunas desarrolladas en cooperación internacional, ha permitido incrementos de productividad y reducción de costos, fortaleciendo la capacidad del país para mantener su autosuficiencia arrocerá (Ministerio de Agricultura, 2019; Adames-Farías, 2020).

En este contexto, Silva (2023); Onofre *et al.* (2025), señala que, los Sistemas de Aeronaves Pilotadas Remotamente (RPAS) o drones han demostrado ser herramientas innovadoras en la agricultura de precisión, ya que permiten generar mapas multiespectrales de vigor y deficiencia nutricional de manera rápida, precisa y con mayor cobertura espacial. Investigaciones recientes han validado índices de vegetación como el SCCCI y el NDRE obtenidos mediante RPAS para evaluar el estado nutricional del arroz bajo diferentes regímenes de riego (Carracelas *et al.*, 2024). En consecuencia, se requiere desarrollar investigaciones que integren el uso de sistemas de aeronaves pilotadas remotamente (RPAS) con el análisis de nutrientes foliares y edáficos bajo condiciones reales de finca, considerando la variabilidad espacial y temporal del cultivo de arroz. Este estudio busca validar los RPAS como herramienta de diagnóstico nutricional y generar evidencia técnica para establecer protocolos de manejo más eficientes, precisos y sostenibles. Por lo que, se pretende reducir el uso excesivo de fertilizantes, mejorar la productividad y fortalecer la

sostenibilidad agrícola en la provincia de La Vega. A partir de estas problemáticas se formulan las siguientes preguntas de investigación:

- a) ¿Existen diferencias en los parámetros físico-químicos de los suelos (inicial y final) y del agua de riego entre las fincas de arroz ubicadas en Jima Arriba, Rincón y Las Cabuyas?
- b) ¿Cómo varían los índices de vegetación derivados de imágenes RGB capturadas mediante RPAS a lo largo de las distintas etapas fenológicas del cultivo de arroz?
- c) ¿Qué relación existe entre las imágenes obtenidas mediante RPAS, imágenes satelitales y niveles de nutrientes foliares y edáficos del cultivo de arroz en las fincas de estudio?
- d) ¿Cómo se comportan los componentes de producción del cultivo de arroz y de qué manera contribuyen a la caracterización del rendimiento bajo las condiciones de manejo existentes en las fincas de estudio?

1.4. Justificación

El arroz es uno de los cultivos más importantes a nivel mundial y en la República Dominicana. Sin embargo, de acuerdo a Medina-Litardo *et al.* (2023) la variabilidad en la disponibilidad de nutrientes y agua en los suelos agrícolas puede afectar significativamente su rendimiento y calidad. La evaluación precisa de las propiedades físico-químicas de los suelos y las fuentes de agua es esencial para comprender estas variaciones y tomar decisiones informadas sobre el manejo agronómico (Abaca, 2024). En este contexto, el uso de sistemas de aeronaves pilotadas remotamente (RPAS) ha emergido como una herramienta clave en la agricultura de precisión, permitiendo una gestión más eficiente y sostenible de los cultivos (Yumnam *et al.*, 2025).

La captura y procesamiento de imágenes multiespectrales mediante RPAS en distintas etapas fenológicas permite generar mapas de variabilidad nutricional a nivel de parcela, los cuales facilitan la aplicación localizada de insumos y promueven una agricultura más eficiente y sostenible (Arredondo-Valdez, 2022; Carrillo-Montoya, 2024).

La validación del uso de RPAS para el mapeo nutricional del arroz permitirá escalar esta tecnología a otros cultivos extensivos y robustecer los programas de extensión y asistencia técnica basados en información geoespacial. Al generar insumos para una gestión más precisa y eficiente de los nutrientes, el estudio aporta conocimiento técnico-científico relevante y contribuye al cumplimiento de los **Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)** (Naciones Unidas, 2015). Desde una perspectiva sistémica, esta investigación se articula con los **ODS 2 (Hambre Cero)**, **ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura)**, **ODS 12 (Producción y Consumo Responsables)**, **ODS 13 (Acción por el clima)** y **ODS 15 (Vida de ecosistemas terrestres)**, porque combina productividad agrícola, innovación tecnológica, eficiencia en el uso de insumos, mitigación climática y conservación del suelo. En el contexto dominicano y particularmente en fincas arroceras de La Vega, la aplicación de RPAS para mapeo nutricional constituye una herramienta estratégica para avanzar hacia una agricultura coherente con la Agenda 2030.

El propósito de esta investigación es fortalecer la toma de decisiones en el manejo nutricional del cultivo de arroz a escala de finca en la provincia La Vega, mediante el uso de información generada a partir del análisis de imágenes obtenidas con sistemas de aeronaves pilotadas remotamente (RPAS-dron) y/o satélite y su articulación con los niveles de nutrientes foliares y edáficos. Por lo que, se articula con la **Estrategia Nacional de Desarrollo 2030**, que prioriza una agricultura sostenible, inclusiva y resiliente orientada a la seguridad alimentaria y a la competitividad del sector agropecuario (**Ley 1-12**, Mepyd, 2012). De igual forma, responde a los lineamientos del Ministerio de Agricultura, enfocados en la modernización productiva mediante tecnologías innovadoras, que promueven prácticas agrícolas sostenibles para la conservación de los recursos naturales (Ministerio de Medio Ambiente, 2021). Asimismo, la OPS y la FAO inscribe el enfoque de **Una Sola Salud**, al reconocer la interdependencia entre salud humana, animal y ambiental, y contribuir a la reducción de riesgos vinculados con la nutrición de los cultivos y la seguridad alimentaria (Organización Panamericana de la Salud, 2025; FAO, 2023a).

1.5. Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Analizar imágenes obtenidas mediante un sistema de aeronave pilotadas remotamente (RPAS/dron) e imágenes satelitales en el cultivo de arroz, considerando las condiciones edafológicas y el estado nutricional foliar, a escala de fincas en la provincia La Vega.

1.5.2 Objetivos específicos

- a) Determinar los parámetros físico-químicos de los suelos (muestreo inicial y final) y del agua de riego en tres fincas arroceras ubicadas en Jima Arriba, Rincón y Las Cabuyas.
- b) Capturar imágenes mediante RPAS en distintas etapas fenológicas del cultivo de arroz, para generación y procesamiento de ortomosaicos RGB y la derivación de índices visibles (RGB) de vigor, orientados a la variabilidad intra-parcela.
- c) Analizar la relación entre los índices espectrales derivados de imágenes obtenidas mediante RPAS e imágenes satelitales (*EOSDA Crop Monitoring*) y los niveles de nutrientes foliares del cultivo de arroz.
- d) Evaluar la relación entre los índices espectrales derivados de RPAS, los nutrientes foliares y edáficos, y los componentes de producción, para la caracterización del rendimiento del cultivo de arroz bajo las condiciones de manejo existentes.

1.6. Operacionalización de las variables

El Cuadro 1 presenta la matriz de operacionalización de las variables de estudio en la que se detallan los objetivos específicos, las variables involucradas, sus dimensiones, los indicadores que permiten medirlas, las unidades de medida empleadas y los instrumentos o métodos de recolección de datos correspondientes.

Cuadro 1. Matriz de operacionalización de las variables.

Objetivo específico	Variable	Indicadores	Técnica / procedimiento
a) Determinar los parámetros físico-químicos de suelos (muestreo inicial y final) y del agua de riego en tres fincas de arroz ubicadas en Jima Arriba, Rincón y Las Cabuyas.	Suelo: parámetros físico-químicos (inicial vs. final).	pH, CE, textura, MO, CIC, N, P, K, Ca, Mg, Na, otros.	Muestreo de suelo inicial y final por finca; protocolo de laboratorio; registro de ID, fecha y localización; control de calidad y consolidación en base de datos.
	Agua de riego: calidad físico-química.	pH, CE, TDS, dureza, Na ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ , CO ₃ , salinidad, sodicidad (RAS o SAR).	Muestreo de agua por finca; análisis de laboratorio; registro de fecha, punto de toma y condiciones; consolidación de resultados.
b) Capturar imágenes mediante RPAS en distintas etapas fenológicas del cultivo de arroz, para generación y procesamiento de ortomosaicos RGB y la derivación de índices visibles (RGB) de vigor, orientados a la variabilidad intra-parcela.	Etapas fenológicas.	Días después de siembra (DDS) por vuelo; fase (vegetativa–reproductiva–maduración).	Cálculo DDS = fecha_vuelo – fecha_siembra; clasificación por fases de crecimiento del arroz.
	Productos fotogramétrico RGB por etapa fenológica.	Ortomosaico RGB por vuelo, modelo de elevación por vuelo (DMS); solape.	Procesamiento fotogramétrico (alineación → nube densa → ortorrectificación → ortomosaico) y control de calidad del producto.
	Índices visibles (RGB) de vigor	Mapas temáticos de TGI (<i>Triangular Greenness Index</i>) y VARI (<i>Visible Atmospherically Resistant Index</i>)	Cálculo de índices visibles de vigor sobre ortomosaico RGB; VARI (<i>Visible Atmospherically Resistant Index</i>) y TGI (<i>Triangular Greenness Index</i>).
c) Analizar la relación entre los índices espectrales derivados de imágenes obtenidas mediante RPAS e imágenes satelitales (EOSDA Crop Monitoring) y los niveles de nutrientes foliares del cultivo de arroz.	Índices satelitales (EOSDA).	Índices asociados al verdor y biomasa del dosel: NDVI y MSAVI; Índices asociados al contenido relativo de clorofila del dosel: NDRE y RECI.	Consulta y descarga de índices satelitales en el software <i>EOSDA Crop Monitoring</i> ; extracción zonal o puntual para fechas cercanas a cada vuelo/muestreo.
	Nutrientes foliares (respuesta).	N, P, K, Ca, Mg, S por vuelo/finca.	Muestreo foliar coincidente con cada vuelo; análisis de laboratorio; base de datos por finca–fecha–etapa.
	Relación espectral (RGB)–nutricional.	r; R ² ; RMSE; p-valor	Análisis de correlación (Pearson o Spearman) y regresión simple; análisis global y por etapa fenológica
	Relación EOSDA ↔ nutrientes foliares	r; R ² ; RMSE; p-valor	Correlación entre índices EOSDA y nutrientes foliares por fecha; análisis estratificado por etapa fenológica.
d) Evaluar la relación entre los índices espectrales derivados de RPAS, los nutrientes foliares y edáficos, y los componentes de producción, para la caracterización del rendimiento del cultivo de arroz bajo las condiciones de manejo existentes.	Componentes de producción.	Panículas/m ² , longitud de panícula, número de ramificaciones/ panícula, granos totales, llenos y vanos, peso de 1000 granos, pureza física y % de germinación.	Muestreo destructivo: Cosecha, conteos, trilla; pesajes; corrección por humedad.
	Rendimiento del cultivo.	g/m ² y kg /parcela, t/ha, rendimiento ajustado con humedad del grano.	
	Relación espectral (RGB y Satelital)-nutricional-productiva	r; R ² ; RMSE	Análisis de correlación entre índices espectrales, nutrientes y componentes de producción.

Fuente: Elaboración propia, 2025.

1.7. Hipótesis

Con base en tu estudio sobre “Aplicación de sistema de Aeronave Pilotada Remotamente (dron) para el mapeo de nutrientes en arroz a escala de fincas en la región Norcentral”, se plantean las siguientes:

1.7.1. H_1 (Hipótesis general)

Las imágenes obtenidas mediante RPAS y plataformas satelitales permiten caracterizar de manera significativa la variabilidad espacial del cultivo de arroz a escala de finca, en función de las condiciones edafológicas y del estado nutricional foliar, en la provincia de La Vega.

1.7.2. H_0 (Hipótesis nula general)

Las imágenes obtenidas mediante RPAS y plataformas satelitales no permiten caracterizar de manera significativa la variabilidad espacial del cultivo de arroz en función de las condiciones edafológicas y del estado nutricional foliar a escala de finca.

1.7.3. Hipótesis específicas

H_{1a} : Existen diferencias espaciales y temporales en los parámetros físico-químicos del suelo y del agua de riego entre las fincas de arroz de Jima Arriba, Rincón y Las Cabuyas, que influyen en el desarrollo del cultivo.

H_{0a} : No existen diferencias espaciales ni temporales en los parámetros físico-químicos del suelo y del agua de riego entre las fincas evaluadas.

H_{1b} : Los ortomosaicos RGB generados a partir de imágenes capturadas mediante RPAS en distintas etapas fenológicas permiten derivar índices visibles (RGB) de vigor que cuantifican y mapean la variabilidad intra-parcela del cultivo de arroz.

H_{0b} : Los ortomosaicos RGB generados a partir de imágenes capturadas mediante RPAS no permiten derivar índices visibles (RGB) de vigor que cuantifiquen la variabilidad intra-parcela del cultivo de arroz.

H_{1c} : Existe una relación significativa entre los índices derivados de imágenes RPAS e imágenes satelitales y los niveles de nutrientes foliares del cultivo de arroz.

H_{0c} : No existe una relación significativa entre los índices derivados de imágenes RPAS e imágenes satelitales y los niveles de nutrientes foliares del cultivo de arroz.

H_{1d} : Los componentes de producción del cultivo de arroz reflejan la variabilidad espacial observada en los índices de vigor y en las condiciones edafológicas bajo las prácticas de manejo existentes.

H_{0d} : Los componentes de producción del cultivo de arroz no reflejan la variabilidad espacial observada en los índices de vigor ni en las condiciones edafológicas.

1.8. Alcances y límites

1.8.1. Alcance investigativo

Este estudio, de enfoque investigativo **descriptivo no experimental**, busca optimizar el uso de **RPAS** en arroz mediante imágenes multiespectrales para apoyar planes de fertilización más eficientes en **tres fincas** de la provincia de **La Vega** (Jima Arriba, Rincón y Las Cabuyas). Se aplicará teledetección para mapear la variabilidad nutricional a escala de finca y generar mapas del **estado nutricional foliar** y de **nutrientes del suelo**, como soporte para decisiones de fertilización y manejo hídrico. Los resultados servirán como referencia para futuros estudios y extensión agrícola con RPAS en otros cultivos, fortaleciendo capacidades técnicas y la asistencia basada en información geoespacial.

1.8.2. Límites

El estudio se restringe a cuatro fincas específicas, por lo que los resultados pueden no ser directamente extrapolables a otras áreas con condiciones edafoclimáticas diferentes. Las mediciones multiespectrales dependen de condiciones climáticas favorables durante los vuelos de RPAS, como nubosidad, lluvia o viento, que pueden afectar la calidad de las imágenes. La evaluación de nutrientes se limita a los elementos más representativos para el cultivo de arroz, dejando fuera otros elementos menores que podrían influir en el análisis. La correlación entre índices espectrales y niveles de nutrientes puede variar según la densidad de la cobertura vegetal y el manejo agronómico particular de cada parcela, por lo que los mapas generados deben considerarse como herramientas de apoyo y no como diagnósticos absolutos.

1.9. Definición de términos

Agricultura de precisión: enfoque de manejo agrícola basado en la adquisición y análisis de datos espaciales y temporales para ajustar las prácticas de producción según la variabilidad dentro del campo, optimizando el uso de insumos y mejorando la sostenibilidad del sistema productivo. Esta disciplina integra tecnologías como teledetección, SIG, sensores remotos y vehículos autónomos (Mulla, 2013b).

GLI (*Green Leaf Index*): índice visible orientado a discriminar “verdor” foliar a partir de RGB; se usa para segmentación/estimación de cobertura verde (Index Database, s/f).

GNDVI (*Green Normalized Difference Vegetation Index*): índice derivado de las bandas verde e infrarrojo cercano, sensible al contenido foliar de clorofila y, por extensión, al estado nutricional del cultivo, especialmente al nitrógeno (Gitelson *et al.*, 1996).

GRVI (*Green Red Vegetation Index*): índice visible que contrasta verde vs rojo para capturar variaciones de verdor/cobertura; se utiliza en estudios de fenología/vegetación con imágenes RGB (Motohka *et al.*, 2010).

Índices de vegetación (RGB y multiespectrales): relaciones matemáticas entre bandas espectrales que permiten resaltar propiedades de la vegetación, tales como vigor, contenido de clorofila, biomasa o estrés. Los índices RGB emplean bandas visibles, mientras que los multiespectrales integran bandas como infrarrojo cercano o borde rojo (Xue & Su, 2017).

MSAVI (*Modified Soil Adjusted Vegetation Index*; *MSAVI2*): índice diseñado para reducir el efecto del suelo expuesto (brillo del fondo) en condiciones de baja cobertura; USGS describe que minimiza el efecto de suelo bare en relación con SAVI (USGS, s/f (a)).

NDMI (*Normalized Difference Moisture Index*): índice para inferir contenido hídrico/estrés hídrico de la vegetación a partir de NIR y SWIR; USGS lo define como razón normalizada entre NIR y SWIR (USGS, s/f (b)).

NDRE (*Normalized Difference Red Edge Index*): índice de vegetación basado en la diferencia normalizada entre las bandas del borde rojo y del infrarrojo cercano, especialmente útil para detectar variaciones en clorofila en etapas avanzadas del cultivo o en coberturas densas donde el NDVI tiende a saturarse (Delegido *et al.*, 2011).

NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*): índice que utiliza las bandas roja e infrarrojo cercano para estimar la densidad y actividad fotosintética de la vegetación. Sus valores permiten distinguir áreas con mayor o menor vigor vegetal, constituyendo uno de los indicadores más utilizados en teledetección agrícola (Rouse *et al.*, 1974).

NGRDI (*Normalized Green–Red Difference Index*): índice normalizado en RGB para estimar fracción/cobertura vegetal o biomasa a partir de la diferencia relativa entre verde y rojo; se expresa explícitamente como $(G-R)/(G+R)$ en literatura de teledetección con ortomosaicos RGB (Du & Noguchi, 2017).

Ortomosaico: imagen corregida geométricamente y ensamblada a partir de múltiples fotografías tomadas por sensores aéreos, generando una representación georreferenciada de la superficie terrestre con escala uniforme y precisión cartográfica (Gómez-Candón *et al.*, 2014).

RECI / CIred-edge (*Red-Edge Chlorophyll Index*; a veces reportado como “**Chl-Red-Edge**”): índice de razón orientado a **contenido de clorofila** usando NIR y Red-Edge (Index Database, s./f.; Muramaksu, 2019).

RPAS / dron (*Remotely Piloted Aircraft System*): sistema de aeronave no tripulada equipado con sensores capaces de adquirir información aérea de alta resolución. Su uso en agricultura permite monitorear el crecimiento del cultivo, detectar estrés y generar mapas temáticos para la toma de decisiones (Zhang & Kovacs, 2020).

Teledetección: conjunto de técnicas para adquirir información de la superficie terrestre sin contacto físico, mediante sensores que capturan radiación reflejada o emitida por los objetos. En agricultura se utiliza para evaluar vigor, estrés, contenido de clorofila, humedad y variabilidad espacial del cultivo (Campbell & Wynne, 2011).

VARI (*Visible Atmospherically Resistant Index*): índice diseñado para resaltar vegetación en el visible, mitigando variaciones de iluminación/atmósfera; es especialmente útil cuando solo se dispone de imágenes RGB (Space4Water, s/f).

Variabilidad espacial: heterogeneidad en la distribución de características del suelo, agua o cultivo dentro de un área determinada. Su análisis permite identificar zonas con comportamientos distintos y aplicar manejos diferenciados, base fundamental de la agricultura de precisión (Uva & Campanella, 2009).

Vigor del cultivo: se define como la salud y el potencial de crecimiento de un cultivo, influenciado por factores como las características del suelo, el contenido de agua, los nutrientes y las condiciones ambientales. Puede evaluarse mediante técnicas de teledetección que miden las características espectrales del cultivo en relación con estos parámetros biofísicos y bioquímicos (Taylor, 2023).

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

En este capítulo se describen los aspectos más relevantes relacionados a la parte teórica del estudio como el marco teórico donde se explica el contexto actual de las principales variables a estudiar, ubicación geográfica del estudio, aspectos demográficos de las fincas de estudio, aspectos económicos y socioculturales de la región donde se realizó la investigación y por último el marco conceptual.

2.1. Generalidades del cultivo de arroz

2.1.1 Importancia del cultivo de arroz

El arroz es uno de los cultivos más relevantes a nivel mundial por su papel en la seguridad alimentaria, al ser el segundo cereal más cultivado y uno de los alimentos básicos más consumidos globalmente (Stavrakoudis *et al.*, 2019). Se estima que es esencial para la alimentación de cerca del 75 % de la población mundial, especialmente en Asia, donde constituye la base de la dieta y aporta una fuente clave de carbohidratos y otros nutrientes para millones de personas (Qiu *et al.*, 2021; Gadal *et al.*, 2019). A escala global, se ubica entre los tres principales granos alimenticios, junto con el trigo y el maíz, tanto en superficie cultivada como en volumen de producción (FAO, 2021c).

En 2023, la producción mundial de arroz alcanzó aproximadamente 800 millones de toneladas de arroz paddy, equivalentes a unos 520 millones de toneladas de arroz en grano, lo que representa un incremento de más de tres millones de toneladas respecto al año anterior (FAOStat, 2025). Los principales productores incluyen a China (208 millones de toneladas) e India (207 millones de toneladas), seguidos por Bangladesh (58.6 millones) e Indonesia (53.9 millones), configurándose como países clave para la seguridad alimentaria y la economía agrícola global (FAOStat, 2025). La importancia del arroz trasciende su valor alimenticio y se extiende a la cultura, la identidad y la economía de numerosas comunidades, al estar ligado a tradiciones agrícolas históricas y a la generación de empleo rural (FAO, 2025).

En América Latina, países como Brasil, Ecuador y la República Dominicana han incrementado de forma notable su producción en las últimas décadas, contribuyendo al abastecimiento local y a la seguridad alimentaria regional (FAO, 2022a; IICA, 2023;

Observatorio Gastronómico Dominicano, 2024). En República Dominicana se ha logrado una autosuficiencia alimentaria cercana al 90 %, produciendo internamente la mayor parte de los alimentos que consume, incluido el arroz (Presidencia de la República Dominicana, 2023). Este cereal es uno de los principales componentes de la canasta básica, y se estima que las familias destinan más del 25 % de su presupuesto a su compra (Ministerio de Agricultura, 2023).

El cultivo de arroz impacta unas 22 provincias, con más de 30 000 productores, alrededor de 250 000 empleos directos e indirectos y un aporte superior a 45 mil millones de pesos a la economía nacional, apoyado por políticas gubernamentales orientadas a mantener la autosuficiencia productiva (Ministerio de Agricultura, 2018). De acuerdo con el sistema de división territorial utilizado por el Ministerio de Agricultura, el país cuenta con ocho regiones o regionales agropecuarias: Norte, Norcentral, Noroeste, Nordeste, Este, Central, Sur y Suroeste (Figura 1).



Figura 1. Regionales agropecuarias, según división territorial del Ministerio de Agricultura.
Fuente: Ministerio de Agricultura (2019).

Para el año 2023, la distribución regional del cultivo de arroz en la República Dominicana evidencia diferencias marcadas en la superficie sembrada. La Región Nordeste lideró la producción con 98,973 ha cultivadas, seguida por la Región Noroeste con 44,333 ha y la Región Norcentral con 33,499 ha, consolidándose estas tres zonas como los principales polos arroceros del país.

La Región Norte aportó 28,450 tareas (1,789 ha), complementando de forma significativa la oferta nacional (Ministerio de Agricultura, 2025b). En las demás regiones, el Suroeste registró 11,768 ha cultivadas, la Región Este 4,756 ha y la Región Central 2,718 ha, lo que muestra que, aunque cuentan con superficies menores respecto a las regiones líderes, mantienen una participación relevante y complementaria en la producción nacional de arroz (Ministerio de Agricultura, 2025b).

2.1.2 Origen, historia y expansión del cultivo de arroz

El arroz es uno de los cereales más antiguos cultivados por el ser humano y constituye hoy el alimento básico de más de la mitad de la población mundial (FAO, 2023b). Su origen se sitúa en las regiones tropicales y subtropicales de Asia, donde fue domesticado a partir de especies silvestres del género *Oryza*, y desde allí sus variedades se han diseminado y adaptado a ambientes muy diversos, que van desde las altas montañas hasta las riberas de los ríos (Pinciroli *et al.*, 2015).

Históricamente, el cultivo se expandió primero hacia el sudeste asiático y el sur de Asia, alcanzando el Cercano Oriente hacia el primer milenio antes de nuestra era (Fuller *et al.*, 2021). Posteriormente, llegó a Europa a través del mundo islámico durante la Edad Media, cuando fue introducido en la Península Ibérica y Sicilia junto con innovaciones en riego y manejo agronómico (Watson, 1974). Durante la colonización europea (siglos XVI–XVIII), el arroz se trasladó al continente americano, adaptándose a condiciones tropicales y templadas bajo riego (Bray, 2023), y utilizando el Caribe como puerta de entrada principal a las Américas (Martínez Villanueva, 2018). En la actualidad, se cultiva en más de 100 países, y Asia concentra alrededor del 90 % de la producción mundial (FAO, 2025a).

En la República Dominicana, se estima que el arroz fue introducido alrededor de 1494, con el segundo viaje de Cristóbal Colón y la fundación de La Isabela, siendo la zona de Esperanza, en la Línea Noroeste, uno de los primeros asentamientos de siembra. Más tarde, en 1919, se inició el cultivo bajo riego impulsado por el inmigrante belga Louis Libert Bogaert, quien aprovechó el cauce en altura del río Mao para desarrollar esta modalidad de producción (Ministerio de Agricultura, 2023; El Nuevo Diario, 2023).

2.1.3 Clasificación taxonómica

El género *Oryza* comprende más de 20 especies silvestres distribuidas en regiones tropicales y subtropicales de Asia, África, América del Sur y Australia. La importancia agronómica del género ha motivado numerosos estudios taxonómicos y filogenéticos. Chang & Harahap (1996), mencionan que investigaciones pioneras en esta área incluyen trabajos de Linnaeus (1753), Baillon (1894), Prodoehl (1922), Roschevitz (1931), Chevalier (1932), Chatterjee (1948), Sampath y Rao (1951), Richharia (1960), Tateoka (1963), Ghose et al. (1956) y Sharma y Shastry (1972), citados por Watanabe (1997).

La taxonomía del cultivo de arroz se clasifica principalmente dentro del reino vegetal siguiendo las características más generales hasta las más específicas, se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Clasificación taxonómica del arroz.

Taxonomía	
Reino	Plantae
Sub-Reino	Embriobionta
División	Magnoliophyta
Tipo	Espermatofita
Sub-tipo	Angiosperma
Clase	Monocotiledónea
Sub-clase	Lilidae
Orden	Glumifloral
Familia	Poaceae
Sub-familia	Orizoideae
Tribu	Oryzeae
Genero	<i>Oryza</i>
Especie	sativa L.

Fuente: Acevedo, Catrillo & Belmonte (2006). Disponible en:
http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_serial&pid=0002-192X&lng=es&nrm=iso

2.1.4 Morfología del cultivo

Oryza sativa L., es una gramínea anual con tallos cilíndricos, generalmente huecos, formados por nudos y entrenudos, y hojas planas que se insertan mediante una vaina; la inflorescencia es una panícula. La altura de la planta varía según el material genético, desde alrededor de 0,40 m en variedades enanas hasta más de 7,0 m en tipos flotantes (Degiovanni et al., 2010; CIAT, 2005).

El sistema radicular incluye raíces seminales de vida corta y raíces adventicias o nodales, que constituyen la mayor parte de las raíces funcionales; en variedades flotantes, estas pueden originarse tanto en nudos sumergidos como en nudos aéreos (CIAT, 2005; Degiovanni *et al.*, 2010).

El tallo o culmo presenta una sucesión de nudos y entrenudos, con una hoja y una yema axilar por nudo, capaz de originar macollos. Los entrenudos maduros suelen ser huecos y estriados, mientras los inferiores se acortan y endurecen (Degiovanni *et al.*, 2010; CIAT, 2005). La panícula está constituida por espiguillas con una raquilla, glumas rudimentarias y florecillas protegidas por lema y palea; cada flor posee seis estambres y un pistilo con un solo óvulo y dos estigmas plumosos, cuyo color varía entre variedades (CIAT, 2005; Degiovanni *et al.*, 2010). Desde la perspectiva productiva, la densidad de panojas por metro cuadrado es clave para el rendimiento: con densidades de siembra cercanas a 250 plantas/m² y un promedio de dos macollos fértiles por planta, pueden lograrse alrededor de 500 panojas/m², considerado un valor de referencia para una buena implantación del cultivo (Olmos, 2006).

2.1.5 Requerimientos edafoclimáticos

2.1.5.1. Clima y temperatura

El cultivo de arroz es propio de climas tropicales y subtropicales, con requerimientos térmicos bien definidos. La germinación ocurre de forma adecuada a partir de $\approx 10\text{--}13\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que el crecimiento vegetativo se favorece entre $25\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (hasta $32\text{--}35\text{ }^{\circ}\text{C}$ en materiales más tolerantes). Temperaturas excesivas, cercanas o superiores a $40\text{--}42\text{ }^{\circ}\text{C}$, especialmente combinadas con otros estreses (déficit hídrico, alta radiación o ozono), pueden afectar la fotosíntesis, acelerar el ciclo, reducir la biomasa y comprometer la formación y llenado de las panículas (Jarma-Orozco, 2012; Chen-Teixeira, 2018). En condiciones templadas y subtropicales el arroz se maneja como cultivo anual semiacuático, mientras que en ambientes tropicales puede rebrotar después de la cosecha y comportarse como perenne. Al final del ciclo, la planta presenta un tallo principal y varios macollos (≈ 3 en siembras densas y hasta ≈ 15 en siembras ralas), aunque solo una parte de ellos llega a ser productiva y contribuye efectivamente al rendimiento (Olmos, 2006; CIAT, 2021).

2.1.5.2. Precipitación y humedad

Los suelos más adecuados para el arroz son aquellos con textura media a pesada (arcillosos, limosos-arcillosos), que presentan buena capacidad de retención de agua, permeabilidad adecuada durante la inundación y capacidad de drenaje cuando sea necesario. En particular, los suelos aluviales y de deltas con contenidos relativamente altos de materia orgánica favorecen el desarrollo del cultivo, ya que aseguran disponibilidad de nutrientes y condiciones óptimas para el enraizamiento (De Datta, 1981; Bouman *et al.*, 2007; Varela, 2010).

2.1.5.3. Suelo y pH

En cuanto al pH, En sistemas anegados de arroz, se ha observado que los mejores rendimientos se obtienen cuando el pH del suelo se sitúa aproximadamente entre 5.5 y 7.0, siendo valores cercanos a 6 los que favorecen mayor disponibilidad de nutrientes y menor riesgo de toxicidad por aluminio y hierro en condiciones muy ácidas. Cuando el pH desciende por debajo de 5.1, aumentan notablemente las formas solubles de Al^{3+} , lo que limita el crecimiento radical y reduce la absorción de nutrientes (Quintero, 2009; Valero-Mora, 2019).

En la región Norcentral, la variabilidad en textura, pH y materia orgánica condiciona la nutrición del cultivo; trabajos en fincas de La Vega y Constanza muestran deficiencias frecuentes de nitrógeno y micronutrientes, con efectos sobre la calidad y el rendimiento del arroz (IDIAF, 2021). En este contexto, la caracterización físico-química de los suelos y del agua de riego resulta clave para diseñar estrategias de manejo nutricional más precisas.

2.1.5.4. Agua y riego

El arroz se cultiva tradicionalmente en campos inundados, lo que ayuda a controlar malezas, favorece la absorción de nutrientes y mantiene condiciones reductoras en el suelo que mejoran la disponibilidad de ciertos elementos (Bouman *et al.*, 2007). No obstante, el manejo del agua debe ser muy preciso: láminas bajas en germinación y establecimiento, aumento progresivo en la fase vegetativa, niveles adecuados durante floración y llenado de grano, y drenaje previo a la cosecha para lograr una madurez uniforme (IRRI, 2013).

La demanda hídrica total del cultivo depende del ciclo, el clima, la eficiencia del riego y las pérdidas por evaporación y percolación. En sistemas tropicales bajo inundación, se estima que los requerimientos de agua se sitúan aproximadamente entre 900 y 2 250 mm por ciclo, considerando tanto la lluvia como el riego suplementario (Tuong & Bouman, 2003; FAO, 2017).

2.1.6 Requerimiento y manejo nutricional del cultivo de arroz

La nutrición vegetal comprende la absorción y el uso eficiente de nutrientes esenciales para sostener las funciones fisiológicas y metabólicas de las plantas, permitiendo acercarse al potencial genético de rendimiento cuando los nutrientes del suelo y de la fertilización están disponibles y son bien aprovechados por el sistema radical (Gao *et al.*, 2024). En el arroz, cultivo clave para la seguridad alimentaria, una fertilización balanceada y ajustada a cada etapa fenológica es determinante tanto para el rendimiento como para la calidad del grano, aunque aún existen limitaciones para un manejo eficiente de nutrientes a nivel de campo (Tripathi *et al.*, 2021).

La eficiencia en el uso de N, P y K en arroz depende no solo de las dosis aplicadas, sino también de factores edáficos como textura, materia orgánica, pH y capacidad de retención de agua, que condicionan la disponibilidad y la absorción de nutrientes (Bihari *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2023). Prácticas como el fraccionamiento de fertilizantes, el drenaje controlado, la rotación de cultivos, las enmiendas orgánicas, la biofortificación y el uso de microorganismos rizosféricos contribuyen a mejorar el rendimiento, la calidad nutricional del grano y la sostenibilidad del sistema de producción (Rendón & Guerrero, 2024). Sin embargo, la heterogeneidad espacial de nutrientes y la falta de herramientas precisas de monitoreo nutricional siguen limitando la productividad, lo que hace necesario conocer con mayor detalle los requerimientos del cultivo por etapa fenológica para optimizar la fertilización con macro y micronutrientes (Xu *et al.*, 2019; Fedearroz, 2025).

2.1.7 Fertilización y nutrientes esenciales

La fertilización es una de las prácticas agronómicas más determinantes para lograr altos rendimientos en arroz, al asegurar la provisión de nutrientes esenciales. No obstante, fertilizar no siempre equivale a nutrir: la eficiencia depende del estado del suelo y de la

capacidad de la planta para absorber los nutrientes, por lo que es indispensable realizar análisis de suelo y considerar propiedades físicas como textura, porosidad y retención de humedad, que favorecen el movimiento del agua y la solubilización de nutrientes (González-Valoys *et al.*, 2025). En la práctica, los esquemas de fertilización suelen contemplar entre 3 y 5 aplicaciones distribuidas entre la germinación, el macollamiento y las fases reproductivas, ajustadas al material, la zona y el ciclo fenológico. La nutrición adecuada es un factor clave para que el cultivo exprese su potencial productivo (Lozano & Ospina, 2019).

Una fertilización estratégica y balanceada no solo busca maximizar el rendimiento, sino también fortalecer la sostenibilidad del sistema mediante una gestión más eficiente de los nutrientes y la adopción de prácticas como fertilizantes orgánicos, rotaciones y enmiendas, que mejoran la fertilidad y reducen impactos ambientales (Moroni, 2021). Para definir las dosis es indispensable evaluar las necesidades reales del cultivo, equilibrando pérdidas y aportes de nutrientes y considerando sus interacciones y la adecuación del fertilizante al sistema de producción (Peralta-Vera, 2024).

2.1.8 Nutrientes esenciales: macro y micronutrientes

El cultivo de arroz demanda cantidades relativamente altas de macronutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), además de calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S), imprescindibles para el crecimiento, el funcionamiento fisiológico y la expresión del rendimiento (Montiel-León, 2024). Mejía de Tafur y Menjívar (2010) señalan que el N ocupa un lugar destacado en la composición de los tejidos vegetales: es el cuarto elemento en importancia por su concentración, únicamente superado por hidrógeno (H), carbono (C) y oxígeno (O). Asimismo, caracterizan al N como un nutriente de comportamiento altamente dinámico y con elevada movilidad, lo cual incrementa la complejidad de su manejo agronómico.

Las principales funciones de los nutrientes esenciales en el cultivo de arroz, así como los síntomas de deficiencia y exceso, se sintetizan en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Función y síntomas de deficiencia/exceso de nutrientes secundarios y micronutrientes en arroz (*Oryza sativa* L.).

Nutriente	Función principal	Síntomas de deficiencia	Síntomas de exceso/toxicidad
Calcio (Ca)	Estabilidad de membranas, división celular y elongación radicular.	Muerte de ápices radiculares, mal establecimiento de plántulas.	Raro en arroz; puede interferir con absorción de Mg y B.
Magnesio (Mg)	Átomo central de la clorofila, activador enzimático.	Clorosis intervenal en hojas viejas, reducción fotosintética.	Poco común; puede antagonizar con Ca y K.
Azufre (S)	Componente de aminoácidos y proteínas.	Amarillamiento en hojas jóvenes (similar a deficiencia de N).	Acumulación excesiva de sulfatos; toxicidad poco frecuente.
Silicio (Si)	Refuerza paredes celulares, resistencia a plagas y acame.	Tallo débil, mayor susceptibilidad a enfermedades.	No tóxico en condiciones normales; exceso se acumula en fitolitos.
Boro (B)	Formación de pared celular, germinación del polen.	Esterilidad floral, bajo cuajado de granos, necrosis apical.	Toxicidad en suelos áridos: clorosis y necrosis marginal.
Cloro (Cl)	Fotólisis del agua, osmorregulación.	Marchitez, reducción en tasa fotosintética.	Clorosis foliar, necrosis en puntas (en alta salinidad).
Cobalto (Co)	Cofactor en bacterias fijadoras de N.	Limitada fijación biológica de N en asociaciones rizosféricas.	Puede inhibir la germinación y el crecimiento si es excesivo.
Cobre (Cu)	Componente de enzimas oxidativas, lignificación.	Clorosis en hojas jóvenes, deformación y muerte de puntas.	Toxicidad en suelos ácidos: necrosis radicular.
Hierro (Fe)	Procesos redox, fotosíntesis y respiración.	Clorosis intervenal en hojas jóvenes.	Toxicidad por Fe ²⁺ en arrozales: manchas pardas y necrosis foliar.
Manganeso (Mn)	Activador enzimático, fotosíntesis.	Clorosis intervenal con punteado necrótico en hojas jóvenes.	Manchas marrones, toxicidad frecuente en suelos encharcados ácidos.
Molibdeno (Mo)	Cofactor de la nitrato reductasa.	Deficiente reducción de nitratos, clorosis generalizada.	Muy raro; exceso puede antagonizar con Cu.
Níquel (Ni)	Componente de la ureasa (metabolismo de urea).	Acumulación de urea, necrosis foliar.	En exceso es tóxico: clorosis, inhibición del crecimiento.
Zinc (Zn)	Síntesis de auxinas, metabolismo de proteínas.	Enanismo, clorosis intervenal en hojas jóvenes, manchas bronceadas.	En exceso: inhibición de Fe y Mn, reducción del crecimiento.

Fuente: Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica. (2015). Disponible en: <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/a50-6907-III-p123.pdf>

El N participa en la síntesis de clorofila, proteínas y enzimas; el P interviene en el transporte de energía (ATP), la fotosíntesis y el desarrollo radicular; y el K regula el balance hídrico, la apertura estomática, la activación enzimática y la tolerancia al estrés. El Mg es el átomo central de la clorofila, el S forma parte de aminoácidos esenciales y el Ca contribuye a la estabilidad de membranas y paredes celulares (Liu *et al.*, 2024; Rakotoson *et al.*, 2025). Además, el arroz requiere micronutrientes como B, Cl, Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni y Zn, que cumplen funciones específicas enzimáticas y estructurales.

Durante el cultivo de arroz, la deficiencia de nutrientes esenciales genera desequilibrios que afectan el vigor y la salud de las plantas, con síntomas como clorosis, necrosis, manchas foliares y reducción del rendimiento y la calidad del grano. La disponibilidad y absorción de micronutrientes dependen en gran medida de las propiedades del suelo, el manejo del riego y las prácticas agrícolas, por lo que se requiere un monitoreo constante y un manejo integrado de la fertilización (EOSDA Crop Monitoring, 2022; International Fertilizer Association [IFA], 2012; Red Agrícola, 2024).

Una gestión adecuada de estos nutrientes no solo incrementa la producción, sino que también reduce los impactos ambientales derivados de un uso inadecuado de fertilizantes, algo crítico en sistemas de arroz bajo riego inundado, donde las condiciones reductoras pueden alterar la disponibilidad de micronutrientes y favorecer deficiencias o toxicidades. El uso de herramientas de agricultura de precisión, como la fertirrigación y el monitoreo con sensores multiespectrales, permite ajustar la nutrición de forma más precisa y oportuna, fortaleciendo la sostenibilidad y resiliencia del sistema productivo (EOSDA Crop Monitoring, 2022; Red Agrícola, 2024).

La deficiencia de nutrientes esenciales puede comprometer el vigor y la salud de las plantas, generando clorosis, necrosis, manchas foliares y disminución del rendimiento y la calidad del grano. La disponibilidad y absorción de micronutrientes dependen de las propiedades del suelo, el manejo del riego y las prácticas agrícolas, lo que hace necesario un monitoreo continuo y un manejo integrado de la fertilización (EOSDA Crop Monitoring, 2022; International Fertilizer Association [IFA], 2012; Red Agrícola, 2024). Una gestión adecuada de nutrientes no solo incrementa la productividad, sino que también mitiga impactos ambientales derivados del uso inadecuado de fertilizantes, especialmente

en sistemas inundados donde las condiciones reductoras alteran la disponibilidad de micronutrientes. El apoyo de herramientas de agricultura de precisión, como la fertirrigación y el monitoreo con sensores multispectrales, permite ajustar la nutrición de forma más precisa y oportuna, favoreciendo la sostenibilidad y resiliencia del sistema productivo (EOSDA Crop Monitoring, 2022; Red Agrícola, 2024).

2.1.9 Etapas fenológicas del cultivo de arroz

El cultivo de arroz presenta un ciclo fenológico bien definido que se organiza en tres fases principales: **vegetativa**, **reproductiva** y **de maduración**. Cada una de estas fases se subdivide en etapas o sub-fases con características fisiológicas, morfológicas y agronómicas específicas. Estas fases guían tanto la planificación del manejo agronómico como la programación de las aplicaciones nutricionales y de riego. La clasificación más utilizada proviene de la IRRI (International Rice Research Institute) y de el CIRAD, ampliamente adoptada en investigaciones y prácticas de campo, se presenta a continuación (Figura 2).

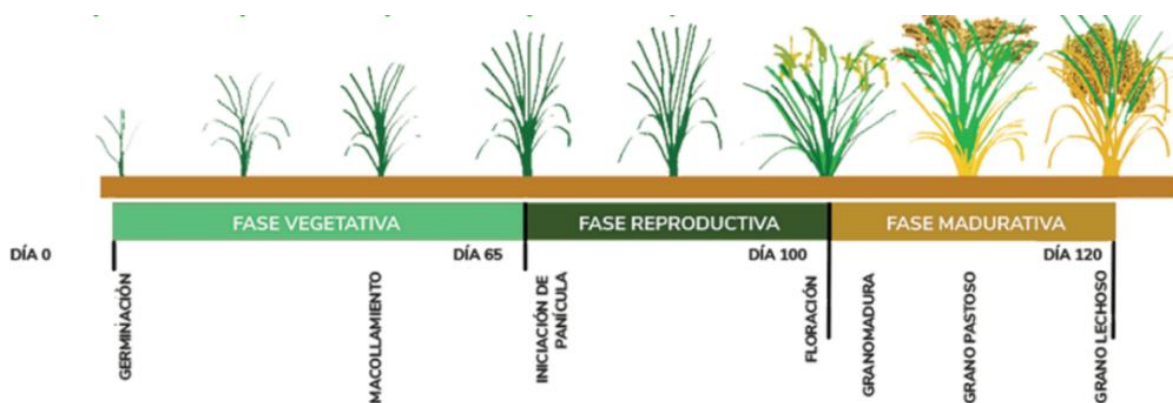


Figura 2. Etapas fenológicas del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.).

Fuente: Cambiagro (s.f). Disponible en: <https://blog.cambiagro.com/arroz/necesidades-nutricionales-para-el-cultivo-de-arroz/>

La **primera etapa** del ciclo corresponde al **período vegetativo**, en el que se forma la estructura de la planta (hojas, tallos y raíces) y se define su capacidad fotosintética y buena parte del potencial de rendimiento, al establecerse los macollos y el área foliar (Kumar *et al.*, 2020). En esta fase, el cultivo es especialmente sensible a estreses térmicos e hídricos; por ejemplo, altas temperaturas desde la etapa de plántula afectan la fisiología

y reducen el vigor en híbridos de arroz (Zhang *et al.*, 2023). Por ello, integrar el conocimiento fenológico en las decisiones de manejo permite ajustar de forma más precisa la siembra, la fertilización, el riego y las prácticas de sanidad vegetal (Huang *et al.*, 2023; Wu *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2023).

La fase vegetativa va desde la germinación hasta la iniciación de la panícula.

Incluye: (i) germinación y emergencia, desde la imbibición de la semilla hasta la aparición de la plántula; (ii) etapa de plántula, cuando se consolidan el sistema radical inicial y las primeras hojas; (iii) macollamiento, caracterizado por la emisión de tallos secundarios o macollos que definen gran parte del número potencial de panículas; y (iv) la transición al alargamiento del tallo, donde se inicia la diferenciación de la panícula dentro del culmo, marcando el paso hacia la fase reproductiva (Yoshida, 1981).

En la **fase reproductiva** se diferencian las estructuras florales, se desarrollan las panículas y tienen lugar la floración, polinización y fecundación. Su duración depende de la variedad y del ambiente, y resulta crítica para la formación del grano y el rendimiento, por lo que el manejo del agua y los nutrientes en este periodo es determinante (Jarma *et al.*, 2010).

La **fase de maduración** comprende desde la fecundación hasta la cosecha e incluye las subetapas de grano lechoso, grano pastoso, madurez fisiológica (máximo peso seco del grano) y madurez de cosecha, cuando el contenido de humedad desciende aproximadamente a 20–24 % y las glumas cambian de color, indicando que el cultivo está listo para la trilla. En este tramo se definen el rendimiento efectivo, la calidad del grano y su comportamiento poscosecha (Jiménez, 2021).

2.2. Sistemas de Aeronaves Pilotadas Remotamente (RPAS) para el mapeo de nutrientes en arroz

2.2.1. Introducción a los RPAS en agricultura de precisión

2.2.1.1. Concepto y definición de RPAS/drones

Los RPAS (*Remotely Piloted Aircraft Systems*) son sistemas integrados para operar aeronaves sin piloto a bordo; incluyen la aeronave pilotada a distancia, la(s) estación(es) de control, los enlaces de mando y cualquier otro componente necesario para la operación segura del vuelo (León y Ortega, 2023; Mazza, 2024). En este conjunto, el RPA (*Remotely Piloted Aircraft*) es solo la aeronave no tripulada, mientras que el término RPAS abarca todo el ecosistema técnico de hardware, software, comunicaciones y seguridad (Restrepo-Ángel, 2024; Rosello-Petit, 2025). El vocablo “drone” se utiliza de forma coloquial y es menos preciso en contextos técnicos y regulatorios, aunque en la práctica muchas publicaciones lo emplean como sinónimo de RPA o RPAS (Ahmad *et al.*, 2021; Saa-Lara, 2023).

En agricultura, los RPAS se han consolidado como herramientas clave de la agricultura de precisión. Su uso permite generar mapas de vegetación, calcular índices de estado del cultivo como el NDVI, estimar altura de plantas, volumen de biomasa y rendimiento potencial, así como monitorear de forma temprana plagas, enfermedades y deficiencias nutricionales (Martos *et al.*, 2021; Ahmad *et al.*, 2021). La alta resolución espacial y temporal de la información permite ajustar prácticas como riego, fertilización y cosecha, reduciendo pérdidas y optimizando el uso de agua, fertilizantes y plaguicidas, además de minimizar impactos ambientales como contaminación hídrica o degradación del suelo (Ahmad *et al.*, 2021; Gade *et al.*, 2024). Estos sistemas son especialmente valiosos en predios con suelos variables, topografía compleja o zonas de difícil acceso, donde el monitoreo tradicional es limitado. La información generada permite identificar subzonas con diferentes niveles de estrés o requerimientos dentro de una misma parcela y definir unidades de manejo específico, como áreas con fertilización ajustada o riego variable, fortaleciendo el enfoque de agricultura de precisión (Espin-Sánchez., 2024).

2.2.1.2. Tipos de RPAS utilizados en agricultura (multirrotor, ala fija, híbridos)

En agricultura, de acuerdo a León y Ortega (2023), los RPAS suelen agruparse en tres tipos principales: multirrotor (rotary-wing), ala fija (fixed-wing) e híbridos, incluidos los VTOL (siglas en inglés de "*Vertical Take-Off and Landing*" (despegue y aterrizaje vertical) (Figura 3).



Figura 3. Dron agrícola de ala giratoria (multirrotor, hexarrotor) para monitorización y fotografía aérea (Izquierda-arriba); dron DJI Phantom 4 Multiespectral (derecha-arriba); dron de alas fijas (izquierda-abajo) y dron híbrido (derecha-abajo).

Los multirrotores son adecuados para áreas pequeñas o medianas por su alta maniobrabilidad, facilidad de despegue y aterrizaje y capacidad para capturar imágenes de alta resolución en zonas específicas. Los sistemas de ala fija son más eficientes en grandes extensiones, gracias a su mayor autonomía y cobertura por vuelo, aunque requieren pista o dispositivos especiales de lanzamiento y recuperación. Los híbridos combinan despegue y aterrizaje vertical con vuelos prolongados y estables sobre amplias superficies, resultando especialmente útiles en agricultura de precisión para el mapeo de nutrientes, la detección de estrés hídrico y el monitoreo fitosanitario (Zhang & Kovacs, 2020; Pérez, 2023).

Multirrotor (rotary-wing). Estos RPAS utilizan varios rotores (4, 6, 8, etc.) para generar sustentación y control, lo que les permite despegar y aterrizar en vertical (VTOL) y mantenerse en vuelo estacionario. Son especialmente útiles para inspecciones detalladas, captura de imágenes de alta resolución en puntos concretos, tratamientos localizados y trabajo en terrenos con topografía compleja. Pueden portar cámaras multiespectrales o térmicas para generar mapas de vigor, detectar estrés hídrico o identificar plagas en fases tempranas, lo que aporta gran valor en agricultura de precisión. Su principal limitante es la autonomía: los tiempos de vuelo suelen estar entre 20 y 40 minutos, con cargas útiles moderadas y mayor consumo energético cuando deben cubrir distancias largas (Dias *et al.*, 2021; Li, 2025).

Ala fija (fixed-wing). Los RPAS de ala fija generan sustentación por el avance, por lo que son más eficientes aerodinámicamente que los multirrotores, con tiempos de vuelo mucho mayores y capacidad para cubrir grandes extensiones en una sola misión, lo que los hace ideales para cultivos extensivos y cartografía de centenas de hectáreas (Bello-Patricio, 2023). Su diseño admite más batería y sensores, facilitando la generación de ortomosaicos y modelos de elevación para análisis de drenaje, topografía y vigor a escala de finca o región (Guebsi *et al.*, 2024). Como contrapartida, requieren espacio o dispositivos de lanzamiento y recuperación, no pueden hacer *hover* para inspección puntual y son menos maniobrables en parcelas pequeñas o con muchos obstáculos (Mora-Parrales, 2025).

Híbridos (VTOL siglas en inglés de "Vertical Take-Off and Landing" (despegue y aterrizaje vertical, híbridos)). Los sistemas híbridos combinan rotores para despegue y aterrizaje vertical con alas fijas para el vuelo de crucero, buscando integrar la maniobrabilidad de un multirrotor con la autonomía de un ala fija (Velazco-Haz, 2024). En agricultura son útiles cuando, en una misma misión se necesita inspeccionar puntos concretos y luego mapear superficies amplias sin cambiar de plataforma. No obstante, la mayor complejidad mecánica y electrónica (mecanismos de transición, gestión de modos de vuelo) se traduce en mayores costos, exigencias de mantenimiento y mayores requerimientos técnicos para el operador (Guebsi *et al.*, 2024; Torres-Pita, 2025).

2.2.1.3. Ventajas frente a métodos tradicionales de monitoreo

La incorporación de los Sistemas Aéreos Pilotados Remotamente (RPAS), comúnmente llamados drones, ha transformado las estrategias de monitoreo en múltiples sectores, al ofrecer mayores niveles de eficiencia, seguridad y detalle frente a los métodos tradicionales, especialmente en contextos de difícil acceso y en operaciones en tiempo real (Orquera-Guevara, 2020; Ivars-Soriano, 2024; Castro-Aceves, 2025).

En agricultura, su uso ha permitido una supervisión más precisa de los cultivos y la detección temprana de plagas y enfermedades, optimizando el uso de insumos y contribuyendo a la mejora de los rendimientos (Mora-Parrales, 2025). En este contexto, las principales ventajas de los Sistemas de Aeronaves Pilotadas Remotamente frente a los métodos tradicionales de monitoreo son las siguientes:

- **Mayor cobertura y accesibilidad.** Los RPAS permiten acceder a zonas de difícil alcance (terrenos montañosos, áreas urbanas congestionadas o infraestructuras críticas) sin exponer al personal, cubriendo grandes superficies con mayor eficiencia que los métodos tradicionales (Fernández-Chiclano, 2024).
- **Reducción de costos operativos.** En distintos sectores, como el energético, los drones han sustituido patrullas terrestres y helicópteros, reduciendo de forma importante los costos de vigilancia y monitoreo (Salazar, 2025).
- **Monitoreo en tiempo real.** Equipados con cámaras y sensores avanzados, los drones transmiten imágenes y datos en vivo, lo que facilita decisiones rápidas y una vigilancia continua en contextos operativos y de emergencia (Pardo-Ibarra, 2016).
- **Mayor precisión y eficiencia.** En agricultura, los RPAS con cámaras multispectrales permiten detectar estrés hídrico, plagas o deficiencias nutricionales no visibles a simple vista, posibilitando intervenciones más localizadas y oportunas en los cultivos (Palomino-Suárez, 2020).
- **Seguridad mejorada.** Los drones ofrecen una alternativa más segura para el monitoreo de áreas peligrosas o de difícil acceso, como zonas con fauna silvestre o terrenos inhóspitos, reduciendo la exposición del personal a riesgos directos (Fernández-Chiclano, 2024).

2.2.1.4. Limitaciones y precisión de la información obtenida

Los drones constituyen una herramienta valiosa para la agricultura, aunque su uso presenta desafíos y limitaciones que deben considerarse. Entre los principales se encuentran la limitada duración de la batería, que reduce el tiempo efectivo de vuelo, los costos de adquisición y mantenimiento, la necesidad de capacitación especializada para su operación y el riesgo de incidentes durante las misiones (Macancela y Lucero, 2016; Bending *et al.*, 2015a; Berruezo *et al.*, 2023). A ello se suma el marco regulatorio, dado que en muchos países existen normas que restringen el uso de drones en el espacio aéreo agrícola (Abarca & Gonzalez, 2024). En cuanto a su equipamiento, los drones agrícolas pueden incorporar cámaras de alta resolución para generar imágenes aéreas de los cultivos, sensores para medir temperatura, humedad y otras variables ambientales, así como sistemas para realizar aplicaciones localizadas de fertilizantes o plaguicidas con mayor precisión y eficiencia (Bending *et al.*, 2015b). Por tanto, aunque las ventajas en monitoreo y manejo de insumos son claras, su adopción exige equilibrar los beneficios tecnológicos con las restricciones técnicas, económicas y normativas.

2.2.2. Fundamentos del mapeo de nutrientes en cultivo de arroz

Piera *et al.* (2024) señalan que el mapeo de nutrientes en cultivos de arroz es una herramienta central de la agricultura de precisión, porque permite gestionar mejor los insumos y mejorar los rendimientos. Tradicionalmente se hacía con métodos manuales, pero la incorporación de RPAS ha agilizado y refinado este proceso. El mapeo se basa en la integración de datos geoespaciales y agronómicos: a partir de GPS y SIG se georreferencian muestras de suelo y datos de rendimiento para generar mapas de distribución de nutrientes que orientan la fertilización, reducen costos y disminuyen el riesgo de lixiviación hacia cuerpos de agua (González, 2022).

Los RPAS equipados con sensores multiespectrales capturan imágenes aéreas que permiten identificar variaciones en la salud del cultivo asociadas a deficiencias o excesos de nutrientes, facilitando la elaboración de mapas de prescripción y la aplicación localizada de fertilizantes (Beltran-Barreto, 2023). Sobre esta base, algunos fundamentos clave del mapeo de nutrientes en arroz son:

Variabilidad espacial del suelo. Reconocer que la fertilidad, textura, pH y disponibilidad de nutrientes cambian dentro de una misma parcela. El mapeo busca cuantificar esta variación para evitar sub- y sobre-fertilización y así mejorar la eficiencia (Di Leo, 2015).

Integración de tecnologías geoespaciales. El GPS permite georreferenciar las muestras y el rendimiento, mientras que el SIG procesa y analiza la información para generar mapas detallados de nutrientes y otros parámetros del suelo, constituyendo la base técnica del mapeo (Pino, 2019).

Teledetección como monitoreo. Sensores remotos en drones y satélites aportan índices de vegetación relacionados con la condición nutricional y el estado del cultivo, lo que facilita decisiones rápidas y ajustadas a las necesidades reales del arroz (Rosario *et al.*, 2024).

Aplicación de tasa variable (VRA). Como etapa final, la información de los mapas se utiliza en maquinaria con control de dosis para aplicar fertilizantes de manera variable en cada zona, optimizando recursos y mejorando la rentabilidad del sistema (Vera-Vera, 2019).

2.2.3. Sensores y tecnologías embarcadas en RPAS para monitoreo nutricional

De acuerdo a Amaral *et al.*, (2020), un dron es un vehículo aéreo no tripulado que se opera mediante controles remotos (tipo joystick) o aplicaciones en teléfonos y tabletas, disponibles en sistemas iOS, Android o Linux. En agricultura, su incorporación como herramienta tecnológica permite cubrir grandes extensiones en poco tiempo (Andrion, 2023); con cámaras de alta definición y sistemas de georreferenciación pueden sobrevolar más de mil hectáreas en menos de una hora, aportando información espacial detallada para la toma de decisiones (Bajwa *et al.*, 2019; Awais *et al.*, 2025). Equipados con cámaras multiespectrales, estos dispositivos capturan imágenes y videos de alta resolución que revelan características del cultivo no visibles a simple vista, apoyando diagnósticos más precisos sobre el estado del cultivo y su productividad (Bongomin *et al.*, 2024).

Para aprovechar plenamente su potencial en agricultura, es necesario comprender conceptos como el espectro electromagnético, los tipos de cámaras, la respuesta espectral de las plantas y el uso de índices de vegetación como el NDVI, que permiten cuantificar el vigor y la condición nutricional del cultivo (Bending *et al.*, 2015c). Algunos drones integran además sensores de temperatura, humedad u otros factores ambientales y, en modelos más avanzados, sistemas para aplicar fertilizantes o plaguicidas de manera localizada, incrementando la eficiencia del manejo agronómico.

En la agricultura de precisión, los sensores remotos montados en UAVs aprovechan las propiedades espectrales de la vegetación para evaluar el estado de los cultivos. Esta base física se sustenta en el espectro electromagnético (Figura 4), entendido como el conjunto de radiaciones ordenadas según su longitud de onda o frecuencia; en un objeto, el espectro de emisión corresponde a la radiación que emite y el de absorción a la que retiene, lo que permite caracterizarlo tanto en la franja visible como en el infrarrojo cercano (Fontal *et al.*, 2005; Cruz-Carrillo, 2020).

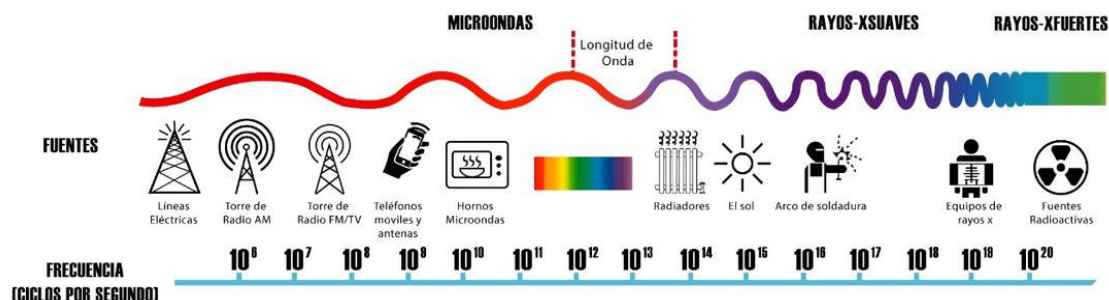


Figura 4. Espectro Electromagnético hasta los 6 GHz y las Tecnologías Asociadas.

Fuente: IPStore. Disponible en: https://ipstore.cl/blogs/telecomunicaciones/uso-del-espectro-electromagnetico-hasta-los-6-ghz-y-las-tecnologias-asociadas?srltid=AfmBOopEwveYnXIE56SZkUMT5z_4p8sMZLBlvCE8abcgQqAjsvu3NBFi

Sobre este principio se construyen índices espectrales como el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), calculado a partir de bandas en el rojo y el infrarrojo cercano, que posibilita la detección temprana de estrés hídrico, deficiencias nutricionales y enfermedades en las plantas (Gade *et al.*, 2024).

2.2.3.1 Uso de cámaras RGB y NIR en aplicaciones agrícolas mediante UAVs

En la agricultura de precisión, los vehículos aéreos no tripulados (UAVs) equipados con cámaras multispectrales (Figura 5) han revolucionado el monitoreo y la gestión de los cultivos, al posibilitar la adquisición de imágenes con alta resolución espacial y temporal que describen la respuesta espectral de la vegetación en distintas bandas del espectro electromagnético. Estas plataformas permiten generar ortomosaicos y mapas de índices de vegetación derivados de la reflectancia en el visible e infrarrojo cercano, lo que facilita la evaluación del vigor del cultivo, la detección temprana de estrés hídrico, deficiencias nutricionales y daños por plagas o enfermedades, mucho antes de que los síntomas sean evidentes a simple vista (Zhang & Kovacs, 2012; Hunt *et al.*, 2013).



Figura 5. Sensor multispectral para análisis de cultivos y gestión de vegetación en agricultura de precisión (superior), cámara multispectral DJI Mavic 3M (inferior).

Fuente: Disponible en: <https://www.geocom.cl/products/dji-mavic-3-multispectral/>;
<https://learningdata.hubiberiaagrotech.eu/camaras-multispectrales/>

Gracias a la integración de los datos captados por UAVs con sistemas de información geográfica y herramientas de análisis geoespacial, es posible delimitar zonas de manejo específico dentro de una misma parcela y ajustar de forma diferenciada la fertilización, el riego y otras labores agronómicas, optimizando el uso de insumos, reduciendo costos y disminuyendo impactos ambientales (BVBA, 2024).

En este contexto, los UAVs multiespectrales se consolidan como un componente clave de la agricultura de precisión, al aportar información cuantitativa y georreferenciada que respalda decisiones oportunas y basadas en evidencia para maximizar el rendimiento y la sostenibilidad del sistema productivo (Coelho *et al.*, 2021; Buitrago *et al.*, 2024).

Cámaras RGB (Rojo, Verde, Azul). Las cámaras RGB capturan imágenes en el espectro visible (aproximadamente entre 400 y 700 nm), replicando la percepción humana del color. Estas cámaras son ideales para tareas como la inspección visual de cultivos, la creación de modelos de elevación del terreno y el conteo de plantas. Además, se utilizan en la detección de fallas de siembra, estimación del volumen de frutos cosechados y análisis de parámetros biofísicos de cultivos como el café, demostrando su versatilidad en diversas aplicaciones agrícolas (Espuña, 2023).

Cámaras NIR (infrarrojo cercano). Las cámaras NIR capturan imágenes en longitudes de onda más allá del espectro visible, específicamente en el rango del infrarrojo cercano (aproximadamente entre 700 y 1,100 nm). Estas cámaras son esenciales para calcular índices como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), que ayuda a evaluar la densidad y la distribución del follaje verde en áreas agrícolas. El análisis de la reflectancia en NIR permite detectar deficiencias nutricionales, infestaciones de plagas, brotes de enfermedades y estrés hídrico en los cultivos, facilitando una gestión más precisa y eficiente del agua y los nutrientes (Eugenio *et al.*, 2020; Fan *et al.*, 2024).

Aplicaciones combinadas de cámaras RGB y NIR. La integración de datos de cámaras RGB y NIR proporciona una visión más completa del estado de los cultivos (Figura 6). Mientras que las cámaras RGB ofrecen información detallada sobre la estructura y el color visible de las plantas, las cámaras NIR proporcionan datos sobre la salud fisiológica y el estrés de las mismas. El análisis integrado de imágenes provenientes de cámaras RGB y NIR mejora la precisión del monitoreo del cultivo y respalda una toma de decisiones más fundamentada en la gestión agrícola (Kesowa, 2025).

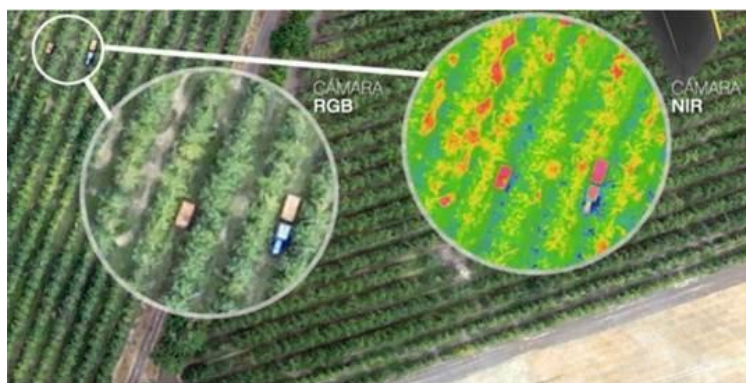


Figura 6. Diferencia entre una cámara tradicional (RGB) con una multispectral (NIR).

Fuente: ViLab. Disponible en: <https://www.vilab.cl/p/drones-en-la-agricultura>

En aplicaciones agrícolas, las cámaras RGB capturan información en el espectro visible (rojo, verde y azul) y se emplean para inspección visual del cultivo, generación de modelos digitales de elevación, conteo de plantas y caracterización general del dosel. Las cámaras sensibles al infrarrojo cercano (NIR), en cambio, permiten profundizar en el análisis del suelo y la vegetación, especialmente para evaluar humedad, detectar estrés nutricional, gestionar el agua y monitorear procesos erosivos, además de facilitar el conteo y seguimiento de plantas en diferentes etapas del ciclo (Kesowa, 2025).

La respuesta espectral de las plantas explica el valor agronómico de estos sensores: la vegetación absorbe radiación en la franja fotosintéticamente activa para sostener la fotosíntesis, lo que la hace relativamente oscura en el visible, mientras refleja fuertemente la radiación en el infrarrojo cercano. Esta diferencia entre absorción y reflectancia constituye la base para el cálculo de índices de vegetación utilizados en el diagnóstico fisiológico y estructural del cultivo (Honkavaara *et al.*, 2021a).

2.2.3.2. Tipos de sensores: multispectrales, hiperespectrales, RGB, térmicos

El sensor multispectral está formado por píxeles sensibles a distintas longitudes de onda, de modo que cada uno registra la radiación en una banda específica del espectro; esto permite capturar información diversa y realizar análisis orientados a distintos usos (Umiles, 2023). En el caso de los sensores hiperespectrales, estos recopilan datos en cientos de bandas electromagnéticas estrechas y contiguas, de manera que las imágenes resultantes permiten un análisis muy detallado de materiales y vegetación y la detección precisa de objetivos (Román-González & Vargas-Cuentas, 2013; EOS Data Analytics, 2025).

El sensor RGB entrega un retorno digital de cuatro canales: rojo, verde, azul y transparente (RGBC), que permiten definir con precisión el color. Su funcionamiento se basa en una matriz de fotodiodos filtrados en rojo, verde y azul, más un fotodiodo transparente; las señales se convierten mediante convertidores analógico-digitales a valores RGBC de 8 bits (Edmundo 2024). Por su parte, los sensores térmicos se han desarrollado para múltiples aplicaciones, desde la monitorización de procesos industriales hasta el control ambiental, y pueden medir temperatura, caudal, aceleración o velocidad angular (Durán-Gómez, 2018). Dentro de ellos, los sensores de temperatura o sondas de temperatura son fundamentales en climatización de interiores, ya que miden la temperatura del aire o del agua y proporcionan datos precisos para mantener condiciones ambientales confortables y eficientes (S&P, 2024).

2.2.4. Índices vegetativos: principios de medición de nutrientes mediante índices vegetativos (NDVI, GNDVI, etc.).

Los índices de vegetación derivados de imágenes multiespectrales son herramientas clave para estimar de forma indirecta el estado nutricional de los cultivos. Se apoyan en la respuesta espectral de la vegetación, en particular en la absorción de luz roja por la clorofila y en la alta reflectancia en el infrarrojo cercano, lo que permite relacionar las bandas Red y NIR con la biomasa foliar, el contenido de clorofila y la salud fisiológica de las plantas (Tucker, 1979). Este contraste espectral hace posible distinguir zonas de alto vigor de aquellas con posibles deficiencias nutricionales, a partir del cálculo de diferentes índices de vegetación. Algunos índices de vegetación utilizados se presentan en el

Cuadro 4.

NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada es una métrica básica para evaluar la salud del cultivo a partir de la reflectancia en rojo e infrarrojo cercano, sin necesidad de visitas constantes al campo. El seguimiento temporal de sus valores permite detectar cambios estacionales y primeros signos de estrés; descensos bruscos pueden asociarse a estrés hídrico o térmico, enfermedades, deficiencias nutricionales o plagas, aunque también pueden deberse a procesos naturales como cosecha o senescencia foliar (EOS Data Analytics, 2025).

Cuadro 4. Principales índices de vegetación utilizados para el diagnóstico nutricional y análisis de vigor en cultivos.

Sigla	Nombre	Fórmula*	Autor(es)
NDVI	Índice de vegetación de diferencia normalizada	$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$	Rouse <i>et al.</i> , 1974
GNDVI	Índice de vegetación de diferencia normalizada verde	$GNDVI = \frac{(NIR - GREEN)}{(NIR + GREEN)}$	Gitelson <i>et al.</i> , 1996
MSAVI	Índice de vegetación ajustado al suelo modificado	$MSAVI = B_{NIR} + \frac{1 - \sqrt{(2B_{NIR} + 1)^2 - 8(B_{NIR} - B_{RED})}}{2}$	Qi <i>et al.</i> , 1994
TCARI	Índice de absorción de clorofila transformado en reflectancia	$TCARI = 3 \left\{ \left[(R_{700} - R_{670}) - 0.2(R_{700} - R_{550}) \right] \frac{R_{700}}{R_{670}} \right\}$	Haboudane <i>et al.</i> , 2002
MCARI	Índice de absorción de clorofila modificado en reflectancia	$MCARI = \left[(R_{700} - R_{670}) - 0.2(R_{700} - R_{550}) \right] \frac{R_{700}}{R_{670}}$	Daughtry <i>et al.</i> , 2000
MCARI2	Índice de absorción de clorofila modificado en reflectancia 2	$\frac{1,5[2,5(R_{NIR} - R_{RED}) - 1,3(R_{NIR} - R_{RED})]}{\sqrt{(2R_{NIR} + 1)^2 - (6R_{NIR} - 5R_{RED})}}$	Haboudane <i>et al.</i> , 2004
OSAVI	Índice de vegetación ajustado al suelo optimizado	$\frac{1,16(R_{NIR} - R_{RED})}{(R_{NIR} + R_{RED} + 0,16)}$	Rondeaux <i>et al.</i> , 1996

Fuente: EOS Data Analytics (<https://eos.com/es/blog/indices-de-vegetacion/>)

GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index). El NDVI es hasta cinco veces más sensible que el NDVI para detectar variaciones de clorofila, por lo que se recomienda especialmente en fases de máxima vigorosidad, cuando el NDVI tiende a saturarse cerca de 1 y deja de distinguir diferencias internas de vigor dentro del cultivo (Vera-Esmeraldas *et al.*, 2025).

MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index). El índice de vegetación ajustado al suelo modificado amplía el uso del NDVI en áreas con alta proporción de suelo desnudo o escasa cobertura vegetal. Su objetivo es minimizar la influencia del fondo del suelo y aumentar el rango dinámico que indica presencia y densidad de vegetación, siendo útil cuando NDVI o NDRE ofrecen información poco fiable por baja biomasa o clorofila (EOS Data Analytics, 2024c).

NDRE (Red Edge Normalised Difference Vegetation Index). Este índice combina el infrarrojo cercano con una banda en el borde rojo, y es análogo al NDVI pero más sensible en etapas media y tardía del cultivo, cuando ya se ha acumulado mucha clorofila.

La luz de borde rojo penetra más profundamente en la hoja que la luz roja, por lo que el NDRE describe mejor la condición de las plantas en sistemas de producción intensivos (EOS Data Analytics, 2024d).

2.2.5. Índices RGB

Los índices RGB son índices de vegetación calculados a partir de imágenes tomadas con cámaras que solo registran bandas en el rango visible: rojo (R), verde (G) y azul (B). Aunque no utilizan el infrarrojo cercano (NIR), han demostrado ser útiles para estimar vigor, cobertura y cierto nivel de estrés del cultivo cuando se dispone únicamente de cámaras RGB montadas en drones o satélites de baja resolución.

Varios autores destacan que estos índices explotan el contraste entre la alta reflectancia de la vegetación en el verde y la mayor absorción en el rojo y azul, lo que permite discriminar vegetación frente a suelo desnudo y diferenciar niveles de cobertura y vigor del cultivo (Tucker, 1979; Xue & Su, 2017). A diferencia de índices como el NDVI, los índices RGB no requieren banda NIR, lo que abarata los sensores y facilita su uso en agricultura de precisión con drones comerciales (Lussem *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2023b). Entre los índices RGB más utilizados se encuentran:

VARI (*Visible Atmospherically Resistant Index*): diseñado para resaltar la vegetación usando solo bandas visibles y ser relativamente resistente a variaciones atmosféricas y se ha usado en monitoreo de cultivos y estimación de cobertura verde en condiciones operativas donde no se dispone de NIR (Gitelson, 2004; Xue & Su, 2017). Se calcula generalmente como:

$$VARI = \frac{G - R}{G + R - B}$$

ExG (*Excess Green Index*): resalta el componente “verde” de la vegetación a partir de una combinación ponderada de las bandas visibles. Se ha empleado para segmentar vegetación en imágenes RGB, estimar cobertura de cultivo y apoyar conteos de plantas o evaluación de malezas (Vaghefi *et al.*, 2025). Una forma frecuente es:

$$ExG = 2G - R - B$$

NGRDI (Normalized Green–Red Difference Index): normaliza la diferencia entre verde y rojo y se ha aplicado para estimar vigor y cobertura en cultivos como trigo, maíz y arroz, mostrando buena correlación con biomasa y fracción de cobertura del dosel en etapas de alta actividad fotosintética (Tucker, 1979; Wang *et al.*, 2023a).

$$NGRDI = \frac{G - R}{G + R}$$

Todos estos índices permiten generar mapas de vigor aparente, detectar heterogeneidad espacial del cultivo y definir zonas de manejo, siendo especialmente valiosos cuando no se dispone de sensores multispectrales o hiperespectrales, pero se requieren productos operativos para agricultura de precisión (Xue & Su, 2017; Matyukira & Mhangara, 2024).

2.2.6. Procesamiento de datos y generación de mapas de nutrientes

El procesamiento de datos y la generación de mapas de nutrientes mediante drones se ha consolidado como herramienta clave de la agricultura de precisión, al permitir optimizar el uso de fertilizantes, reducir costos y minimizar impactos ambientales (Alcaraz-Henarejo, 2024).

A diferencia de las cámaras RGB convencionales, los sensores multispectrales capturan bandas específicas como el infrarrojo cercano (NIR) y el borde rojo, fundamentales para evaluar la salud de la vegetación, ya que las plantas con buen contenido de clorofila reflejan la luz de manera distinta a las plantas estresadas o con deficiencias nutricionales (García-Servigón & José, 2015).

La operación inicia con un software de planificación de vuelos, donde se fijan altura, velocidad y solapamiento de imágenes para garantizar una cobertura uniforme del área de interés (Virués-Ortega, *et al.*, 2019). Luego, las imágenes se procesan en un software de fotogrametría que integra cientos de tomas en un ortomosaico georreferenciado de alta resolución, base para calcular índices de vegetación y generar mapas temáticos de variabilidad del cultivo (Reyes *et al.*, 2019; Palomino-Suárez, 2020).

A partir de estos índices se elaboran mapas de zonas de manejo, que clasifican el campo en áreas de alto, medio y bajo vigor, reflejando diferencias nutricionales (EsDron, s. f.). Con esa información se construyen mapas de prescripción que indican la dosis de fertilizante para cada zona y se integran con maquinaria equipada con aplicación de tasa variable, de modo que las áreas deficitarias reciben mayores dosis y las zonas adecuadamente nutridas reciben menos, incrementando la eficiencia del manejo (Mora-Parrales, 2025).

2.2.6.1. Pre-procesamiento de imágenes y calibración radiométrica

El procesamiento de imágenes consiste en la manipulación de una imagen digital para mejorar su calidad, modificar su formato o extraer información relevante. Abarca desde ajustes básicos de brillo y contraste hasta la aplicación de filtros, técnicas de reconocimiento de patrones y algoritmos avanzados para resaltar, clasificar o cuantificar rasgos de interés (Hernández-Salazar, 2017; Castello *et al.*, 2018). La calibración radiométrica genera un producto en el que cada píxel se relaciona directamente con la retrodispersión real de la escena, permitiendo análisis cuantitativos confiables. Este procedimiento es fundamental para comparar imágenes obtenidas con distintos sensores, modalidades, fechas o cadenas de procesamiento, al situarlas en una misma escala física de referencia (Rivera *et al.*, 2021).

2.2.6.2. Modelos de correlación entre reflectancia y contenido nutricional

Los modelos de correlación entre reflectancia espectral y contenido nutricional (N, P, K y micronutrientes) se basan en la espectroscopía de reflectancia como método no destructivo para estimar el estado nutricional de las plantas. Las deficiencias o excesos de nutrientes modifican la composición bioquímica y la estructura de la hoja y, en consecuencia, su firma espectral. El nitrógeno (N) muestra las relaciones más robustas, por su papel estructural en la clorofila: esta absorbe fuertemente en azul (≈ 450 nm) y rojo (≈ 670 nm), mientras que la reflectancia es alta en verde (≈ 550 nm) y en el infrarrojo cercano, aproximadamente entre 750 y 1300 nm. La deficiencia de N reduce el contenido de clorofila, aumenta la reflectancia en azul y rojo y altera el verde y el borde rojo, generando patrones de clorosis detectables espectralmente (Li *et al.*, 2025).

En el caso de P y K, la estimación es más compleja porque no están directamente asociados a los pigmentos fotosintéticos. Sus efectos sobre la reflectancia son indirectos y se relacionan con cambios en la estructura celular, el contenido de agua y la materia seca. El déficit de P puede inducir acumulación de antocianinas y menor crecimiento, con efectos en el visible y en el infrarrojo de onda corta, aproximadamente entre 1300 y 2500 nm (Li *et al.*, 2025). La deficiencia de K afecta la turgencia y la apertura estomática, alterando el contenido hídrico y las bandas de absorción del agua en SWIR, en torno a 1400 y 1900 nm; por ello, los modelos para P y K suelen basarse en espectroscopía hiperespectral y métodos multivariados como PLSR, a menudo combinados con bandas NIR y SWIR, e incluso con índices específicos, por ejemplo algunos basados en la región azul para P (Wang *et al.*, 2023b).

La estimación de micronutrientes (Fe, Zn, Mn, entre otros) es todavía más desafiante debido a sus bajas concentraciones y a la naturaleza localizada de los síntomas. Deficiencias como la de hierro, que provoca clorosis internerval, afectan principalmente la reflectancia en el visible (Li *et al.*, 2021). Para estos elementos se recurre a análisis de espectro completo con PLSR y al estudio de derivadas primera o segunda de la curva de reflectancia, con el fin de resaltar señales espectrales débiles asociadas a cambios en pigmentos y en la estructura del tejido (Wang *et al.*, 2023a).

2.2.6.3. Software y plataformas de análisis geoespacial aplicadas a RPAS.

La tecnología geoespacial agrupa un conjunto de herramientas que permiten determinar con precisión la ubicación de objetos o personas sobre la superficie terrestre y asociarla con información descriptiva, lo que amplía de forma notable las posibilidades de análisis y toma de decisiones frente a los datos espaciales tradicionales (EOS Data Analytics, 2024). Su uso resulta relativamente accesible en términos técnicos y de costo, mientras que sus aplicaciones abarcan desde la navegación por GPS y la elaboración de mapas hasta la teledetección de gran escala. Estas tecnologías se aplican prácticamente en cualquier sector donde la localización sea un dato relevante, al correlacionar la posición de los objetos con sus coordenadas geográficas y permitir su monitoreo, seguimiento, medición y modelación, integrando herramientas como la teledetección, el Sistema de

Posicionamiento Global (GPS) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) (EOS Data Analytics, 2024).

2.2.7. Aplicaciones prácticas en sistemas arroceros

Una de las aplicaciones tecnológicas más relevantes en los sistemas arroceros actuales es el riego inteligente basado en Internet de las Cosas (IoT) (Herrera *et al.*, 2023; Xin *et al.*, 2022). Este enfoque permite automatizar el riego mediante sensores instalados en campo que monitorean humedad del suelo, temperatura y nivel de agua, enviando la información a plataformas web o móviles desde donde se controla el riego de forma remota y eficiente. En arroz, donde el manejo del agua es crítico, la combinación de sensores de humedad, sistemas automatizados y mapas de humedad y nutrientes permite ajustar el riego a las necesidades específicas de cada zona del predio, mejorando el uso del recurso hídrico y la productividad (Rivera-Ordoñez & Nieto-Velandia, 2024). Otra aplicación clave es el uso de sensores remotos y plataformas de teledetección, como drones e imágenes satelitales, para el monitoreo multiespectral del cultivo. Estas herramientas facilitan la detección temprana de estrés hídrico, deficiencias nutricionales y presencia de plagas, y su integración en el manejo agronómico permite tomar decisiones basadas en datos reales y oportunos (Veneros *et al.*, 2020; Guzmán-Álvarez, 2022).

Desde la perspectiva ecológica, se ha estudiado el efecto de las rotaciones y la intensificación agrícola sobre la microbiología del suelo en sistemas arroceros. La evidencia muestra que el monocultivo continuo de arroz puede afectar negativamente la diversidad y funcionalidad microbiana, mientras que las rotaciones con leguminosas o pasturas favorecen la actividad biológica del suelo y la sostenibilidad del sistema. Una tesis de maestría en Uruguay documenta cómo distintos esquemas de manejo modifican el potencial funcional de la comunidad microbiana en suelos arroceros (Moreira, 2023).

2.2.8. Optimización de la fertilización mediante mapas de nutrientes

La agricultura de precisión ha transformado el manejo de nutrientes al posibilitar una aplicación más eficiente y localizada de fertilizantes. Mediante sensores remotos y tecnologías de mapeo, se identifican variaciones espaciales en la disponibilidad de nutrientes dentro de un mismo campo, lo que permite ajustar dosis y sitios de aplicación,

incrementando la eficiencia de uso de insumos y reduciendo riesgos de contaminación por lixiviación o escorrentía (Schumann, 2008). Estos mapas constituyen una herramienta clave para la toma de decisiones en tiempo casi real, al orientar estrategias de fertilización diferenciada y optimización del riego. La integración de datos espectrales con análisis de laboratorio facilita la implementación de esquemas de agricultura de precisión que maximizan la eficiencia de los fertilizantes, disminuyen impactos ambientales y mejoran el rendimiento y la calidad del cultivo. Además, los productos geospaciales generados pueden usarse para el monitoreo continuo, la planificación de la cosecha y la evaluación de la respuesta del cultivo frente a prácticas agronómicas específicas (Xie *et al.*, 2020).

2.2.9. Integración de drones con otras tecnologías de agricultura de precisión

La integración de los drones con otras tecnologías de agricultura de precisión ha dado lugar a sistemas de monitoreo y apoyo a la decisión mucho más robustos que el uso aislado de una única fuente de datos (Figura 7) (Nova Morales, 2025). La combinación de información proveniente de sensores de suelo, imágenes satelitales y estaciones meteorológicas ofrece una visión integral de las condiciones del campo y respalda decisiones más precisas sobre fertilización y riego, favoreciendo prácticas sostenibles que optimizan el uso de recursos y reducen el impacto ambiental (Monteiro, 2021).

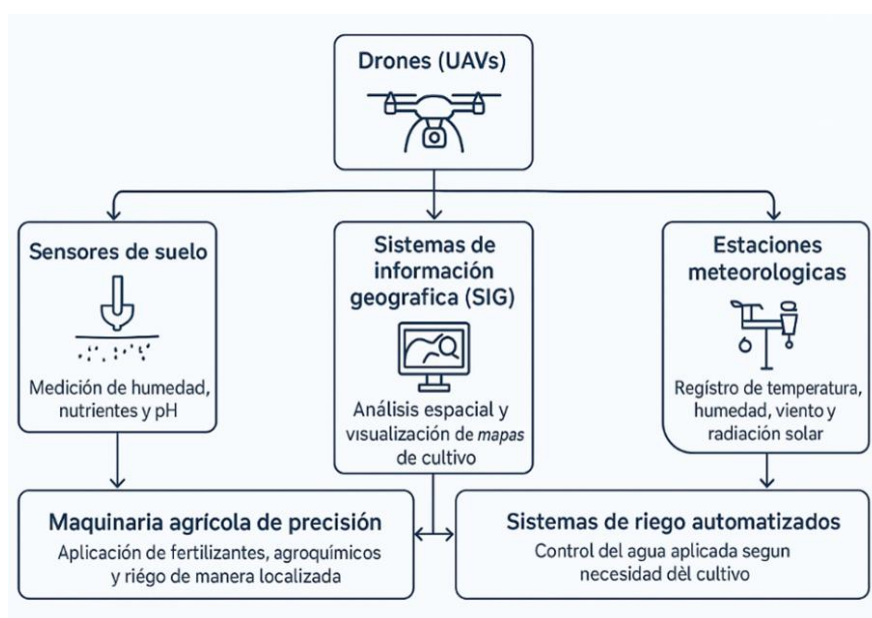


Figura 7. Integración de drones y agricultura de precisión.

Fuente: Imagen elaborada por las autoras con apoyo de ChatGPT, OpenAI (2025).

En este contexto, la articulación de UAVs con sistemas de riego automatizados permite ajustar la lámina de agua de acuerdo con las necesidades específicas de cada parcela. En primer lugar, la combinación de UAVs con redes de sensores e Internet de las Cosas (IoT) permite fusionar información de alta resolución espacial (imágenes multiespectrales de dron) con datos continuos de humedad del suelo, pH, CE, temperatura y variables meteorológicas (Pérez-Reyes, 2025). Esta sinergia facilita intervenciones sitio-específicas en fertilización, riego y control fitosanitario, al vincular “qué” está ocurriendo en el cultivo (índices de vegetación, estructura del dosel) con “por qué” está ocurriendo (condiciones edáficas y ambientales medidas por sensores) (Onofre *et al.*, 2025).

Un segundo eje clave es la integración de drones con imágenes satelitales, SIG y modelos de apoyo a la decisión. La fusión de imágenes de alta resolución de UAV con productos satelitales permite combinar detalle espacial fino con series temporales largas, mediante técnicas de fusión pixel-basada, basada en objetos o en decisiones, lo que mejora la delimitación de zonas de manejo y el seguimiento de la dinámica del cultivo (Zhang *et al.*, 2025). Además, la integración de UAV con SIG y sistemas de soporte de decisiones (DSS) facilita generar mapas de índices de vegetación, relieve, propiedades del suelo y rendimiento, y utilizarlos para definir zonas homogéneas, ajustar dosis de fertilizante y priorizar intervenciones a escala de finca o paisaje (Anaya & Rincón, 2025).

En tercer lugar, los drones se integran cada vez más con tecnologías de aplicación de tasa variable y sistemas de pulverización inteligente. La combinación de detección aérea (índices de vegetación u otros indicadores), mezcla en tiempo real y aspersión variable permite cerrar un ciclo percepción–decisión–ejecución en protección de cultivos y fertilización, reduciendo volúmenes de insumos y mejorando la selectividad espacial de las aplicaciones (Li *et al.*, 2025; Guebsi *et al.*, 2024). De forma complementaria, el uso de algoritmos de inteligencia artificial y aprendizaje automático sobre datos de UAV, en conjunto con mapas de suelo y rendimiento, ha demostrado mejorar la estimación de biomasa, estado nutricional (por ejemplo, N en arroz o maíz) y el pronóstico de rendimiento, lo que refuerza la toma de decisiones en agricultura de precisión (Rodríguez-Fernández, 2023; Alcaraz-Henajeros, 2024; Castro *et al.*, 2025).

2.9.10. Productos fotogramétricos y satelitales

El producto fotogramétrico RGB por etapa fenológica se presenta como un resultado central del estudio, al sintetizar la información espacial obtenida en cada vuelo mediante RPAS en ortomosaicos RGB georreferenciados. Estos productos permiten representar de forma continua y corregida geométricamente la superficie cultivada, facilitando la observación comparativa del cultivo de arroz a lo largo de su desarrollo fenológico. Como señalan Colomina y Molina (2014), los ortomosaicos derivados de RPAS ofrecen “una combinación de alta resolución espacial y precisión geométrica adecuada para aplicaciones agrícolas detalladas” (p. 80), lo que los convierte en una herramienta idónea para el análisis a escala de finca. Estos productos permiten representar de forma continua y corregida geométricamente la superficie cultivada, facilitando la observación comparativa del cultivo de arroz a lo largo de su desarrollo fenológico.

La presentación de los ortomosaicos por vuelo y por etapa fenológica posibilita la evaluación visual y espacial de la dinámica del cultivo, evidenciando patrones de uniformidad, variabilidad intra-parcela y cambios progresivos en la cobertura vegetal. En este contexto, las imágenes RGB permiten identificar contrastes tonales y texturales asociados al crecimiento, la senescencia y el estado general del dosel, aportando información relevante para la interpretación agronómica de los resultados.

De acuerdo con Lillesand *et al.* (2015), las imágenes en el rango visible constituyen un insumo fundamental para el análisis temporal de la vegetación, especialmente cuando se dispone de series multitemporales con alta resolución espacial.

Algunos software utilizados para fotogrametría se detallan a continuación, los cuales permiten el procesamiento de imágenes aéreas adquiridas mediante RPAS para la generación de productos como ortomosaicos, modelos digitales de superficie y nubes de puntos, ampliamente empleados en aplicaciones agrícolas, ambientales y territoriales. Estos programas integran algoritmos de reconstrucción fotogramétrica y análisis geoespacial que, según Remondino *et al.* (2017), constituyen la base tecnológica para transformar imágenes superpuestas en información métrica y cartográfica de alta resolución, facilitando su uso en estudios de agricultura de precisión y monitoreo de cultivos.

PIX4D es una empresa suiza que desarrolla software de **fotogrametría y mapeo geoespacial**, orientado a transformar imágenes en **mapas precisos** y **modelos 3D**. A continuación se describen sus principales productos y sus aplicaciones en el procesamiento fotogramétrico y cartográfico para generar mapas, modelos 3D y otros entregables geoespaciales a partir de imágenes capturadas por drones u otras plataformas:

PIX4Dmapper. Es el software central de la suite de **PIX4D**, diseñado para el procesamiento fotogramétrico avanzado de imágenes aéreas y terrestres (desktop). Este producto transforma colecciones de imágenes superpuestas en **ortomosaicos georreferenciados**, **nubes de puntos densas**, **modelos digitales de superficie (MDS/DSM)** y **modelos digitales de terreno (MDT)**, así como reconstrucciones 3D de alta precisión para mediciones espaciales (p. ej., distancias, áreas y volúmenes) y análisis cartográfico general (mapas y modelos tridimensionales).

PIX4Dfields. Es una herramienta especializada en **agricultura de precisión**, orientada al análisis rápido y eficiente de datos capturados sobre cultivos. Permite generar mapas de índice vegetativo y productos derivados (como ortomosaicos calibrados) para apoyar la toma de decisiones agronómicas (fertilización, estrés hídrico, vigor vegetal) directamente en el campo y en tiempos reducidos, siendo compatible con imágenes multiespectrales y RGB de alta resolución.

PIX4Dcloud. Consiste en una **plataforma de procesamiento y visualización en la nube** que automatiza la generación de mapas 2D y modelos 3D a partir de imágenes cargadas. Este servicio permite visualizar, medir, documentar y **compartir productos geoespaciales** sin depender de hardware local, facilitando el acceso colaborativo a ortomosaicos, nubes de puntos y modelos de elevación desde cualquier dispositivo con acceso a internet.

PIX4Dsurvey. Es una herramienta que integra **resultados fotogramétricos y datos LiDAR o nubes de puntos** para extraer elementos clave (como vectores, curvas de nivel y superficies) y facilitar la transición de datos fotogramétricos a plataformas CAD y GIS. Permite vectorizar y clasificar puntos, crear TIN (Triangulated Irregular Network) y exportar información lista para ingeniería y análisis topográfico detallado.

Otros software de fotogrametría y mapeo geoespacial utilizados profesionalmente, con una breve descripción de sus principales productos o funcionalidades y sus aplicaciones más comunes en el procesamiento de imágenes capturadas por drones o plataformas aéreas:

DJI Terra. Es una solución de fotogrametría desarrollada por DJI que procesa las imágenes capturadas por drones DJI para generar **ortofotos, modelos 3D y modelos de elevación**, con integración directa en el planificador de vuelos y herramientas de análisis para eficacia en agricultura, topografía y construcción.

Agisoft Metashape. Es un software independiente de fotogrametría ampliamente adoptado para generar **nubes de puntos densas, modelos 3D texturizados, ortomosaicos y modelos digitales de elevación** a partir de imágenes aéreas y terrestres (Agisoft Metashape, s/f). Su robustez y capacidad para manejar grandes volúmenes de datos lo hacen útil en topografía, arqueología y estudios ambientales, permitiendo análisis espaciales detallados, mediciones y reconstrucciones métricas de alta precisión.

DroneDeploy. Es una **plataforma en la nube** que automatiza el procesamiento de imágenes de drones para crear **mapas 2D, modelos 3D, mallas y nubes de puntos**, además de ofrecer herramientas para comparación temporal de mapas, mediciones de áreas y volúmenes, y análisis integrados (DroneDeploy, s/f). Su enfoque basado en la nube facilita la colaboración y la generación de entregables sin necesidad de un hardware local potente.

OpenDroneMap (y WebODM). Es un **software de fotogrametría de código abierto** que procesa imágenes aéreas para producir ortomosaicos, nubes de puntos, modelos digitales de elevación y reconstrucciones 3D. Su versión WebODM proporciona una **interfaz web accesible**, permitiendo analizar y visualizar los resultados sin depender de soluciones comerciales (OpenDroneMap, 2020).

ArcGIS Drone2Map (ESRI). Es una herramienta de la suite **ArcGIS** que convierte imágenes de drones en **ortomosaicos, modelos digitales de superficie y productos 3D**, integrándose directamente con los sistemas de información geográfica (SIG) de Esri para análisis espacial avanzado y gestión de datos geoespaciales en estudios territoriales y ambientales.

3DF Zephyr. Es un software capaz de generar **modelos 3D y ortomosaicos** a partir de fotografías sin necesidad de marcadores especiales, adecuado tanto para usuarios principiantes como avanzados. Su motor de reconstrucción permite crear modelos detallados en proyectos de arqueología, arquitectura y patrimonio, así como en aplicaciones cartográficas generales.

SimActive Correlator3D. Es un software comercial de fotogrametría que crea **ortomosaicos, nubes de puntos y modelos 3D** a partir de imágenes aéreas y satelitales. Se utiliza en proyectos que requieren **alta precisión** métrica, como la topografía a gran escala y cartografía profesional.

RealityCapture. Es un software especializado en reconstrucción 3D de alta velocidad y precisión que produce **modelos tridimensionales detallados** y productos geoespaciales integrados a partir de imágenes y escaneos múltiples, ideal para aplicaciones que requieren modelos complejos y detallados.

Estos productos conforman un ecosistema integrado que abarca desde la **captura de imágenes**, su **procesamiento fotogramétrico** y **modelado espacial**, hasta la **análisis especializado** y **distribución de resultados geoespaciales**, permitiendo su uso en agricultura, topografía, ingeniería, monitoreo ambiental, planificación territorial y otras disciplinas geomáticas.

EOSDA Crop Monitoring.

Plataforma web de monitoreo agrícola basado en imágenes satelitales que organiza el análisis por polígonos de campo (fincas/lotés), integra series temporales de índices y permite flujos operativos como *scouting* (verificación en campo) y generación de mapas para tasa variable (VRA). EOSDA documenta la disponibilidad operativa de índices: NDVI, NDRE, MSAVI, RECI, NDMI, etc., lo cual permitió construir series temporales comparables por finca. Esta plataforma integra la información del satélite **Sentinel-2** como su fuente primaria de datos ópticos multiespectrales, utilizando los productos del sensor MSI (Multispectral Instrument) para el monitoreo agrícola continuo a escala de parcelas y regiones.

En una primera etapa, la plataforma accede a las imágenes **Sentinel-2** corregidas atmosféricamente (nivel L2A), que proporcionan reflectancia de superficie (Bottom-Of-Atmosphere, BOA). El uso de estos productos es clave porque reduce la influencia de aerosoles, vapor de agua y variaciones de iluminación, permitiendo comparaciones temporales consistentes. En la documentación técnica se establece que Sentinel-2 L2A corresponde a datos “atmospherically corrected”, lo que los hace adecuados para análisis agrícolas multitemporales (European Space Agency [ESA], 2018).

Posteriormente, selecciona las bandas espectrales relevantes de Sentinel-2, principalmente las de 10 m y 20 m de resolución espacial, que incluyen el visible (azul, verde, rojo), el infrarrojo cercano (NIR) y las bandas red-edge, fundamentales para el análisis de vegetación. Estas bandas se utilizan para el cálculo automático de índices de vegetación, como NDVI, NDRE, MSAVI y otros, ampliamente empleados como proxies del vigor, estado nutricional y desarrollo fenológico de los cultivos. La base conceptual de estos índices se sustenta en que la vegetación sana refleja más energía en el NIR y absorbe en el rojo, principio ampliamente documentado en teledetección agrícola (Rouse *et al.*, 1974).

En una tercera etapa, la plataforma organiza las imágenes Sentinel-2 en series temporales, aprovechando la frecuencia de revisita de aproximadamente 5 días de la constelación. Este enfoque multitemporal permite a *EOSDA Crop Monitoring* identificar tendencias, anomalías y cambios abruptos en el estado del cultivo a lo largo del ciclo productivo. Metodológicamente, esta integración temporal es esencial para el seguimiento fenológico y la detección temprana de estrés, ya que “time series of vegetation indices are widely used to monitor crop dynamics” (Zhang *et al.*, 2022). Posteriormente, traduce los resultados espectrales en información agronómica operativa, integrando los mapas derivados de Sentinel-2 con capas de clima, precipitación y datos de campo cuando están disponibles. De esta forma, Sentinel-2 aporta la base observacional objetiva, mientras que EOSDA actúa como una plataforma de análisis e interpretación, orientada a la toma de decisiones agrícolas. En su documentación oficial, EOS Data Analytics indica que la plataforma se basa en datos satelitales, principalmente Sentinel-2, para ofrecer monitoreo continuo del estado de los cultivos (EOS Data Analytics, s/f).

Además de *EOSDA Crop Monitoring*, existen diversas **herramientas satelitales ampliamente utilizadas para el monitoreo agrícola y ambiental**, las cuales permiten analizar la dinámica temporal de los cultivos, estimar vigor vegetal y apoyar la toma de decisiones a distintas escalas espaciales. Entre las más relevantes se destacan las siguientes:

Sentinel Hub. Es una plataforma desarrollado por Sinergise, es una plataforma que facilita el acceso, la visualización y el procesamiento de imágenes satelitales, especialmente de Sentinel-1 y Sentinel-2, para aplicaciones de monitoreo territorial. (Sinergise) Permite generar composiciones multiespectrales, calcular índices de vegetación (p. ej., NDVI, NDRE, MSAVI) y realizar análisis multitemporales orientados al seguimiento de cultivos y del uso del suelo. (Sinergise) En particular, Sentinel-2 fue concebido para soportar aplicaciones agrícolas gracias a su resolución espacial y frecuencia de revisita adecuadas para el seguimiento de la vegetación. (Drusch et al., 2012)” (p. 26).

Google Earth Engine (GEE). Es una plataforma de **computación en la nube** que integra grandes volúmenes de **datos satelitales** (p. ej., Sentinel, Landsat y MODIS) con herramientas avanzadas de **análisis geoespacial**, por lo que se utiliza ampliamente en investigación para análisis multitemporal de cobertura vegetal, detección de cambios y modelación espacial. Gorelick et al. (2017) señalan que GEE permite analizar **petabytes** de información geoespacial de forma eficiente, facilitando estudios ambientales y agrícolas a escalas local y global. (Gorelick et al., 2017)” (p. 345).

Planet Explorer (PlanetScope). Es la interfaz de acceso a los datos satelitales de Planet Labs, caracterizados por su **alta resolución espacial (3–5 m)** y **frecuencia diaria**. Esta herramienta es especialmente útil para el monitoreo detallado de cultivos, detección temprana de estrés y análisis de variabilidad intra-parcela, complementando la información obtenida con sensores de resolución media como Sentinel-2. De acuerdo con Houborg y McCabe (2018), la alta frecuencia temporal de PlanetScope mejora la capacidad de seguimiento del crecimiento y estado de los cultivos (p. 180).

CropSAT (Copernicus/ESA). Es una herramienta desarrollada en el marco del programa Copernicus que utiliza imágenes Sentinel-2 para apoyar la agricultura de precisión, principalmente en la gestión de fertilización nitrogenada. Permite generar mapas de biomasa y vigor vegetal a escala de parcela, orientados a la aplicación variable de

insumos. Como señalan Weiss *et al.* (2020), este tipo de plataformas “facilita la transferencia de información satelital a decisiones prácticas en campo” (p. 12).

OneSoil AI Platform. Es una plataforma digital que utiliza imágenes satelitales y algoritmos de aprendizaje automático para el monitoreo de cultivos, clasificación de parcelas y análisis del desarrollo fenológico. Aunque su enfoque es más operativo, se ha consolidado como una herramienta complementaria para el seguimiento del estado general del cultivo y la identificación de anomalías espaciales en tiempo casi real.

Estas herramientas satelitales amplían el espectro de análisis del monitoreo agrícola, permitiendo integrar información multiespectral y multitemporal que complementa los datos obtenidos mediante RPAS, especialmente para evaluaciones a escala de finca y regional.

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se describe la metodología utilizada para la realización del presente trabajo, se presenta una descripción de los métodos y procedimientos utilizados en la investigación. Se aborda el diseño del estudio, la selección de la muestra, los instrumentos de recolección de datos y las técnicas aplicadas para su análisis.

3.1. Área de estudio: delimitación espacial

3.1.1. Ubicación geográfica de los campos arroceros objetos de estudio

El estudio comprendió tres fincas arroceras ubicadas en la provincia La Vega, República Dominicana, específicamente en las localidades: **Jima Arriba, Rincón y Las Cabuyas** (Figura 8).

3.1.2. Caracterización agroclimática

Estas fincas se sitúan entre 60 y 68 m.s.n.m., rango altitudinal que influye en variables edafoclimáticas relevantes para el cultivo, como la dinámica hídrica, la temperatura del microambiente y los procesos de drenaje y acumulación de sales, lo que permite evaluar la respuesta del arroz en distintos microambientes y la heterogeneidad espacial de la disponibilidad de nutrientes y de la expresión fenológica.

Las localidades de estudio presentan un clima tropical húmedo, con temperaturas medias anuales entre 24 °C y 28 °C, máximas cercanas a 32 °C y mínimas alrededor de 18 °C. La precipitación anual promedio se sitúa entre 1,200 y 1,800 mm, concentrada principalmente de mayo a noviembre, y el fotoperíodo es cercano a 12 horas de luz diarias, condiciones favorables para el desarrollo de cultivos (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, s/f.).

Los suelos predominantes son Inceptisoles y Alfisoles, con texturas de franco-arenosa a franco-limosa y capacidad moderada de retención de agua y nutrientes, adecuados para agricultura intensiva, según análisis previos. La interacción de estas condiciones climáticas y edáficas incide directamente en la productividad de la región y constituye un factor clave para la planificación de cultivos y el manejo del recurso hídrico.

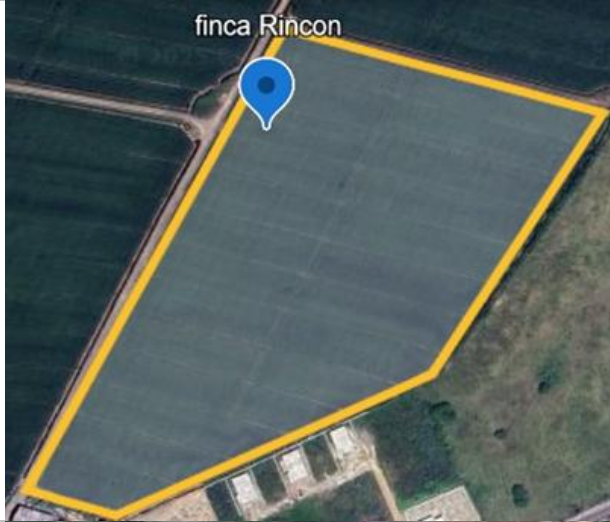
Ubicación satelital	Localidad/ coordenadas/ elevación
	Finca Jima Arriba, provincia La Vega Latitud: 19.152758 Longitud: -70.345230 Elevación: 60 msnm Área evaluada: 5.7 ha
	Finca Rincón, provincia La Vega Latitud: 19.130805 Longitud: -70.391480, Elevación: 66 msnm. Área evaluada: 5.9 ha
	Finca Las Cabuyas, provincia La Vega Latitud: 19.211814 Longitud:-70.402494, Elevación: 65 msnm Área evaluada: 5.8 ha

Figura 8. Imágenes satelitales de las parcelas objeto de estudio, ubicadas en la provincia La Vega.
 Fuente Google Earth, 2025.

3.1.3. Delimitación temporal

El estudio sobre la “Aplicación de Sistema de aeronave Pilotada Remotamente (dron) para el mapeo de nutrientes en arroz (*Oryza sativa* L.) a escala de fincas, comprendió un periodo de seis meses (junio-diciembre, 2025).

3.2. Tipo y diseño de investigación

El presente estudio fue un estudio es **descriptivo, no experimental y de enfoque mixto**, orientado a la utilización de un sistema de aeronave pilotada remotamente (RPAS-Dron) para la elaboración de mapas de distribución espacial de nutrientes del cultivo de arroz a escala de finca en la provincia La Vega.

El estudio se centró en la observación y registro de variables sin alterar los procesos naturales del cultivo, integrando datos cuantitativos (índices espectrales, análisis de laboratorio) y cualitativos (prácticas de manejo). Este enfoque permitió identificar patrones espaciales de nutrientes, evaluar la variabilidad dentro de las fincas y correlacionar estos datos con imágenes multispectrales, contribuyendo a la optimización de la fertilización y al manejo eficiente de los recursos sin modificar las condiciones existentes.

3.3. Materiales, equipos, métodos y procedimientos técnicos

Para alcanzar los objetivos establecidos, que incluyeron la determinación de los parámetros físico-químicos de suelos y aguas de riego de tres fincas de arroz en Jima Arriba, Rincón y Las Cabuyas, así como la captura y procesamiento de imágenes multispectrales mediante RPAS en distintas etapas fenológicas del cultivo, se implementó el siguiente procedimiento:

3.3.1. Características agronómicas y manejo del cultivo en las fincas de estudio

El Cuadro 5 resume la **caracterización agronómica y de manejo del arroz** en las fincas Jima Arriba, Rincón y Las Cabuyas durante la campaña 2025, incluyendo las variedades empleadas por los productores. También, en Cuadro 5 se presenta fecha de establecimiento del cultivo, modalidad y densidad de siembra, superficie sembrada y cultivada, además, del área que fue evaluada en este estudio. Asimismo, presenta fecha de cosecha y duración del ciclo del cultivo, como base técnica para interpretar de manera

comparable los resultados de RPAS, satélite y análisis nutricionales. En las tres fincas, la siembra se estableció en julio de 2025 y la cosecha en noviembre de 2025, con ciclos relativamente cercanos (107–117 días) (115–117 días para LCR Juma 69-20 y 107 días para Paladar). El área promedio evaluada fue fue de 5.8 ha.

Cuadro 5. Caracterización agronómica y de manejo del cultivo de arroz en las fincas evaluadas (Jima Arriba, Rincón y Las Cabuyas; 2025).

Actividad	Finca		
	Jima Arriba	Rincón	Las Cabuyas
Variedad de arroz	LCR Juma 69-20	LCR Juma 69-20	Paladar
Fecha de siembra	15-jul-2025*	10-jul-2025	30-jul-2025
Modalidad de siembra	Trasplante	Siembra directa (al voleo)	Siembra directa (al voleo)
Densidad de siembra (kg/ha)	94	87	108
Superficie sembrada/ cultivada (ha)	120	70	100
Superficie evaluada (ha)	5.7	5.9	5.8
Fecha de cosecha	07-nov-2025	04-nov-2025	14-nov-2025
Ciclo del cultivo (dds)	115	117	107

dds=días después de la siembra. *Semillero: entre 20-30 días antes de la siembra.

En cuanto al material genético, Jima Arriba y Rincón sembraron la variedad LCR Juma 69-20, mientras que Las Cabuyas utilizó Paladar. Destacar que, la variedad de arroz Juma 6920 (LRC Juma 6920), innovación dominicana cuyo nombre alude a Limpia, Rinde y Calidad, se caracteriza por alta productividad, facilidad de control de malezas y arroz indeseable (asociada a su resistencia a herbicidas) y buena calidad de grano, con un ciclo corto a intermedio (90–120 días). Por su parte, la variedad Paladar destaca por alto rendimiento (8–9 t/ha), ciclo medio a temprano ($\approx$ 100–120 días), grano largo a extra-largo con buena cocción “graneada”, calidad molinera y resistencia moderada a enfermedades, lo que favorece su uso en producción comercial en Latinoamérica.

3.3.2. Características físico-químicos de suelos (inicial y final) y agua de riego

En las tres fincas de estudio se realizaron dos muestreos de suelos (antes de la siembra y previo a la cosecha) y un muestreo de agua de riego en un único momento. En el muestreo de suelos, los puntos de muestreo se definieron según las unidades de manejo de cada finca y se georreferenciaron, considerando la heterogeneidad del terreno en función de textura, topografía y manejo agrícola previo, con el fin de capturar la variabilidad espacial del suelo (Gudelj *et al.*, 2018).

En cada unidad de manejo se tomaron siete submuestras de suelo con un barreno tipo Edelman (Figura 9), a 0–30 cm de profundidad, antes del establecimiento del cultivo y antes de la cosecha, siguiendo un patrón en zigzag y evitando caminos, accesos y bordes.



Figura 9. Instrumento utilizado para el muestreo de suelo: barreno Edelman.
Fuente: Recursos de Google (2025).

Las submuestras de cada unidad se depositaron en una cubeta, se homogeneizaron y se obtuvo una muestra compuesta representativa, de la cual se separó aproximadamente 1 kg de suelo. Esta fracción se colocó en bolsas tipo ziploc rotuladas con datos de finca, ubicación, fecha, productor y número de campo, y se mantuvo en un lugar fresco hasta su envío a un laboratorio especializado, donde se analizaron con métodos estándar de caracterización físico-química, generando información cuantitativa comparable entre fincas y condiciones de manejo.

En paralelo, se tomaron muestras de agua en puntos representativos de las fuentes de riego (canales, pozos o tomas principales), preservadas según indicaciones del laboratorio y analizadas para pH, conductividad eléctrica, alcalinidad, sales disueltas y cationes/aniones mayoritarios, conforme a protocolos para agua de riego (Estefan *et al.*, 2013; Oregon State University, 2019). Las muestras se tomaron en frascos previamente lavados y desinfectados, etiquetados con fecha, ubicación georreferenciada y nombre del productor, siguiendo protocolos internacionales para muestreo de aguas con fines fisicoquímicos (Salgado-García *et al.*, 2006; APHA, 2017). Los frascos se sumergieron a ≈ 30 cm de profundidad, evitando superficie y fondo; luego se cerraron herméticamente y se conservaron en nevera portátil con hielo (≈ 4 °C), protegidos de la luz y de contaminación cruzada, hasta su traslado al laboratorio (WHO, 2022).

Las muestras de suelo y agua se enviaron al Laboratorio AGQ ACPE Dominicana®, donde se analizaron parámetros solicitados. tales como: pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO), textura, CIC y nutrientes esenciales (N, P, K, Ca, Mg, entre otros), conforme a sus protocolos preestablecidos. El uso de un laboratorio acreditado garantizó que los análisis se realizaran bajo normas analíticas reconocidas, con control de calidad interno y métodos validados.

El índice de sodicidad de adsorción (SAR o RAS) del agua se calculó a partir de las concentraciones de Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} (en meq/L), utilizando la ecuación propuesta por la U.S. Salinity Laboratory (Ayers y Westcot, 1985):

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{0.5 (Ca^{2+} + Mg^{2+})}}$$

3.3.3. Captura de imágenes mediante RPAS (dron) en distintas etapas fenológicas del cultivo de arroz e índices visibles (RGB)

3.3.3.1. Plataforma RPAS utilizada en el estudio y especificaciones técnicas y placa de calibración para imágenes multiespectrales

Se utilizó el dron **DJI Mavic 3 Multispectral (Mavic 3M)** para capturar imágenes en **cuatro etapas fenológicas** del arroz, orientadas al diagnóstico nutricional y monitoreo del vigor. El equipo integra una cámara **RGB** y un sensor **multiespectral** calibrado, sincronizados con **RTK** para asegurar alta precisión de georreferenciación (DJI, 2023a). Además, se empleó una **placa de calibración Micasense®** (Figura 10): antes de cada vuelo se fotografió la placa para convertir valores crudos a **reflectancia** y corregir variaciones de iluminación, mejorando la representatividad de índices como **NDVI** y **GNDVI** (Figura 10).

Las especificaciones técnicas se detallan en el Cuadro 6. La cámara RGB, con un sensor CMOS de 4/3" y 20 megapíxeles, permite generar ortomosaicos de alta resolución, mientras que el módulo multiespectral incluye cuatro cámaras de 5 MP para capturar reflectancias en el espectro visible e infrarrojo cercano, con un sensor de irradiancia solar para corregir las imágenes y asegurar la uniformidad de los datos entre vuelos (DJI, 2023b).



Figura 10. DJI Mavic 3 Multispectral y placa de calibración reflectante Micasense utilizada para garantizar la consistencia radiométrica de las imágenes multispectrales.

Fuentes: <https://ag.dji.com/mavic-3-m>; <https://store.hp-drones.com/es/rededge-p/567-micasense-calibrated-reflectance-panel-crp-8434888642368.html>

Cuadro 6. Especificaciones técnicas del dron multispectral DJI Mavic 3M.

Especificaciones	Detalle
Modelo	DJI Mavic 3 Multispectral
Tipo	Dron multispectral
Peso	Aproximadamente 900 g
Dimensiones	221 × 96.3 × 90.3 mm (plegado)
Autonomía de vuelo	Hasta 43 minutos
Velocidad máxima	19 m/s (aproximadamente 68 km/h)
Altura máxima de vuelo	6000 m (por encima del nivel del mar)
Cámara multispectral	4 sensores de imágenes en diferentes bandas espectrales (RGB, NIR, RedEdge)
Resolución de la cámara	4K (3840 × 2160 píxeles) en RGB; 640 × 512 píxeles en NIR
Rango espectral	RGB (Red: 640-690 nm, Green: 530-550 nm, Blue: 400-480 nm); NIR (850-880 nm)
Campo de visión	82.9° en RGB; 73.8° en NIR
Capacidad de almacenamiento	8 GB internos (expandible con tarjeta microSD)
Sensores de obstáculos	Sensores en la parte delantera, trasera, superior e inferior
Sistema de navegación	GPS, GLONASS, Galileo
Conectividad	Wi-Fi, OcuSync 3.0
Temperatura operativa	-10°C a 40°C
Duración de la batería	5000 mAh, LiPo
Modo de vuelo	Manual, GPS, Follow Me, Waypoints, Panorama
Aplicación compatible	DJI Pilot App

Fuente: <https://ag.dji.com/mavic-3-m/specs>

3.3.3.2. Planificación y ejecución de vuelos con dron

Se empleó un sistema de aeronave pilotada remotamente (RPAS) equipado con cámara RGB, con el que se realizaron vuelos sobre las tres fincas de arroz en distintas etapas fenológicas del cultivo. La planificación de los vuelos se realizó mediante software de misión de vuelo **DJI Pilot 2** (Figura 11), diseñada para el control profesional del dron **DJI Mavic 3M**.

3.3.3.3. Configuración de planes de vuelos

Las misiones RPAS (vuelos) se planificaron y ejecutaron siguiendo un esquema de monitoreo temporal a lo largo del ciclo del cultivo de arroz, en coherencia con la estructura de sus etapas fenológicas y con las recomendaciones para agricultura de precisión (Mulla, 2013b; Sishodia *et al.*, 2020).

Los planes de vuelo se configuraron de modo que se asegurara un solape longitudinal y transversal suficiente ($\approx 75\%$) y una altura de vuelo constante entre 60 y 80 m, con el fin de obtener imágenes con resolución espacial adecuada y minimizar errores geométricos (Figura 11), en concordancia con las prácticas recomendadas para fotogrametría con RPAS en agricultura de precisión (Wang *et al.*, 2025a; Kior *et al.*, 2024). Las rutas automáticas definidas en la aplicación garantizaron la cobertura completa de las parcelas y la calidad de los mosaicos ortorrectificados generados.



Figura 11. Planificación de vuelo en plataforma de operación de vuelo DJI Pilot 2 (arriba) y plan de vuelo registrado en Jima Arriba (abajo).

3.3.3.4. Flujograma de trabajo para la captura de imágenes con dron en distintas etapas fenológicas del cultivo de arroz y análisis de información obtenida

El estudio se estructuró como un flujo de trabajo sistemático y replicable, ejecutado en tres fincas de arroz ubicadas en la provincia de La Vega. Este proceso se dividió en tres fases clave: i) adquisición de datos multimodales en campo, ii) procesamiento de la información geoespacial para generar productos analizables y, iii) análisis de correlación estadística entre las variables agronómicas y los datos de teledetección (Figura 12). El protocolo metodológico fue diseñado para alcanzar los objetivos específicos b y c, planteados en el apartado 1.5.2 de este documento.



Figura 12. Representación esquemática para la obtención de mapeo de nutrientes en arroz con drones y satélites.

Fuente: Elaborado con NotebookLM, 2025.

3.3.4. Monitoreo mediante RPAS según fecha de captura (calendario) y etapas fenológicas evaluadas

3.3.4.1. Captura de imágenes en distintas etapas fenológicas

Se realizaron mediciones temporales repetidas mediante cuatro campañas de vuelo en distintas fases fenológicas del cultivo: **vegetativa**, **reproductiva** y **maduración**, abarcando al menos las etapas de macollamiento, elongación de tallos, floración y llenado de grano, con el propósito de capturar la dinámica temporal del estado del cultivo.

Antes de cada misión, el RPAS se calibró radiométricamente utilizando la placa Micasense (Figura 10), con el propósito de asegurar la consistencia de la reflectancia y minimizar los efectos de las variaciones en las condiciones de iluminación (Honkavaara *et al.*, 2021a). Los vuelos se ejecutaron en horario matutino (7:30–11:30 h), a fin de reducir la variación en el ángulo de incidencia de la radiación solar y la presencia de sombras proyectadas sobre el cultivo, en concordancia con las recomendaciones para estudios de teledetección en agricultura de precisión (Campbell & Wynne, 2011; Mulla, 2013a). En cada fecha y finca se registraron de forma sistemática imágenes RGB georreferenciadas. Adicionalmente, las misiones solo se llevaron a cabo bajo condiciones de cielo despejado o con nubosidad ligera, y en ausencia de lluvia o vientos fuertes, con el objetivo de garantizar la estabilidad del RPAS y la consistencia de la radiancia registrada.

El Cuadro 7 presenta el calendario de vuelos RPAS realizado en las fincas evaluadas, evidenciando una programación temporal común para tres campañas (Vuelos 1–3) ejecutadas en las mismas fechas (26-ago, 23-sep y 07-oct 2025) en Jima Arriba, Rincón y Las Cabuyas, lo cual favorece la comparación inter-fincas al reducir diferencias por fecha de adquisición. La cuarta campaña mantuvo la misma fecha para Jima Arriba y Rincón (31-oct 2025), mientras que en Las Cabuyas se efectuó el 11-nov 2025.

Cuadro 7. Calendario de vuelos RPAS por finca, según fecha de captura (campaña 2025).

No. vuelo con dron (DJI Mavic 3M)	Fecha de vuelo / finca, año 2025		
	Jima Arriba	Rincón	Las Cabuyas
Vuelo 1	26-ago	26-ago	26-ago
Vuelo 2	23-sep	23-sep	23-sep
Vuelo 3	07-oct	07-oct	07-oct
Vuelo 4	31-oct	31-oct	11-nov

Los vuelos se distribuyeron en cuatro etapas del cultivo: Vuelo 1 en fase vegetativa; Vuelos 2 y 3 en fase reproductiva temprana y avanzada, respectivamente; y Vuelo 4 en maduración/llenado. Esta clasificación por DDS permite analizar la dinámica temporal del vigor (RGB) y vincularla con los muestreos foliares y las observaciones satelitales de cada campaña.

El Cuadro 8 presenta la conversión de las fechas de captura a DDS (días después de la siembra), lo que permite ubicar cada vuelo dentro de la dinámica fenológica del arroz y estandarizar la comparación entre fincas, pese a sus diferentes fechas de establecimiento. En Jima Arriba, los vuelos se realizaron a los 42, 70, 84 y 108 DDS; en Rincón, a los 47, 75, 89 y 113 DDS; y en Las Cabuyas, a los 27, 55, 69 y 104 DDS.

Cuadro 8. Programación de vuelos con dron (DDS: días después de la siembra) por etapa fenológica.

Finca	N.º de vuelo del dron (días después de la siembra) y etapa			
	Vuelo 1	Vuelo 2	Vuelo 3	Vuelo 4
Etapa fenológica	Vegetativa	Reproductiva temprana	Reproductiva avanzada	Maduración
Jima Arriba	42	70	84	108
Rincón	47	75	89	113
Las Cabuyas	27	55	69	104

3.3.4.2. Recolección de tejido vegetal para análisis nutricional y nutrientes evaluados

Inmediatamente después de cada vuelo y para cada etapa fenológica evaluada, se realizó **muestreo destructivo** de tejido vegetal en puntos previamente **georreferenciados**. El muestreo foliar se basó en **hojas representativas** del cultivo (p. ej., **hoja bandera**), seleccionadas bajo criterios de **homogeneidad** de edad y posición en la planta. Las hojas se **cortaron con tijeras**, se **envasaron en bolsas** y se **almacenaron de inmediato en una nevera a temperatura controlada** para evitar deshidratación y cambios en el contenido de nutrientes, preservando la representatividad del estado nutricional (Marschner, 2012). Posteriormente, las muestras se trasladaron a un **laboratorio especializado y certificado**, donde se determinaron en tejido foliar los contenidos de **nitrógeno total (N-total)**, **fósforo (P)**, **potasio (K)**, **calcio (Ca)**, **magnesio (Mg)** y **azufre (S)**, siguiendo protocolos estandarizados de secado, molienda y digestión que aseguran exactitud y reproducibilidad (Lata-Tenesaca et al., 2017). Los resultados se expresaron en % o **mg/kg**.

3.3.4.3. Cálculo de índices visibles (RGB) sobre el ortomosaico

Se calculan píxel a píxel usando **Raster Calculator** (QGIS/ArcGIS) o scripts (Python/R). Se recomienda trabajar con **R, G, B (red, green, blue)** como bandas en reflectancia o valores normalizados. Se utilizaron las siguientes fórmulas operativas:

VARI (*Visible Atmospherically Resistant Index*): Se utiliza para enfatizar vegetación en el visible usando las tres bandas (Sewiko y Sagala, 2022).

$$VARI = \frac{G - R}{G + R - B}$$

TGI (*Triangular Greenness Index*; forma práctica RGB): esta forma se emplea como aproximación de banda ancha en aplicaciones RGB, asociada al planteamiento de Hunt *et al.* (2013) para verdor/clorofila a escala de dosel.

$$TGI = G - 0.39R - 0.61B$$

GLI (*Green Leaf Index*): índices para discriminar vegetación verde (Index Database, s./f).

$$GLI = \frac{2G - R - B}{2G + R + B}$$

GRVI (*Green-Red Vegetation Index*)/**NGRDI** (*Normalized Green-Red Difference Index*). En la práctica pueden ser algebraicamente equivalentes; GRVI se usa ampliamente para fenología/verdor en visible (Motohka *et al.*, 2010), y NGRDI se usa en estudios UAV-RGB como índice normalizado verde-rojo (Du & Noguchi, 2017).

$$GRVI = \frac{G - R}{G + R} \quad ; \quad NGRDI = \frac{G - R}{G + R}$$

3.3.5. Análisis imágenes de RPAS/dron e imágenes satelitales y Productos fotogramétricos RGB (Ortomosaico RGB por vuelo)

Se emplearon **Pix4Dmapper®** y **Pix4Dfields®** (licencias de prueba, con limitaciones de análisis) para el procesamiento y análisis fotogramétrico y **EOSDA Crop Monitoring®** (licencia de pago) para la obtención de índices satelitales. Estos productos se utilizaron como referencia para comparar los mapas satelitales, debido a su mayor detalle espacial y precisión geométrica, fundamentales para calibrar y validar los índices de vegetación derivados de imágenes satelitales.

3.3.5.1. Procesamiento fotogramétrico en Pix4Dmapper

El software Pix4Dmapper (versión 4.10.0) se utilizó para el procesamiento de las imágenes RGB capturadas con el dron DJI Mavic 3M, con el fin de generar productos fotogramétricos de alta resolución:



Ortomosaico RGB y Modelo Digital de Superficie (MDS). El procedimiento inició con la importación de las imágenes georreferenciadas y la configuración del sistema de coordenadas (UTM WGS84, zona correspondiente a la finca). A partir de ello, se ejecutó el flujo de procesamiento estructurado en tres fases:

- **Alineación y calibración (*Initial Processing*):** permitió el emparejamiento de imágenes, el cálculo de las posiciones de cámara y la generación del modelo inicial, con verificación de calidad mediante el *Quality Report* (número de imágenes calibradas, error de reproyección y **RMSE** de los **GCP**).
- **Construcción de nube de puntos densa (*Point Cloud and Mesh*):** a partir del modelo ajustado, se densificaron los puntos 3D, generando una base geométrica precisa para la ortorrectificación.
- **Generación de productos derivados (MDS y ortomosaico):** se obtuvo el **Ortomosaico RGB** y el **Modelo Digital de Superficie (MDS)** con resolución centimétrica (GSD 2.5–3 cm/píxel).

3.3.5.2. Análisis agronómico en Pix4Dfields

Los ortomosaicos RGB generados en Pix4Dmapper se importaron a Pix4Dfields: el primero aportó la precisión geométrica y radiométrica, y el segundo facilitó la interpretación agronómica y el vínculo operativo con las observaciones satelitales. Dentro de este entorno se aplicaron los siguientes procedimientos:



- **Cálculo de índices de vegetación (VARI, TGI):** utilizando las bandas visibles del ortomosaico RGB, se generaron mapas de vigor que permitieron identificar diferencias espaciales en el desarrollo del cultivo de arroz.
- **Zonificación y comparación temporal:** se delimitaron zonas homogéneas por vigor y se compararon los patrones espaciales con los mapas satelitales de *EOSDA Crop Monitoring*, considerando las fechas de vuelo y de adquisición satelital más próximas.

3.3.5.3. Índices satelitales (EOSDA Crop Monitoring)

Para el cálculo de índices satelitales se utilizó **EOSDA Crop Monitoring** (licencia profesional, activa por un mes). En primer lugar, cada finca se delimitó como un polígono (**AOI**) y se registraron los metadatos del ciclo (cultivo y fechas de establecimiento y cosecha), garantizando que los índices y sus estadísticas se estimaran de forma consistente sobre la misma unidad espacial y que la serie temporal mantuviera coherencia agronómica para interpretar el vigor a lo largo del ciclo.



Posteriormente, se seleccionaron los índices pertinentes al objetivo del estudio (**NDVI** para vigor general; **NDRE/RECI** para sensibilidad a clorofila; **MSAVI** para minimizar el efecto del suelo en baja cobertura; y **NDMI** para condición hídrica) y se aplicó control de calidad de escenas (nubosidad, sombras y artefactos). Finalmente, para integrar la información satelital con los vuelos **RPAS** y los muestreos foliares, se definió una regla de emparejamiento temporal: **seleccionar la escena válida más cercana a cada fecha de vuelo/muestreo dentro de una ventana de ± 3 a ± 10 días.**

3.3.6. Componentes de producción y rendimiento del cultivo de arroz

3.3.6.1. Cosecha del cultivo en campo

La cosecha se efectuó a **madurez fisiológica**, determinada por el cambio de color de las panojas y el **endurecimiento** de los granos apicales. En cada unidad de estudio se delimitó **1 m²** con un marco de PVC dentro de la parcela útil (evitando bordes) y se cosecharon las plantas completas, **cortadas a nivel del cuello** con segadora; el procedimiento se repitió en **tres puntos representativos** por finca.

3.3.6.2. Manipulación de material cosechado

El material recolectado se **etiquetó** y se trasladó al **Centro Norte del IDIAF** para su **limpieza y separación de panículas**. Luego se estimaron los **componentes de rendimiento**: panículas productivas m⁻², granos por panícula, granos llenos, % de llenado y peso de 1 000 granos, según criterios del **IRRI** y literatura especializada (Bouman *et al.*, 2002; Laza *et al.*, 2004; He *et al.*, 2024).

3.3.6.3. Componentes de producción y rendimiento

Número de panículas por metro cuadrado (panículas/m²). Se contó el total de panículas emitidas por las plantas incluidas en el marco de PVC de 1 m². El valor se expresó como número de panículas/ m² para cada sub-unidad de muestreo.

Longitud de panícula (cm). Se seleccionaron seis submuestras de 25 panículas representativas por cada sub-unidad muestreada, para un total de 150 panículas. En cada panícula se midió la longitud desde la inserción en el tallo hasta el extremo apical, utilizando una regla milimetrada, y se calculó el promedio por tratamiento.

Número de ramificaciones por panícula (ramas/panícula). En las mismas panículas utilizadas para LP se contó el número total de ramas primarias (y secundarias, si se consideró pertinente) por panícula. Con estos datos se obtuvo el valor medio por tratamiento.

Número de granos producidos por panícula (granos/panícula). Para cada panícula seleccionada se contó el número total de granos emitidos (llenos + vanos), registrando el valor por panícula y el promedio por tratamiento.

Número de granos cosechados por panícula (granos llenos/panícula). Posteriormente se separaron los granos llenos de los vanos mediante inspección visual y/o flotación en agua. Se contó el número de granos llenos por panícula y se promedió por tratamiento.

Peso de 1,000 semillas (g). A partir de la fracción de granos limpios y secos (humedad ajustada a un valor de referencia según la norma aplicada), se tomaron al azar submuestras de 1,000 semillas por tratamiento. Cada muestra se pesó en balanza de precisión y se registró el peso en gramos; cuando se realizaron varias repeticiones, se utilizó el promedio.

Pureza física de la semilla (%). De la muestra cosechada se tomó una submuestra conocida (100 g) y se separaron manualmente las fracciones de: (a) semillas puras de arroz y (b) impurezas (restos de paja, granos partidos, semillas de otras especies y material inerte). La pureza se calculó como:

$$PP(\%) = \frac{\text{peso de semillas puras}}{\text{peso total de la muestra}} \times 100$$

Porcentaje de germinación (%). Se estableció una prueba de germinación en laboratorio con una submuestra de semillas representativa por tratamiento. Las semillas se colocaron en papel húmedo o sustrato apropiado, bajo condiciones controladas de temperatura y humedad. Transcurrido el período de evaluación definido para la especie, se contó el número de plántulas normales. El porcentaje de germinación se calculó como:

$$\text{Porcentaje de germinación (\%)} = \frac{\text{Número de semillas germinadas (o plántulas normales)}}{\text{Número total de semillas evaluadas}} \times 100$$

Productividad: peso total (t/ha), rendimiento ajustado (T/ha, Kg/parcela). El objetivo de este análisis descriptivo fue caracterizar la distribución de los datos e identificar valores atípicos o asimetrías. Además, se registraron el peso total del cultivo (t/ha), el rendimiento ajustado (t/ha) y los kg por parcela, variables utilizadas para correlacionar los índices espectrales con el rendimiento.

Los cálculos utilizados fueron los siguientes:

Rendimiento de grano. A partir de la cosecha del metro cuadrado, el peso de grano limpio y seco se expresó en g/m y se extrapoló a kg/ha y t/ha mediante el factor de conversión correspondiente, en caso de que esta variable se incorpore explícitamente dentro de los componentes de producción.

Rendimiento de grano ajustado. Para calcular el rendimiento ajustado se consideró la humedad del grano inicial de 20 % y la humedad final de 14 %, utilizando la siguiente fórmula para cada uno de los valores:

$$\text{Rendimiento ajustado} = \frac{\text{Peso total (t/ha)}}{1 + (\text{Porcentaje de humedad inicial} - \text{Porcentaje de humedad final})}$$

3.4. Procesamiento y análisis de la información

3.4.1. Recolección de datos espectrales y nutricionales

El análisis se basó en datos de índices espectrales y nutrientes foliares obtenidos de tres fincas de arroz ubicadas en diferentes localidades: Jima Arriba, Rincón y Las Cabuyas. Los índices espectrales incluyeron **NDVI**, **NDRE**, **MASAVI**, **RECI** y **NDMI**) obtenidos a partir de imágenes adquiridas por un sistema RPAS (dron) durante cuatro fechas de vuelo (Ver Anexo 3).

3.4.2. Análisis estadístico y descriptivo de los datos

El análisis estadístico se realizó con el **software InfoStat**, aplicando un análisis de varianza (**ANOVA**) y, cuando se detectaron diferencias significativas, la comparación de medias se efectuó mediante la prueba de **Tukey** con un nivel de significancia del 5% ($\alpha = 0.05$). Se realizó análisis descriptivo que incluyeron media, desviación estándar, valor mínimo y máximo y percentiles.

3.4.3. Análisis de correlación

Para evaluar la relación entre los índices espectrales, los nutrientes foliares y el rendimiento ajustado, se aplicó un análisis de correlación de Pearson (fuerza y dirección de la relación lineal) por finca. Se estimaron correlaciones índice–nutrientes para identificar su asociación con el estado nutricional, y índice–rendimiento para valorar su capacidad predictiva. Estas correlaciones permitieron detectar patrones útiles sobre la salud del cultivo y posibles necesidades de fertilización.

3.4.4. Comparación con rangos deseados

Los nutrientes foliares se compararon con rangos de suficiencia para arroz reportados en la literatura, clasificándolos como deficientes, adecuados o excesivos. Esta referencia permitió verificar si los valores por finca se ubicaban en niveles óptimos e integrar su interpretación con los índices espectrales y el rendimiento, sustentando recomendaciones de manejo nutricional.

3.4.5. Visualización de los Datos

Para la interpretación de los resultados, se utilizaron **cuadros** para organizar los datos como base del análisis, **mapas derivados de imágenes RPAS y satelitales** para representar la distribución espacial de los índices NDVI, NDRE, MSAVI, RECI y NDMI e identificar la variabilidad intra-parcela y zonas de estrés, deficiencia o alta productividad, y se complementó con **gráficos de dispersión** para evaluar la relación entre los índices espectrales y el rendimiento ajustado (t/ha), una **matriz de correlación** para analizar conjuntamente variables espectrales y nutricionales e identificar correlaciones significativas, y **boxplots** para describir la distribución y variabilidad de índices y nutrientes foliares por finca, detectando posibles valores atípicos.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES

El Capítulo IV presenta y analiza los resultados del estudio sobre la “Aplicación de una aeronave pilotada remotamente para el mapeo de nutrientes en arroz en fincas de la provincia La Vega.” Los hallazgos se muestran mediante tablas, figuras, gráficos y mapas derivados de la integración de datos espectrales, edáficos, foliares y productivos. Además, se desarrolla una discusión crítica sustentada en literatura científica, evaluando cómo la aplicación de RPAS, las prácticas de manejo, la disponibilidad de nutrientes y las condiciones físico-químicas del suelo y del agua explican la variabilidad del vigor del cultivo y la productividad del sistema arrocero.

4.1 Resultados Objetivo 1. Parámetros físico-químicos de suelos y agua de riego provenientes de tres fincas de arroz ubicadas en: Jima Arriba, Rincón y Las Cabuyas

A continuación se analizan las propiedades físico-químicas de los suelos (antes de la siembra del cultivo y próximo a la cosecha) y las aguas de riego de las fincas estudiadas,

4.1.1. Características físico-químicas presentada en los suelos estudiados

El Cuadro 9 presenta las propiedades físico-químicas inicial y final de los suelos en las fincas arroceras evaluadas, procedentes de Jima Arriba, Rincón y Las Cabuyas.

4.1.1.1. Textura y fracciones granulométricas

Los tres suelos evaluados presentan texturas finas, típicas de sistemas arroceros bajo inundación, pero con diferencias importantes entre localidades. Jima Arriba y Las Cabuyas se clasifican como suelos arcillosos, con contenidos de arcilla de 50–55 % y 65 % respectivamente, mientras que Rincón presenta una textura arcillo-limosa, con mayor proporción de limo 50–40 % y menor contenido de arcilla 30–40 % (Cuadro 9). Estos valores indican que todas las fincas disponen de suelos con alta capacidad de retención de agua, condición favorable para el cultivo de arroz, aunque se espera una mayor capacidad de retención hídrica y de nutrientes en Las Cabuyas por su contenido de arcilla superior a 60 %. En términos temporales, no se observan cambios relevantes en la textura entre muestreos inicial y final, lo que es coherente, dado que la textura es un atributo prácticamente estable a escala de ciclo de cultivo.

Cuadro 9. Propiedades físico-químicas inicial y final de suelos procedentes de tres fincas arroceras ubicadas en Jima Arriba, Rincón y Las Cabuyas, provincia La Vega, República Dominicana.

Parámetro	Unidades	Valores deseables	Muestras de Suelos/ finca					
			Jima Arriba		Rincón		Las Cabuyas	
			Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Textura	–		Arcillosa	Arcillosa	Arcillo-limosa	Arcillo-limosa	Arcillosa	Arcillosa
Arcilla	%		50	55	30	40	65	65
Limo	%		30	30	50	40	15	20
Arena	%		20	15	20	20,0	20	15,0
CE	µS/cm (1:5)	200-400	127.0	99.8	82.1	<70.0	315.0	433.0
pH	-	6.5-7.5-	6.8	6.3	6.9	7.1	8.3	7.9
			Ligeramente ácido		Neutro		Moderadamente alcalino	
Caliza activa	% CaCO ₃	2-4	<0.5	<0.5	<0.5	2.0	4.0	4.0
MO	%	1.20-2.00	4.1	4.5	3.4	3.0	4.7	4.7
N total	mg/kg	1,000-1,500	1,870.0	2,040	1,767.0	1,648	2,273.0	2,722
Relación C/N	–		12.8	12.8	11.2	10.7	12.0	10.0
P disponible (Olsen)	mg/kg		<9.8	<9.8	21.9	16.7	19.3	31.4
K disponible	meq/100 g	0.5-0.8	0.4	0.4	0.1	0.1	1.2	1.2
Ca disponible	meq/100 g	8-14	12.6	11.0	12.4	11.1	38.3	33.5
Mg disponible	meq/100 g	1.5-2.5	9.8	9.0	6.9	7.4	18.0	14.7
Na disponible	meq/100 g	0.25-0.75	0.3	0.3	0.2	0.2	1.9	1.8

Fuente: Resultados de análisis de laboratorio, 2025.

Leyenda: CE=conductividad eléctrica; MO=materia orgánica; N=nitrógeno; P=fósforo; K=potasio; Ca=Calcio; Mg=magnesio; Na=Sodio; C/N=carbono/nitrógeno

4.1.1.2. Conductividad eléctrica (CE) y sodio (Na) disponible

La CE mostró un patrón contrastante entre fincas: Jima Arriba presentó valores bajos y una ligera disminución ($127.0 \rightarrow 99.8 \mu\text{S/cm}$), Rincón se mantuvo en rangos igualmente bajos ($82.1 \rightarrow <70 \mu\text{S/cm}$) y Las Cabuyas registró los valores más altos, con incremento durante el ciclo ($315.0 \rightarrow 433.0 \mu\text{S/cm}$). Convertidos a dS/m ($\div 1000$), todos permanecen $<0.5 \text{ dS/m}$, por lo que se consideran no salinos para la mayoría de cultivos, incluido el arroz, cuya productividad suele afectarse con salinidades del extracto de saturación $>3\text{--}4 \text{ dS/m}$. No obstante, el aumento en Las Cabuyas sugiere mayor acumulación de sales solubles, posiblemente asociada a la calidad del agua de riego o al manejo de fertilizantes. Además, esta finca presentó el mayor Na intercambiable ($\approx 1.8\text{--}1.9 \text{ meq/100 g}$); sin la CICE no puede estimarse con rigor el riesgo de sodicidad, pero sí evidencia una mayor carga relativa de Na frente a Jima Arriba y Rincón (Cuadro 9).

4.1.1.3. Reacción del suelo (pH) y caliza activa

El pH difirió entre fincas: Jima Arriba se mantuvo cercana a neutralidad ($6.8 \rightarrow 6.3$) y Rincón en rango neutro–ligeramente alcalino ($6.9 \rightarrow 7.1$), ambos dentro del intervalo óptimo para arroz ($\approx 5.5\text{--}7.0$). Las Cabuyas presentó pH más alto ($8.3 \rightarrow 7.9$), manteniéndose moderadamente alcalino (>7.5), condición que puede reducir la disponibilidad de P, Zn y Fe. Esto concuerda con su mayor caliza activa ($\approx 4.0\% \text{ CaCO}_3$ vs $<0.5\text{--}2.0\%$ en las otras fincas) y sugiere un manejo cuidadoso del P (Cuadro 9).

4.1.1.4. Materia orgánica (MO), nitrógeno total (N-total) y relación C/N

La MO se ubicó en rangos moderados a relativamente altos: Jima Arriba ($4.1\text{--}4.5\%$), Rincón ($3.4\text{--}3.0\%$) y Las Cabuyas (4.7% estable), lo que sugiere buena contribución a la fertilidad, estructura y retención de agua bajo inundación. La relación C/N ($10.0\text{--}12.8$) indica MO bien humificada y con tendencia a mineralización neta de N ($\text{C/N} < 25$). El N total inicial fue alto en las tres fincas (Jima Arriba $1,870$; Rincón $1,767$; Las Cabuyas $2,273 \text{ mg/kg}$) y al final aumentó en Jima Arriba ($2,040$) y Las Cabuyas ($2,722$), mientras que en Rincón disminuyó levemente ($1,648 \text{ mg/kg}$), manteniéndose elevado. Los datos apuntan a alta reserva de N orgánico, aunque la interpretación temporal debe ser cautelosa por no contar con la fracción mineral (NO_3^- , NH_4^+) (Cuadro 9).

4.1.1.5. Fósforo disponible (P Olsen) y cationes intercambiables

El P disponible (Olsen) mostró tres escenarios. En Jima Arriba, los valores se mantuvieron <9.8 mg/kg al inicio y al final, indicando condición baja/deficitaria y por debajo de umbrales frecuentes para arroz ($\approx 9\text{--}20$ mg/kg), por lo que es esperable respuesta a fertilización fosfatada y conviene una estrategia de construcción de P en el suelo (Rathore et al., 2017; Ibrahim et al., 2021; Wang et al., 2023a). En Rincón, el P disminuyó de 21.9 a 16.7 mg/kg, cercano al rango óptimo (umbral promedio ≈ 17 mg/kg), lo que sugiere consumo por el cultivo y justifica una fertilización de mantenimiento (Bai et al., 2013; Wang et al., 2023a). En Las Cabuyas, el P aumentó de 19.3 a 31.4 mg/kg, superando el umbral agronómico y acercándose a niveles donde disminuye la probabilidad de respuesta y puede aumentar el riesgo de acumulación/pérdidas, por lo que se prioriza evitar sobrefertilización y mejorar la eficiencia de uso (Ibrahim et al., 2021; Wang et al., 2023a) (Cuadro 9).

4.1.1.6. Potasio disponible (K) y cationes intercambiables

El K disponible evidenció contrastes entre fincas. En Jima Arriba, 0.4 meq/100 g indica un nivel intermedio, compatible con una buena CICE y una provisión de K probablemente suficiente, aunque requiere reposición para sostener altos rendimientos. En Rincón, el K se mantuvo en 0.1 meq/100 g, un nivel bajo frente a rangos de suficiencia, por lo que podría actuar como factor limitante, considerando la alta extracción de K por grano y paja en arroz de riego (Horneck et al., 2011; Andrews, 2023). En Las Cabuyas, el K fue alto (1.2 meq/100 g), consistente con elevada saturación de bases en suelos arcillosos; por ello, la respuesta a incrementos adicionales sería poco probable y el manejo debería enfocarse en mantener más que en aumentar su nivel (Cuadro 9).

4.1.1.7. Cationes intercambiables: calcio (Ca), magnesio (Mg) y sodio (Na)

El Cuadro 9 muestra una buena saturación de bases en las tres localidades, con magnitudes distintas. Jima Arriba y Rincón presentan Ca $\approx 11\text{--}13$ meq/100 g y Mg $\approx 7\text{--}10$ meq/100 g, valores coherentes con su textura arcillosa y una CIC moderada–alta, favorable para la estabilidad estructural y la reserva de nutrientes (Horneck et al., 2011; Andrews, 2023).

En Las Cabuyas, los contenidos son mucho más altos (Ca 33.5–38.3; Mg 14.7–18.0 meq/100 g), lo que sugiere una arcilla muy rica en bases y probablemente una CIC elevada. Aunque esto favorece la nutrición cálcica y magnésica, la presencia de pH alcalino y caliza activa puede reducir la disponibilidad de micronutrientes (p. ej., Fe, Mn y Zn) en suelos calizos (Quesada-Moreno, 2022).

El Na intercambiable distingue con claridad a Las Cabuyas: mientras Jima Arriba y Rincón se mantienen en 0.2–0.3 meq/100 g, Las Cabuyas alcanza $\approx$ 1.8–1.9 meq/100 g (Cuadro 9). Sin datos de CIC no puede estimarse el ESP, pero el Na notablemente mayor, junto con pH cercano a 8 y caliza activa, sugiere mayor riesgo relativo de sodicidad, por lo que conviene integrar su manejo (calidad del agua, drenaje y, de ser necesario, enmiendas cálcicas) en la planificación del sistema (Andrews, 2023; Oregon State University Extension, 2024).

En conjunto, P Olsen, K, Ca, Mg y Na confirman diferencias marcadas de fertilidad química entre fincas: Jima Arriba con limitación fosfatada (P Olsen <9.8 mg/kg) y K intermedio (0.4 meq/100 g) orientado a mantenimiento; Rincón con P aún aceptable (21.9→16.7 mg/kg) pero K muy bajo (0.1 meq/100 g) como probable nutriente limitante; y Las Cabuyas con alta saturación de bases, P elevado (19.3→31.4 mg/kg), K alto (1.2 meq/100 g) y Na superior en un contexto alcalino, lo que implica riesgos de acumulación y posibles efectos de salinidad/sodicidad a mediano plazo. Estos contrastes sustentan la interpretación posterior de las diferencias en índices RGB/satelitales, estado nutricional y componentes de rendimiento bajo el manejo de cada finca (Cuadro 9).

4.1.2 Calidad físico-química del agua de riego

Los análisis de calidad físico-química del agua de riego en las tres fincas incluyeron CE, pH, cationes y aniones mayoritarios, alcalinidad, nutrientes disueltos, elementos traza y el cálculo del índice de adsorción de sodio (SAR) (Anexo 6; Cuadro 10). Estos parámetros permiten estimar el riesgo de salinidad, sodicidad y toxicidad iónica, según las guías de Ayers y Westcot (1985) y Catenazzo (2022).

Cuadro 10. Parámetros fisicoquímicos del agua de riego en tres fincas arroceras (Jima Arriba, Rincón y Las Cabuyas), provincia La Vega, República Dominicana..

Parámetro	Unidad	Valores deseables	Jima Arriba	Rincón)	Las Cabuyas
CE (25 °C)	dS/m	0.7-1.5	0.258	0.152	0.589
Ph	—	6.5-7.5	6.2	6.3	7.1
Calcio (Ca ²⁺)	mg/L	2-6	14.5	10.6	42.3
Magnesio (Mg ²⁺)	mg/L	0.5-2.5	13.9	6.96	28.4
Potasio (K ⁺)	mg/L	0-0.25	7.08	< 2.0	3.61
Sodio (Na ⁺)	mg/L	0-4	9.14	5.39	43.1
Alcalinidad	mg/L	0.5-3	97.2	68.0	251
Cloruros (Cl ⁻)	mg/L	0-4	14	< 10	23
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	0-0.8	15.9	< 10.0	11.9
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	0-6	10.4	< 10.0	49.9
Hierro (Fe)	mg/L	0-0.5	0.55	< 0.05	0.08
Boro (B)	mg/L	0-0.8	< 0.05	< 0.05	0.08
Cobre (Cu)	mg/L	0-0.5	< 0.05	< 0.05	< 0.05
Manganeso (Mn)	mg/L	0-0.5	< 0.05	< 0.05	< 0.05
Zinc (Zn)	mg/L	0-0.5	< 0.05	< 0.05	< 0.05
SAR (Na-adsorción)	—	< 3 (sin restricción)	0.4 (aprox.)	0.3 (aprox.)	1.3 (aprox.)

Fuente: Resultados de análisis de laboratorio, 2025.

La CE osciló entre 0.152 y 0.589 dS/m, clasificando las aguas entre baja salinidad (C1) y salinidad media-baja (C2) (USDA/FAO). El agua de Rincón (0.152 dS/m) se ubicó en C1, Jima Arriba (0.258 dS/m) en el límite inferior de C2 y Las Cabuyas (0.589 dS/m) en el rango medio de C2 (Cuadro 10). En conjunto, estos valores sugieren que la salinidad del agua no constituye una limitante para el arroz, cultivo moderadamente tolerante a sales (Chavarría-Salas, 2022).

El pH del agua se mantuvo entre 6.2 y 7.1, rango adecuado para aguas de riego, sin riesgo de acidificación o alcalinización severa de los suelos bajo condiciones de manejo convencional (Ayers & Westcot, 1985). Rincón y Jima Arriba presentan aguas ligeramente ácidas (pH 6.2–6.3), coherentes con su baja mineralización, mientras que Las Cabuyas registra un pH próximo a la neutralidad (7.1) (Cuadro 10), asociado a mayor alcalinidad y a un entorno hidroggeoquímico más calcáreo.

En términos de cationes y aniones, las concentraciones de sodio (5.39–43.1 mg/L) y cloruros (< 10–23 mg/L) (Cuadro 10) están muy por debajo de los niveles considerados críticos para la aparición de toxicidades foliares o restricciones severas (Ayers & Westcot,

1985). Las aguas de Las Cabuyas muestran mayores contenidos de Ca y Mg y una alcalinidad más elevada, lo cual es coherente con la presencia de suelos calcáreos en la finca y contribuye a mantener una solución de riego rica en Ca y Mg, favoreciendo la floculación de las arcillas (FAO, 2017).

Los niveles de nitratos y sulfatos fueron bajos a moderados. El contenido de NO_3^- alcanzó 15.9 mg/L en Jima Arriba, mientras que en Rincón fue inferior a 10 mg/L y en Las Cabuyas se registraron 11.9 mg/L. Estos valores no representan riesgo de toxicidad y, en cambio, pueden aportar una fracción adicional de nitrógeno al sistema de cultivo, que conviene considerar en los balances de fertilización (Dobermann & Fairhurst, 2000). Los sulfatos variaron entre valores inferiores a 10 mg/L y 49.9 mg/L (Cuadro 10), sin implicaciones negativas para el cultivo.

En relación con los elementos traza, el boro se mantuvo por debajo de 0.1 mg/L en todas las muestras, muy por debajo de los límites de sensibilidad para la mayoría de los cultivos (Ayers & Westcot, 1985). El Fe fue inferior a 0.1 mg/L en Rincón y Las Cabuyas, pero alcanzó 0.55 mg/L en Jima Arriba (Cuadro 10), valor ligeramente superior a referencias operativas utilizadas para prevenir problemas de incrustaciones en sistemas de riego presurizado (Bhatt, 2023). No obstante, dado que en este caso se trata de riego por inundación, no se prevén riesgos toxicológicos significativos para el arroz, aunque sí podría favorecer la formación de depósitos férricos en canales y estructuras bajo condiciones de oxidación.

Los valores de SAR o RAS fueron muy bajos (0.3–1.3) (Cuadro 10), muy por debajo del umbral en el que se comienzan a observar problemas de sodicidad y dispersión de arcillas ($\text{SAR} > 9\text{--}10$) (Ayers & Westcot, 1985; Bhatt, 2023). En consecuencia, las aguas se clasifican como de bajo riesgo de sodicidad (S1) (Tabla 2: Anexo 5; Anexo 6), adecuadas para la mayoría de los suelos sin peligro de incremento del sodio intercambiable, siempre que se mantenga un drenaje razonable (USDA, 1954) (Cuadro 10).

4.2 Resultados Objetivo 2. Imágenes obtenidas con RPAS en distintas etapas fenológicas del cultivo de arroz, generación y procesamiento de ortomosaicos RGB y e índices visibles (RGB) para la variabilidad intra-parcela

4.2.1. Productos fotogramétricos obtenidos mediante RPAS

Desde la Figura 13 hasta la Figura 24 se muestran los Ortomosaicos RGB y los Modelos Digitales de Superficie (MDS), generados mediante RPAS a partir de los vuelos realizados en cada finca de estudio, los cuales permitieron caracterizar espacialmente el cultivo de arroz en las tres fincas evaluadas (Jima Arriba, Rincón y Las Cabuyas) a lo largo de las etapas fenológicas vegetativa, reproductiva y de maduración.

4.2.1.1. Etapa vegetativa (macollamiento): vuelo 1

En las tres fincas (Figura 13, Figura 14 y Figura 15), los ortomosaicos RGB evidencian una cobertura vegetal continua, propia del establecimiento inicial del cultivo, aunque con variaciones espaciales en tonalidad y textura del dosel, indicativas de heterogeneidad intra-parcela en el vigor temprano. Los MDS asociados muestran gradientes altimétricos suaves, reflejando tanto el microrelieve del terreno como diferencias iniciales en la altura relativa del dosel, particularmente visibles en Jimá Arriba y Rincón (Figura 13 y Figura 14).

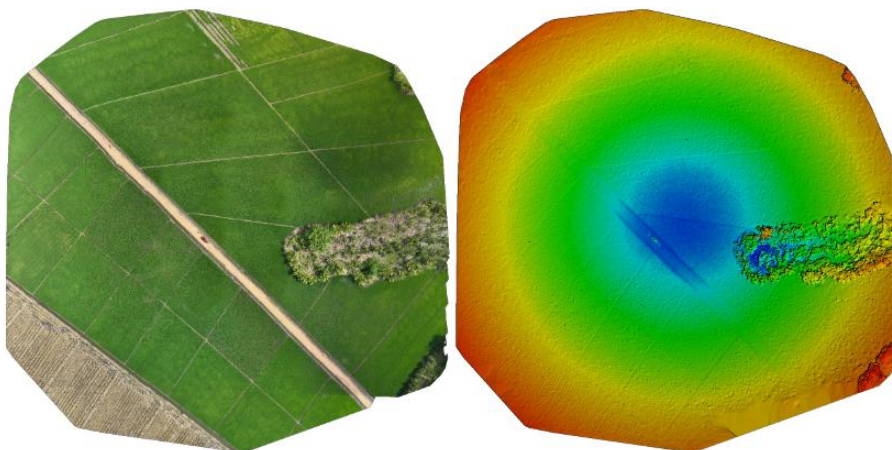


Figura 13. Ortomosaico RGB (izquierda) y Modelo Digital de Superficie (MDS) (derecha) correspondientes a la etapa vegetativa (macollamiento) del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), obtenidos en el vuelo 1 realizado con RPAS en finca Jimá Arriba.

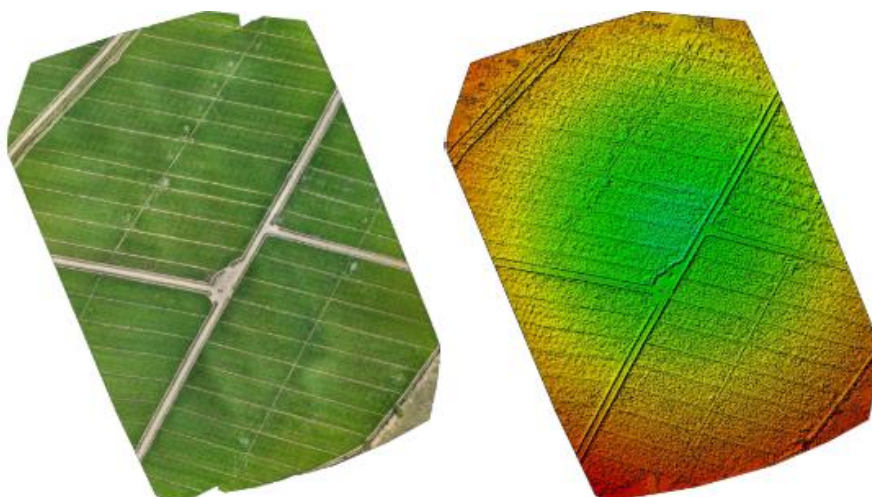


Figura 14. Ortomosaico RGB (izquierda) y Modelo Digital de Superficie (MDS) (derecha) correspondientes a la etapa vegetativa (macollamiento) del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), obtenidos a partir del vuelo 1 realizado con RPAS en finca Rincón.

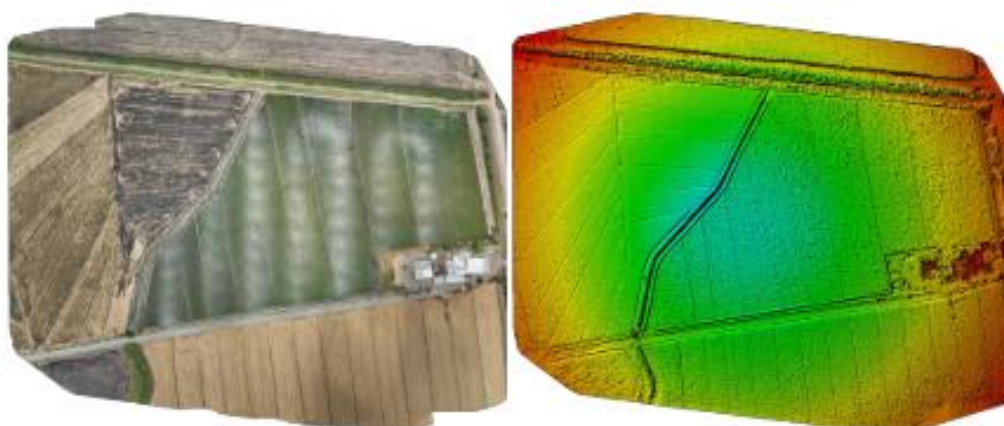


Figura 15. Ortomosaico RGB (izquierda) y Modelo Digital de Superficie (MDS) (derecha) correspondientes a la etapa vegetativa (embuchamiento) del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), obtenidos en el vuelo 1 realizado con RPAS en finca Las Cabuyas.

4.2.1.2. Etapas reproductivas temprana (embuchamiento): vuelo 2 y avanzada (floración/antesis): vuelo 3

Durante la fase reproductiva (Figura 16, Figura 17, Figura 18, Figura 19, Figura 20 y Figura 21), los ortomosaicos RGB evidencian un dosel más denso y uniforme, con menor presencia de áreas de baja cobertura; no obstante, persisten patrones espaciales asociados a divisiones internas, caminos y zonas de transición. Los MDS muestran un aumento relativo de la altura del dosel y una variabilidad espacial más definida, sugiriendo diferencias en el desarrollo estructural entre sectores de la parcela.

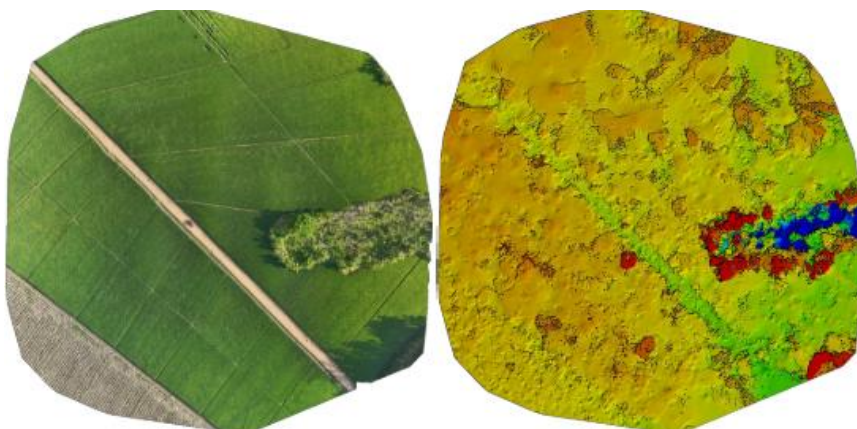


Figura 16. Ortomosaico RGB (izquierda) y Modelo Digital de Superficie (MDS) (derecha) correspondientes a la etapa reproductiva temprana (embuchamiento) del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), obtenidos en el vuelo 2 realizado con RPAS en finca Jima Arriba.

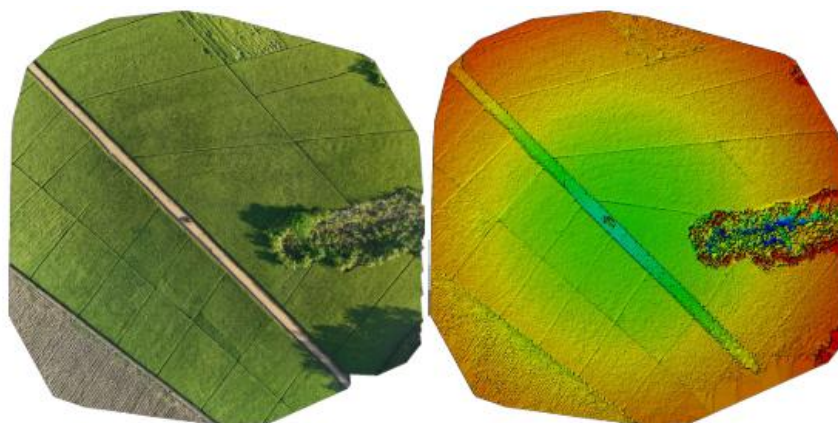


Figura 17. Ortomosaico RGB (izquierda) y Modelo Digital de Superficie (MDS) (derecha) correspondientes a la etapa reproductiva avanzada (floración (antes)) del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), obtenidos en el vuelo 3 realizado con RPAS en finca Jima Arriba.

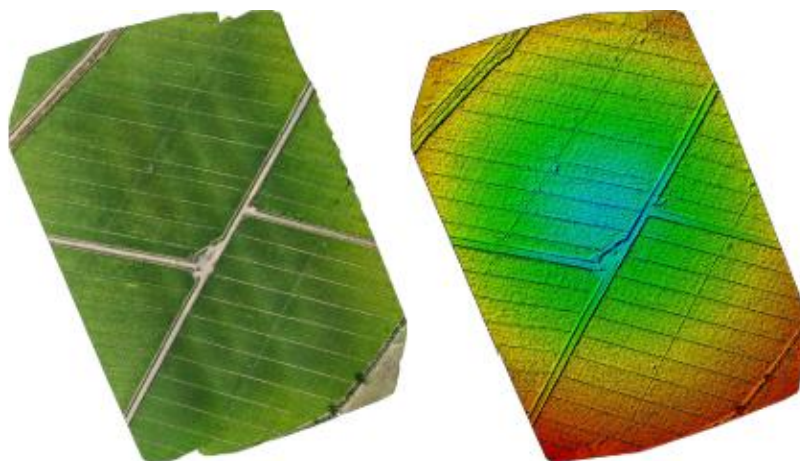


Figura 18. Ortomosaico RGB (izquierda) y Modelo Digital de Superficie (MDS) (derecha) correspondientes a la etapa reproductiva temprana (embuchamiento) del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), obtenidos en el vuelo 2 realizado con RPAS en finca Rincón.

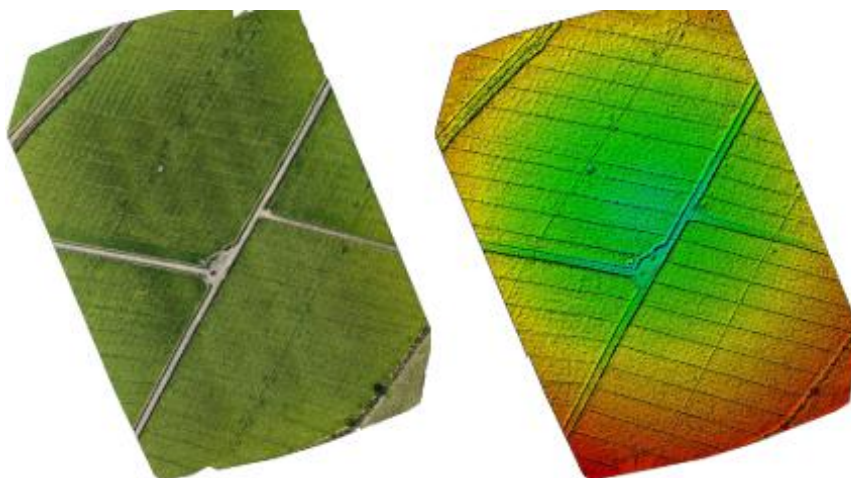


Figura 19. Ortomosaico RGB (izquierda) y Modelo Digital de Superficie (MDS) (derecha) correspondientes a la etapa reproductiva avanzada (floración) del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), obtenidos en el vuelo 3 realizado con RPAS en finca Rincón.

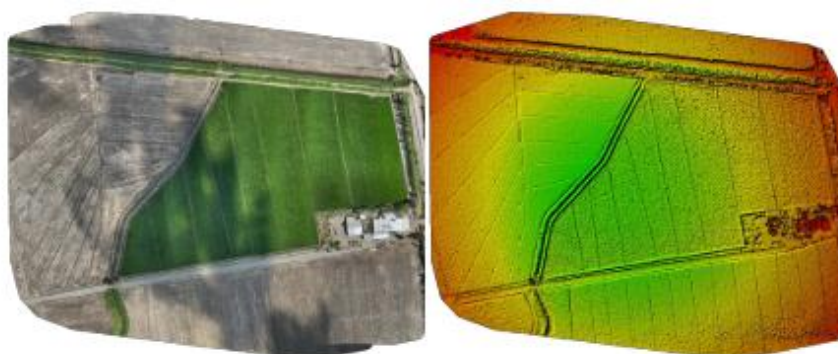


Figura 20. Ortomosaico RGB (izquierda) y Modelo Digital de Superficie (MDS) (derecha) correspondientes a la etapa reproductiva temprana (embuchamiento) del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), obtenidos en el vuelo 2 realizado con RPAS en finca Las Cabuyas.

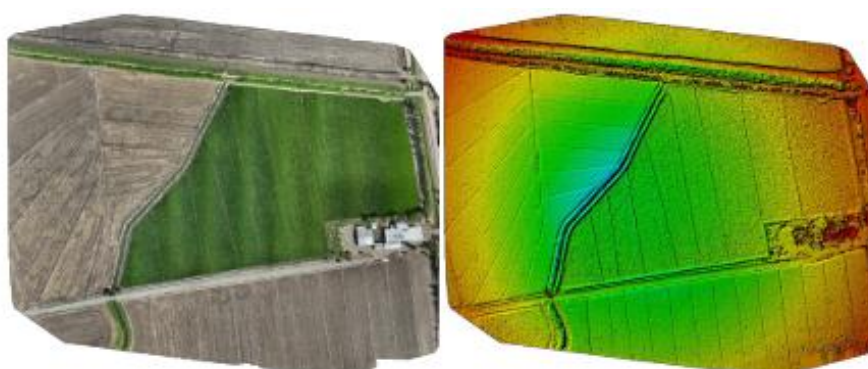


Figura 21. Ortomosaico RGB (izquierda) y Modelo Digital de Superficie (MDS) (derecha) correspondientes a la etapa reproductiva avanzada (floración (antesís)) del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), obtenidos en el vuelo 3 realizado con RPAS en finca Las Cabuyas.

4.2.1.3. Etapa de maduración (llenado de grano, estado lechoso a pastoso): vuelo 4

En la etapa de maduración, los ortomosaicos RGB evidencian cambios cromáticos asociados a la senescencia progresiva del cultivo, con pérdida de intensidad del color verde y mayor heterogeneidad visual. Los MDS muestran una estabilización o ligera disminución de la altura relativa del dosel, coherente con el cierre del crecimiento vegetativo y el predominio del llenado de grano. Estas tendencias son consistentes en las tres fincas, aunque con magnitudes espaciales diferenciadas, siendo más marcadas en Las Cabuyas (Figuras 22, 23 y 24).

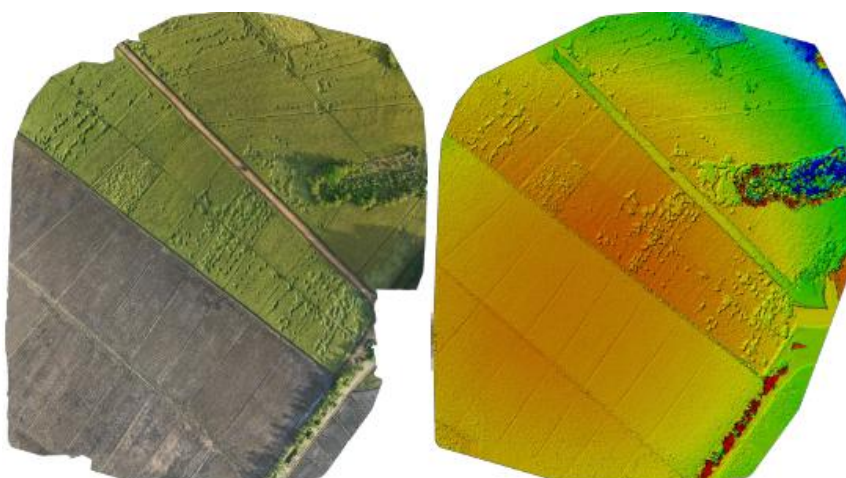


Figura 22. Ortomosaico RGB (izquierda) y Modelo Digital de Superficie (MDS) (derecha) correspondientes a la etapa de maduración (llenado de grano, estado lechoso a pastoso) del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), obtenidos en el vuelo 4 realizado con RPAS en finca Jima Arriba.

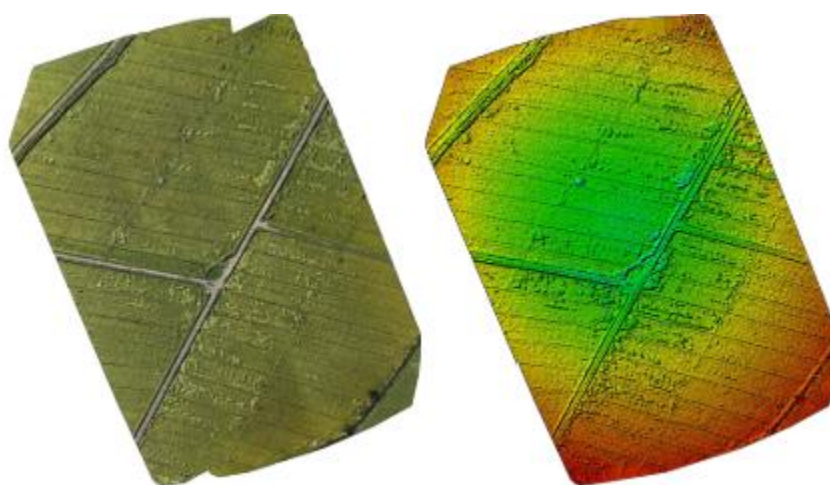


Figura 23. Ortomosaico RGB (izquierda) y Modelo Digital de Superficie (MDS) (derecha) correspondientes a la etapa de maduración (llenado de grano, estado lechoso a pastoso) del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), obtenidos en el vuelo 4 realizado con RPAS en finca Rincón.

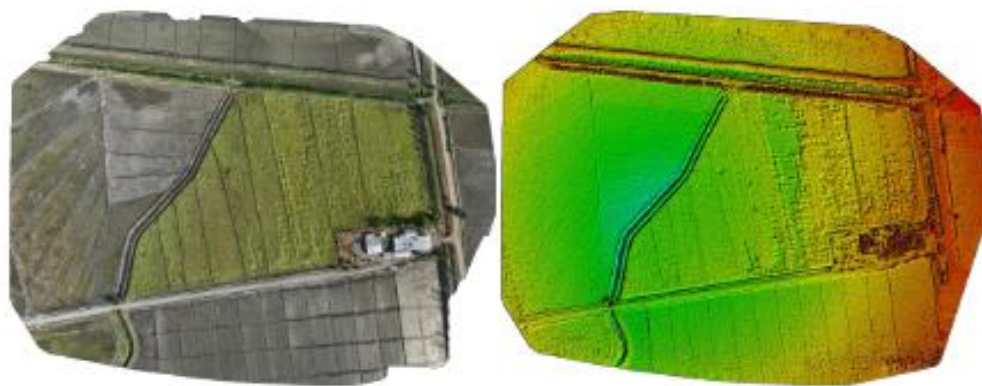


Figura 24. Ortomosaico RGB (izquierda) y Modelo Digital de Superficie (MDS) (derecha) correspondientes a la etapa de maduración (llenado de grano, estado lechoso a pastoso) del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), obtenidos en el vuelo 4 realizado con RPAS en finca Las Cabuyas.

4.2.2. Índices visibles (RGB) de vigor: TGI (*Triangular Greenness Index*) y VARI (*Visible Atmospherically Resistant Index*) según etapa fenológica

Los índices visibles de vigor *Triangular Greenness Index* (TGI) y *Visible Atmospherically Resistant Index* (VARI) fueron derivados a partir de los ortomosaicos RGB obtenidos mediante RPAS en las distintas fincas y fechas de evaluación (apartado 4.2.2). Estos índices permitieron analizar la variabilidad espacial intra-parcela y la dinámica temporal del vigor aparente del dosel del cultivo de arroz, considerando las principales etapas fenológicas del cultivo. Los resultados se presentan desde la Figura 25 hasta la Figura 36 para las tres fincas evaluadas.

En la **Finca Jima Arriba** los mapas TGI y VARI correspondientes a la **etapa vegetativa (macollamiento)** (Figura 25), evidencian una heterogeneidad espacial marcada dentro de la parcela. Se observan sectores con valores relativamente más altos de verdor alternando con áreas de menor expresión del índice, lo que indica una distribución espacial no uniforme del vigor aparente del cultivo en esta fase inicial. Ambos índices presentan patrones similares, aunque VARI muestra una transición cromática ligeramente más continua que TGI. En Rincón (Figura 26), los mapas TGI y VARI muestran una variabilidad espacial intra-parcela evidente, con una distribución fragmentada de zonas de mayor y menor vigor aparente. En esta finca, los contrastes espaciales son visualmente notorios, especialmente en TGI, mientras que VARI presenta un patrón algo más suavizado.



Figura 25. Índices visibles (RGB) de vigor: TGI (*Triangular Greenness Index*) (izquierda) y VARI (*Visible Atmospherically Resistant Index*) (derecha) correspondientes a la etapa vegetativa (macollamiento) del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), obtenidos en el vuelo 1 realizado con RPAS en finca Jima Arriba.

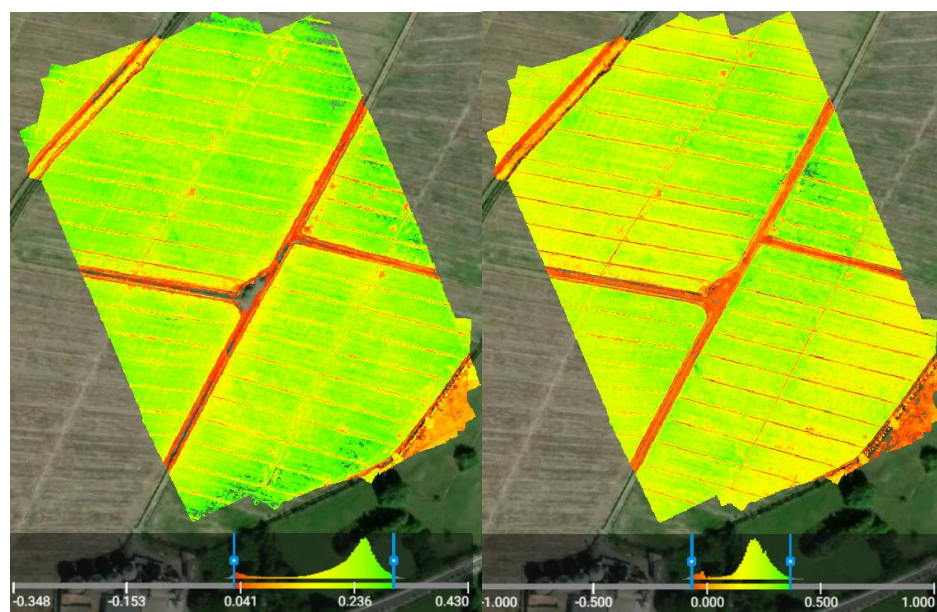


Figura 26. Índices visibles (RGB) de vigor: TGI (*Triangular Greenness Index*) (izquierda) y VARI (*Visible Atmospherically Resistant Index*) (derecha) correspondientes a la etapa fenológica vegetativa (macollamiento) del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), obtenidos en el vuelo 1 realizado con RPAS en finca Rincón.

En **Las Cabuyas** (Figura 27), se observa que, en la **etapa vegetativa (embuchamiento)** del cultivo de arroz, los **índices TGI y VARI** revelan una vegetación menos densa en comparación con las etapas posteriores del ciclo. El TGI muestra un valor bajo de verde vegetativo en gran parte del área, lo que indica una menor cobertura de vegetación en esta fase temprana. El VARI también, refleja una baja densidad de vegetación, sugiriendo que la actividad fotosintética está en una fase de desarrollo inicial.

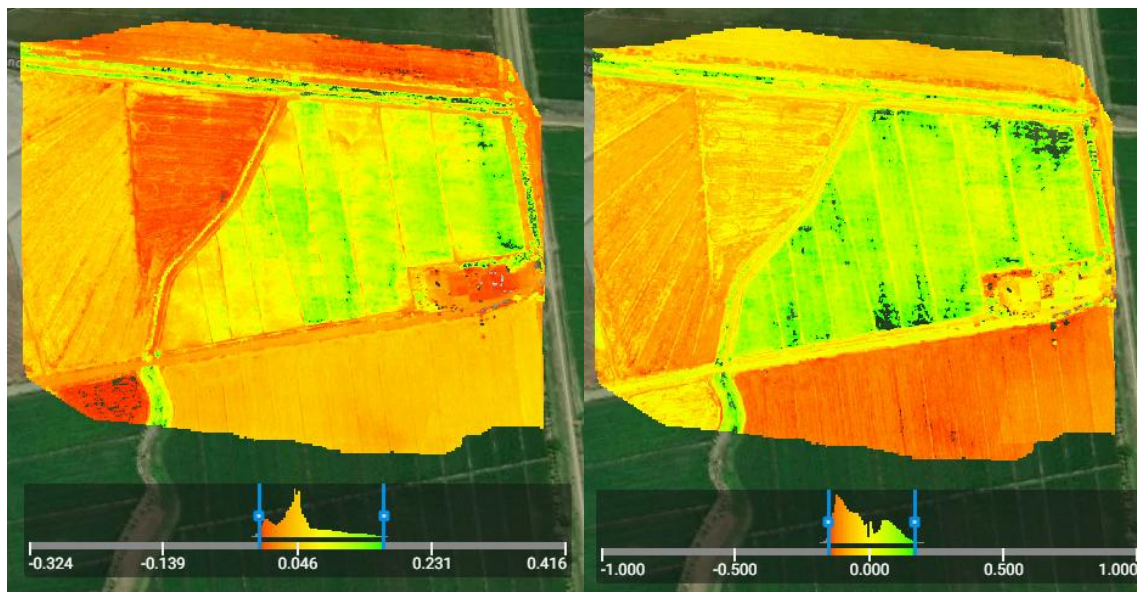


Figura 27. Índices visibles (RGB) de vigor: TGI (*Triangular Greenness Index*) (izquierda) y VARI (*Visible Atmospherically Resistant Index*) (derecha) correspondientes a la etapa vegetativa (macollamiento) del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), obtenidos en el vuelo 1 realizado con RPAS en finca Las Cabuyas.

Durante la **etapa reproductiva temprana (embuchamiento)** (Figura 28), los mapas reflejan una reducción del contraste espacial respecto a la etapa vegetativa. El dosel muestra una mayor continuidad en los valores de vigor, particularmente en VARI, aunque persisten gradientes y zonas localizadas con valores relativamente menores. Este comportamiento sugiere una homogeneización relativa del dosel conforme avanza el desarrollo del cultivo. Sin embargo, en Rincón (Figura 29), se aprecia una **mayor continuidad espacial del vigor**, particularmente en el mapa VARI. Aun así, se distinguen áreas con valores relativamente menores, lo que indica que persiste una variabilidad espacial moderada dentro de la parcela.

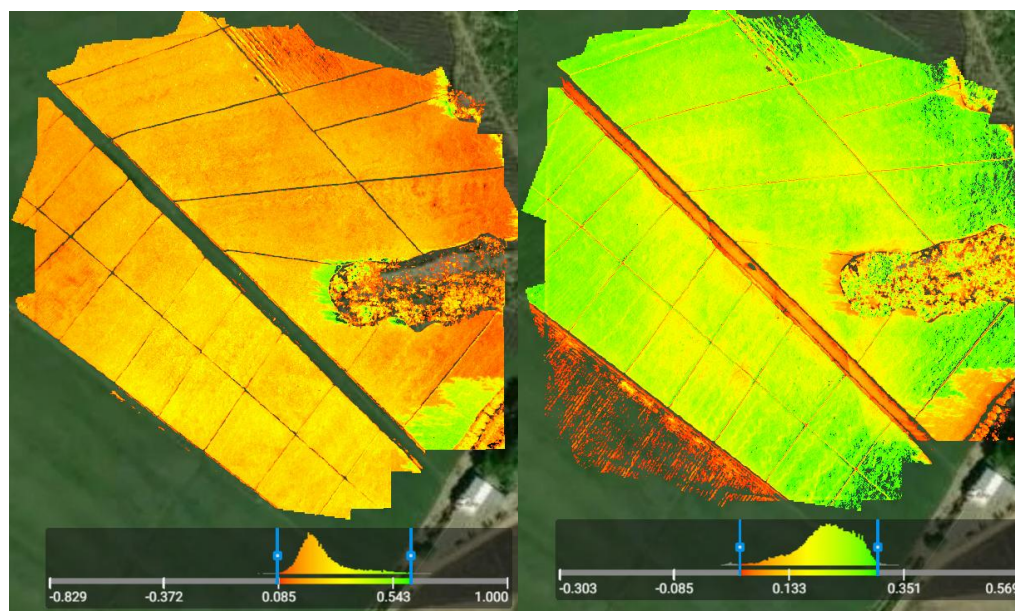


Figura 28. Índices visibles (RGB) de vigor: TGI (*Triangular Greenness Index*) (izquierda) y VARI (*Visible Atmospherically Resistant Index*) (derecha) correspondientes a la etapa reproductiva temprana (embuchamiento) del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), obtenidos en el vuelo 2 realizado con RPAS en finca Jima Arriba.

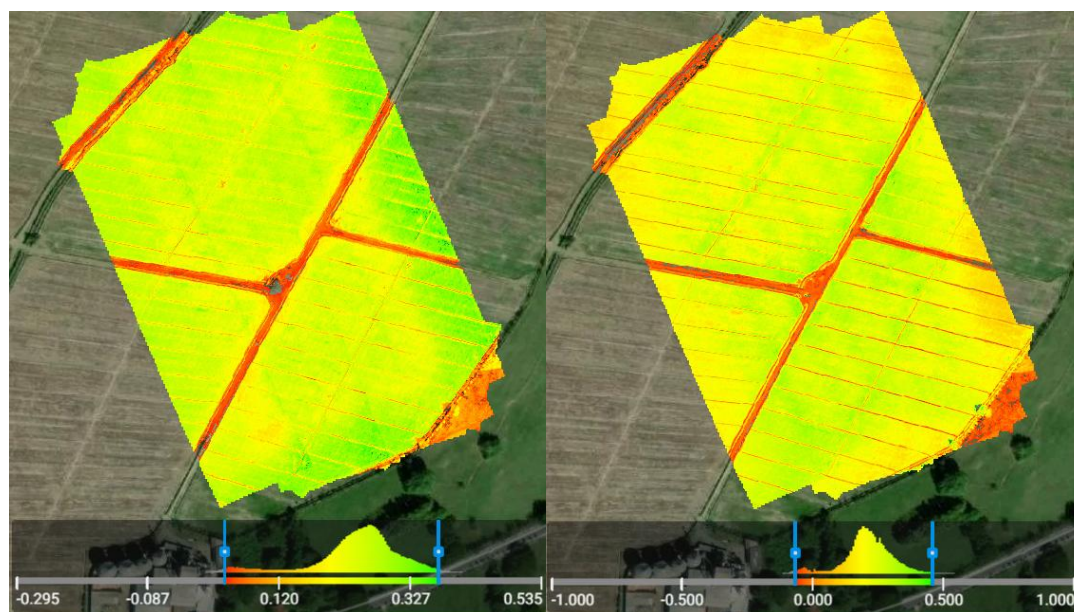


Figura 29. Índices visibles (RGB) de vigor: TGI (*Triangular Greenness Index*) (izquierda) y VARI (*Visible Atmospherically Resistant Index*) (derecha) correspondientes a la etapa reproductiva temprana (embuchamiento) del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), obtenidos en el vuelo 2 realizado con RPAS en finca Rincón.

En la Figura 30 se observa que, en en Las Cabuyas, durante la **etapa reproductiva temprana (embuchamiento)**, los valores de los índices TGI y VARI muestran un aumento significativo en la densidad de la vegetación. El TGI presenta áreas con una mayor saturación de verde, lo que indica una mayor cobertura de follaje y, por lo tanto, un mayor vigor de la planta en comparación con el vuelo anterior. El índice VARI muestra una mayor variabilidad en la vegetación, evidenciando una mayor actividad fotosintética y un incremento en la biomasa del cultivo.

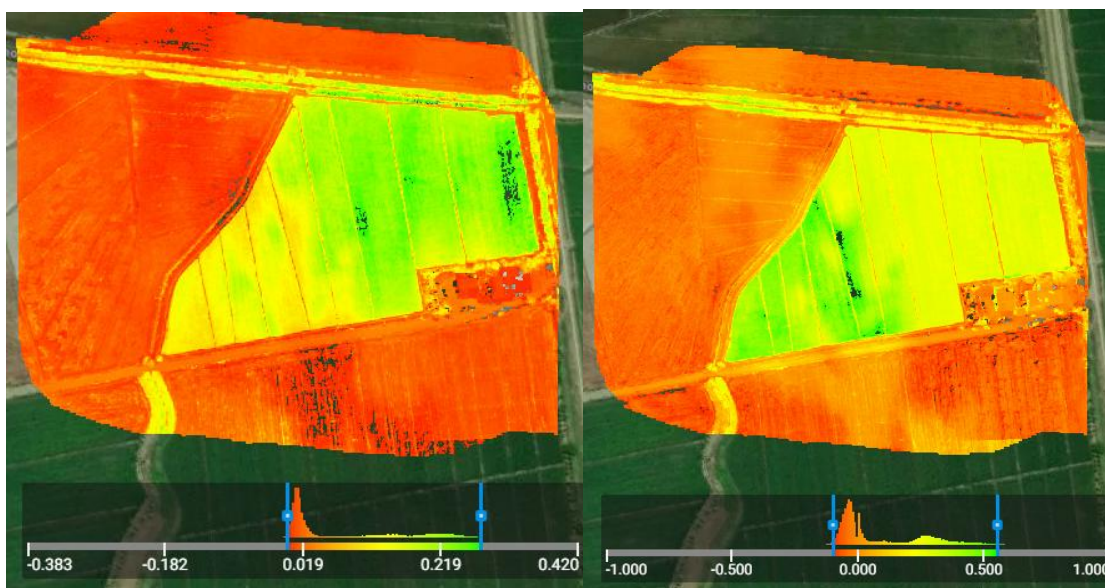


Figura 30. Índices visibles (RGB) de vigor: TGI (*Triangular Greenness Index*) (izquierda) y VARI (*Visible Atmospherically Resistant Index*) (derecha) correspondientes a la etapa reproductiva temprana (embuchamiento) del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), obtenidos en el vuelo 2 realizado con RPAS en finca Las Cabuyas.

En la **etapa reproductiva avanzada (floración, antesis)** (Figura 31), TGI y VARI muestran una distribución espacial más uniforme en **Jima Arriba**, con predominio de valores intermedios y menor fragmentación visual respecto a fases previas. Sin embargo, persisten diferencias espaciales sutiles, lo que evidencia que la variabilidad intra-parcela se mantiene en esta etapa.

En **Rincón** (Figura 32), los mapas de TGI y VARI reflejan una disminución adicional del contraste espacial, con un dosel más continuo y homogéneo en términos relativos. Sin embargo, se mantienen diferencias espaciales de menor magnitud, observables principalmente en el índice TGI.

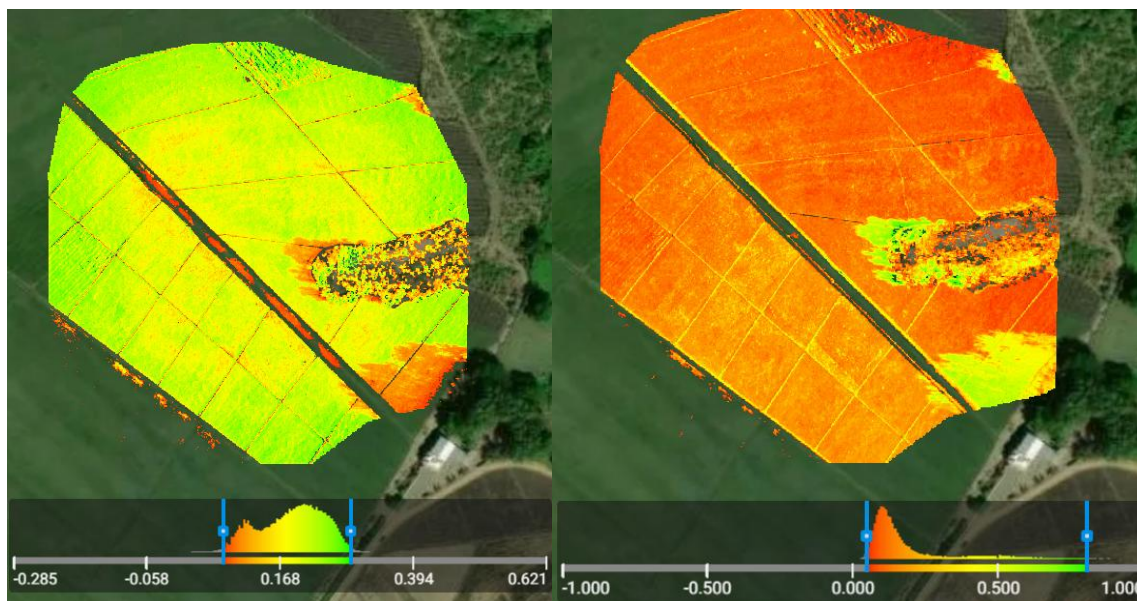


Figura 31. Índices visibles (RGB) de vigor: TGI (*Triangular Greenness Index*) (izquierda) y VARI (*Visible Atmospherically Resistant Index*) (derecha) correspondientes a la etapa reproductiva avanzada (floración, antesis) del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), obtenidos en el vuelo 3 realizado con RPAS en finca Jima Arriba.

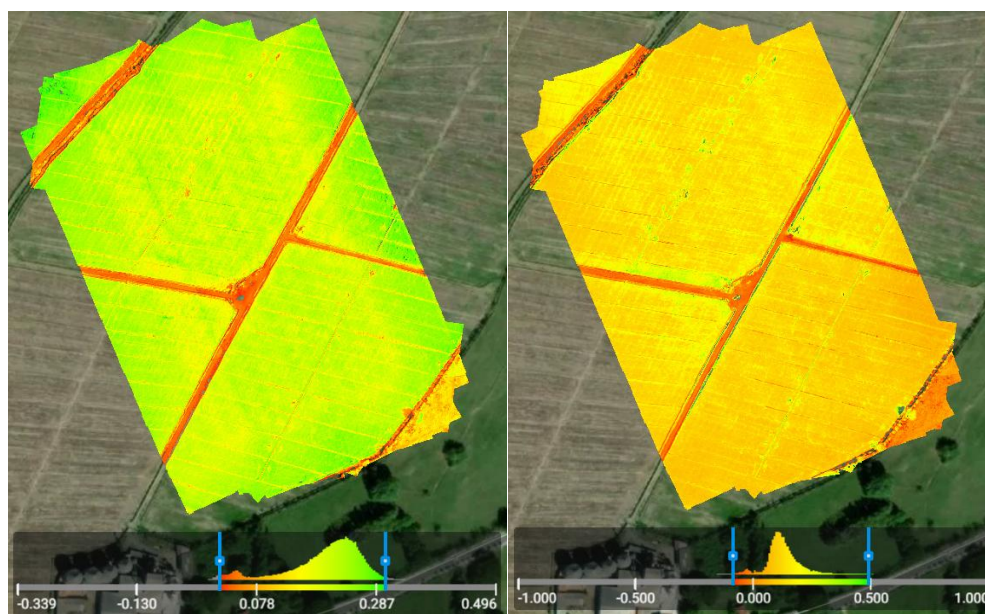


Figura 32. Índices visibles (RGB) de vigor: TGI (*Triangular Greenness Index*) (izquierda) y VARI (*Visible Atmospherically Resistant Index*) (derecha) correspondientes a la etapa reproductiva avanzada (floración) del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), obtenidos en el vuelo 3 realizado con RPAS en finca Rincón.

En **Las Cabuyas**, la Figura 33, se muestra que la **etapa fenológica reproductiva (floración o antesis)** del cultivo de arroz, ambos índices muestran un aumento significativo en la densidad de la vegetación, lo que indica un mayor vigor del cultivo en comparación con etapas anteriores. El TGI revela una mayor cobertura verde, asociada con una mayor biomasa, mientras que el VARI muestra una densidad similar, reflejando la alta actividad fotosintética en el dosel. Estos resultados confirman que la floración es una etapa de crecimiento activo y mayor vigor en el cultivo de arroz, lo que puede ser monitoreado eficazmente mediante los índices espectrales obtenidos con RPAS, proporcionando datos valiosos para la gestión agrícola.

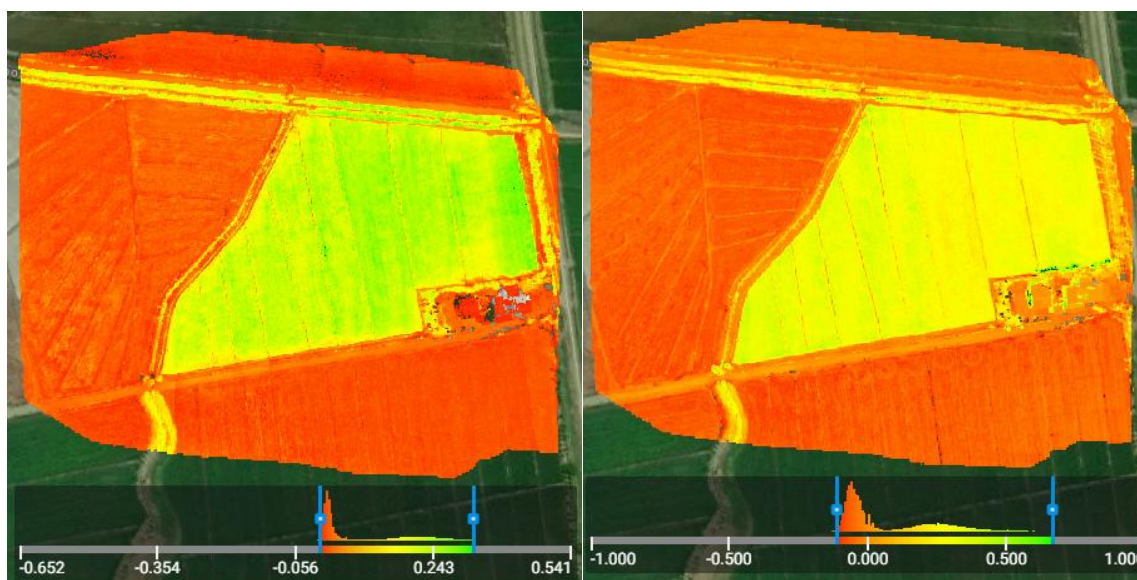


Figura 33. Índices visibles (RGB) de vigor: TGI (*Triangular Greenness Index*) (izquierda) y VARI (*Visible Atmospherically Resistant Index*) (derecha) correspondientes a la etapa reproductiva avanzada (floración, antesis) del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), obtenidos a partir del vuelo 3 realizado con RPAS en finca Las Cabuyas.

En **Jima Arriba** durante la **etapa de maduración** (Figura 34), se observa una disminución generalizada de los valores de ambos índices, reflejada en una transición hacia tonalidades asociadas a menor verdor. Este patrón es consistente en toda la parcela y evidencia el cambio progresivo del dosel asociado a la senescencia foliar propia de esta fase fenológica.

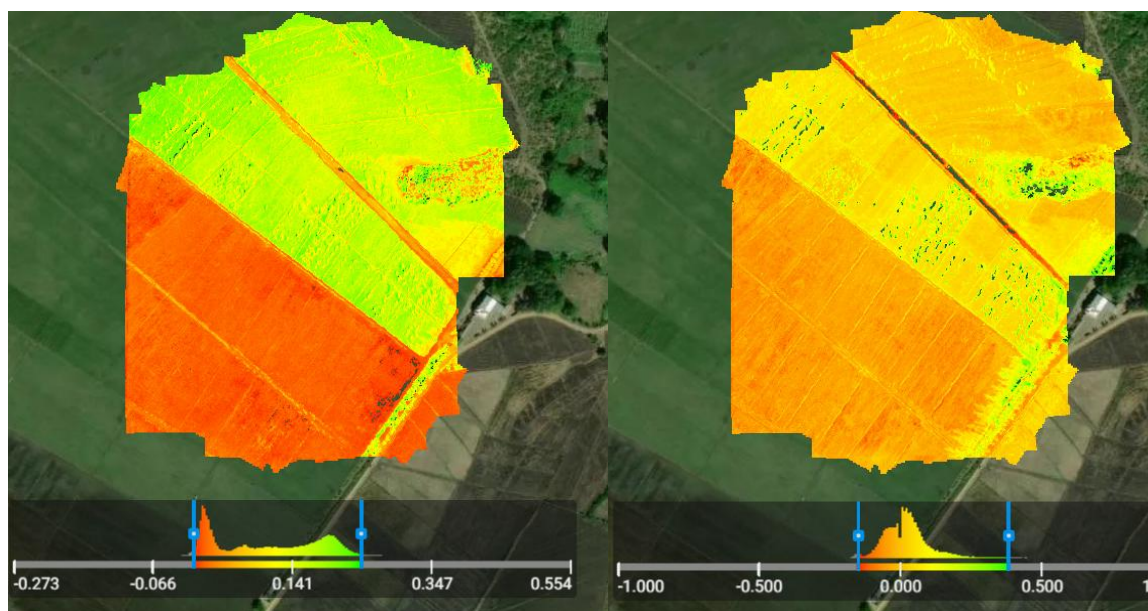


Figura 34. Índices visibles (RGB) de vigor: TGI (*Triangular Greenness Index*) (izquierda) y VARI (*Visible Atmospherically Resistant Index*) (derecha) correspondientes a la etapa de maduración (llenado de grano, estado lechoso a pastoso) del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), obtenidos en el vuelo 4 realizado con RPAS en finca Jima Arriba.

En **Rincón** la **etapa de maduración (llenado de grano)** (Figura 35), se registra una **reducción sostenida del vigor aparente**, manifestada por valores más bajos y una distribución cromática asociada a menor verdor del dosel. Este patrón es consistente en toda la parcela y coincide con la transición fenológica hacia la madurez del cultivo. Este patrón temporal es esperado, dado que los índices RGB “responden principalmente a la fracción verde del dosel y disminuyen conforme avanza la madurez fisiológica” (Gitelson *et al.*, 2002).

En **Las Cabuyas** (Figura 36), la **etapa de maduración (llenado de grano, estado lechoso a pastoso)** presenta una disminución en la densidad del vigor comparado con la etapa reproductiva, lo que es consistente con el ciclo de maduración del arroz, cuando la planta dirige sus recursos hacia el llenado del grano en lugar de al crecimiento del dosel. El **TGI** muestra un valor menor en las áreas correspondientes a la maduración, lo que refleja una reducción en la actividad fotosintética. De manera similar, el **VARI** también, indica una disminución en la vegetación densa, mostrando áreas con menor intensidad de color verde, lo que sugiere que la biomasa vegetativa ha alcanzado su punto máximo y ahora se concentra en el desarrollo del grano.

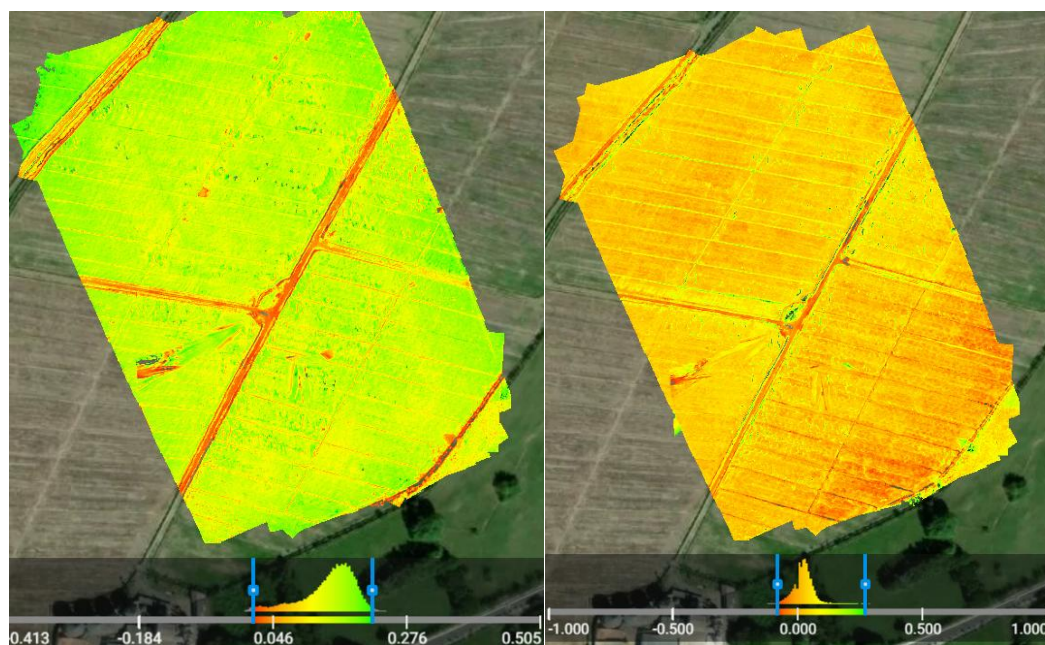


Figura 35. Índices visibles (RGB) de vigor: TGI (*Triangular Greenness Index*) (izquierda) y VARI (*Visible Atmospherically Resistant Index*) (derecha) correspondientes a la etapa de maduración (llenado de grano, estado lechoso a pastoso) del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), obtenidos en el vuelo 4 realizado con RPAS en finca Rincón.

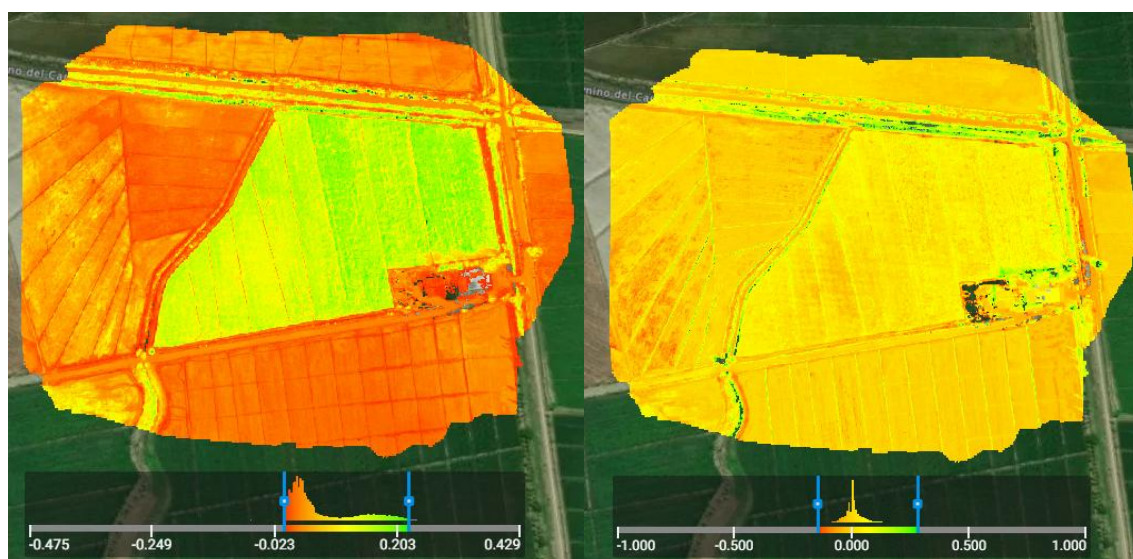


Figura 36. Índices visibles (RGB) de vigor: TGI (*Triangular Greenness Index*) (izquierda) y VARI (*Visible Atmospherically Resistant Index*) (derecha) correspondientes a la etapa de maduración (llenado de grano, estado lechoso a pastoso) del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), obtenidos a partir del vuelo 4 realizado con RPAS en finca Las Cabuyas..

4.3 Resultados Objetivo 3. Relación entre imágenes obtenidas con RPAS e imágenes satelitales (*EOSDA Crop Monitoring*) y niveles de nutrientes foliares del cultivo

El análisis integrado de las imágenes obtenidas mediante RPAS y las imágenes satelitales provenientes de la plataforma *EOSDA Crop Monitoring*, en conjunto con los niveles de nutrientes foliares del cultivo de arroz, permitió evaluar la coherencia espectral y la capacidad de ambas fuentes de información para reflejar el estado nutricional del dosel a escala de finca.

4.3.1. Índices satelitales (Plataforma *EOSDA Crop Monitoring*)

4.3.1.1. Comportamiento espacial y temporal de los índices satelitales

Los índices de vegetación derivados de imágenes satelitales a través de la plataforma *EOSDA Crop Monitoring*: NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), MSAVI (*Modified Soil Adjusted Vegetation Index*), NDRE (*Normalized Difference Red Edge Index*) y RECI (*Red Edge Chlorophyll Index*) permitieron caracterizar la dinámica espacial y temporal del vigor del cultivo de arroz a escala de finca, durante las distintas etapas fenológicas evaluadas.

4.3.1.2. Índices asociados al verdor y biomasa del dosel (NDVI y MSAVI)

Los mapas de los índices NDVI y MSAVI, derivados de imágenes satelitales se presentan en la Figura 37, Figura 38 y Figura 39.

En **Jima Arriba** los mapas NDVI y MSAVI (Figura 37), muestran un predominio de valores asociados a vegetación densa, con una distribución espacial relativamente continua dentro del polígono evaluado. El **NDVI** presenta una variabilidad moderada, con zonas de mayor intensidad de verdor intercaladas con áreas de valores ligeramente menores, lo que indica la presencia de gradientes espaciales en el vigor del dosel. El **índice MSAVI**, por su parte, exhibe un patrón espacial similar, aunque con una mayor homogeneidad visual, lo cual es coherente con su formulación orientada a minimizar la influencia del fondo del suelo (Figura 37). En ambos casos, los mapas reflejan un dosel mayoritariamente bien desarrollado, sin la presencia de extensas áreas con valores bajos que sugieran reducciones generalizadas del verdor.



Figura 37. Distribución espacial de NDVI (izquierda) y MSAVI (derecha) estimados a partir de imágenes satelitales, como indicadores del verdor y la biomasa del dosel, para la evaluación del vigor del arroz (*Oryza sativa* L.) en la finca Jima Arriba.

En **Rincón** NDVI y MSAVI (Figura 38) evidencian **valores elevados asociados a vegetación densa**, aunque con una **mayor diferenciación espacial** respecto a Jima Arriba. El NDVI permite identificar sectores con mayor intensidad de verdor contrastando con zonas de valores intermedios, lo que sugiere una variabilidad intra-parcela más marcada. El MSAVI mantiene una distribución espacial más suavizada, reduciendo el contraste extremo entre áreas, pero conservando los principales patrones observados en NDVI. Esta concordancia entre ambos índices indica una respuesta consistente del dosel vegetal, con diferencias locales en la expresión del verdor y la biomasa aparente.



Figura 38. Distribución espacial de NDVI (izquierda) y MSAVI (derecha) estimados a partir de imágenes satelitales, como indicadores del verdor y la biomasa del dosel, para la evaluación del vigor del arroz (*Oryza sativa* L.) en finca Rincón.

En **Las Cabuyas**, los mapas muestran una **heterogeneidad espacial más evidente** (Figura 39), particularmente en el NDVI, donde se distinguen zonas con valores altos de verdor coexistiendo con áreas localizadas de valores notablemente menores. Estas áreas de menor índice se presentan de forma puntual y contrastan claramente con el resto del dosel. El MSAVI reproduce este patrón general, aunque con una transición más gradual entre zonas, lo que facilita la identificación de áreas con menor cobertura o vigor relativo sin amplificar el efecto del suelo. En conjunto, ambos índices reflejan una mayor variabilidad espacial del dosel en esta finca en comparación con Jima Arriba y Rincón.

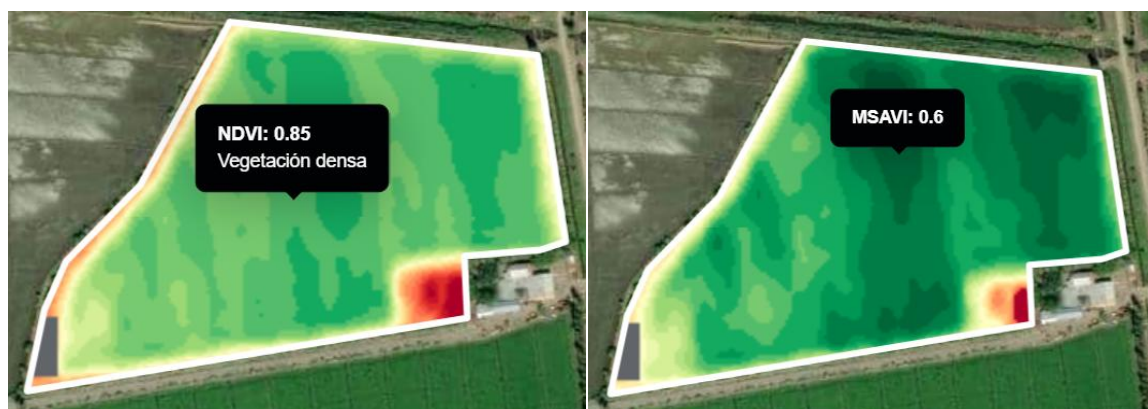


Figura 39. Distribución espacial de NDVI (izquierda) y MSAVI (derecha) estimados a partir de imágenes satelitales, como indicadores del verdor y la biomasa del dosel, para la evaluación del vigor del arroz (*Oryza sativa* L.) en finca Las Cabuyas.

4.3.1.3. Índices asociados al contenido relativo de clorofila del dosel: NDRE y RECI

Los Índices espectrales asociados al contenido relativo de clorofila del dosel: **NDRE y RECI**, derivados de imágenes satelitales, relacionados con las fincas estudiadas se presentan en Figura 40, Figura 41 y Figura 42. En **Jima Arriba**, el **NDRE** (Figura 40) muestra un predominio de valores asociados a vegetación densa, con una distribución relativamente continua y gradientes suaves, lo que refleja una **variabilidad intra-parcela moderada** en el contenido relativo de clorofila. En contraste, el **RECI** exhibe una **mayor diferenciación espacial**, resaltando con más contraste zonas de valores altos y áreas relativamente menores, lo que permite identificar heterogeneidad local del follaje que el NDRE no distingue con la misma claridad

En **Rincón**, el **NDRE** presenta una distribución mayormente de valores **medios–altos** y una apariencia relativamente homogénea, aunque con gradientes internos de menor escala (Figura 41), lo que sugiere cobertura activa y variación moderada de clorofila. En contraste, el **RECI** exhibe una variabilidad espacial más marcada y patrones mejor definidos, destacando su sensibilidad para acentuar diferencias locales del dosel.



Figura 40. Distribución espacial de NDRE (izquierda) y RECI (derecha) estimados a partir de imágenes satelitales, como indicadores del contenido relativo de clorofila del dosel, para evaluar el estado fisiológico del arroz (*Oryza sativa* L.) en finca Jima Arriba.

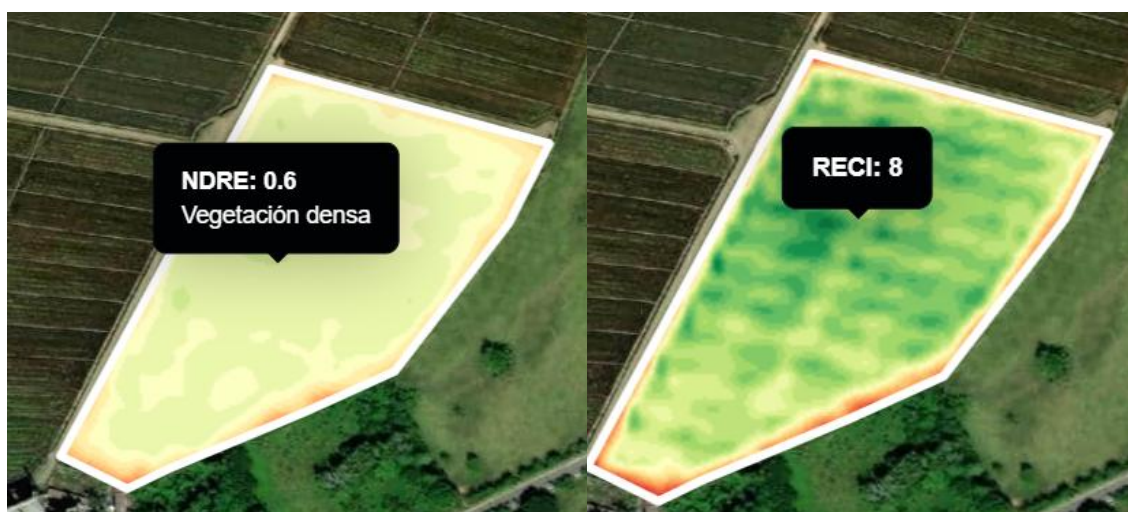


Figura 41. Distribución espacial de NDRE (izquierda) y RECI (derecha) estimados a partir de imágenes satelitales, como indicadores del contenido relativo de clorofila del dosel, para evaluar el estado fisiológico del arroz (*Oryza sativa* L.) en finca Rincón.

En **Las Cabuyas**, ambos índices evidencian una **heterogeneidad espacial** más marcada que en las otras fincas. El **NDRE** muestra predominio de valores **intermedios** con sectores puntuales de menor magnitud, reflejando variabilidad en el contenido relativo de clorofila. El **RECI** intensifica este patrón al resaltar contrastes más definidos entre áreas de valores altos y bajos, especialmente en zonas específicas de la parcela, confirmando su **mayor sensibilidad** para discriminar variaciones locales en la condición del follaje (Figura 42).



Figura 42. Distribución espacial de NDRE (izquierda) y RECI (derecha) estimados a partir de imágenes satelitales, como indicadores del contenido relativo de clorofila del dosel, para evaluar el estado fisiológico del arroz (*Oryza sativa* L.) en finca Las Cabuyas.

4.3.2. Índices espectrales satelitales provenientes de la plataforma digital *EOSDA Crop Monitoring*

El Cuadro 11 presenta los índices espectrales satelitales calculados, obtenidos en la plataforma digital *EOSDA Crop Monitoring*, seleccionando para cada finca la imagen satelital más próxima a la fecha de vuelo/ muestreo. Los índices espectrales incluyen **NDVI** (Índice de Vegetación), **NDRE** (Índice de Vegetación en el Red-Edge), **MASAVI** (Índice de Vegetación Ajustado por la Relación de Absorción), **RECI** (Índice de Clorofila) y **NDMI** (Índice de Humedad del Suelo).

Cuadro 11. índices espectrales satelitales calculados para las fincas de estudio, obtenidos a partir de la plataforma digital EOSDA Crop Monitoring.

Localidad	Fecha de vuelo/ muestreo	Fecha imagen satelital	Latitud	Longitud	NDVI	NDRE	MASAVI	RECI	NDMI
Jima Arriba	26/08/2025	25/08/2025	19.1526	-70.34591	0.75	0.60	0.50	7.00	0.30
	23/09/2025	24/09/2025	19.1524	-70.34617	0.95	0.80	0.50	10.00	0.50
	07/10/2025	09/10/2025	19.1536	-70.34696	0.90	0.65	0.70	10.00	0.50
	31/10/2025	03/11/2025	19.15189	-70.34453	0.65	0.40	0.50	3.50	0.30
Rincón	26/08/2025	25/08/2025	19.1317	-70.39059	0.80	0.60	0.60	7.00	0.40
	23/09/2025	24/09/2025	19.13135	-70.39099	0.95	0.75	0.70	10.00	0.50
	07/10/2025	09/10/2025	19.1301	-70.39179	0.85	0.55	0.60	10.00	0.50
	31/10/2025	03/11/2025	19.1305	-70.39098	0.80	0.45	0.60	6.50	0.40
Las Cabuyas	26/08/2025	25/08/2025	19.212	-70.40169	0.45	0.25	0.25	1.50	0.30
	23/09/2025	24/09/2025	19.21191	-70.40196	0.90	0.75	0.70	10.00	0.40
	07/10/2025	09/10/2025	19.213	-70.40047	0.95	0.75	0.70	10.00	0.50
	11/11/2025	10/11/2025	19.2124	-70.40101	0.70	0.40	0.60	4.00	0.30

Fuente: Datos obtenidos de Eosda crop monitoring para análisis de índices espectrales satelitales, 2025.

En **Jima Arriba**, **NDVI** y **NDRE** aumentaron con fuerza entre finales de agosto y finales de septiembre, alcanzando máximos de **0.95** y **0.80**, respectivamente, coherentes con el **máximo desarrollo vegetativo** y alta actividad fotosintética; hacia finales de octubre ambos disminuyeron (**NDVI = 0.65; NDRE = 0.40**) (Cuadro 11), en línea con el inicio de la **senescencia** y la **movilización de nutrientes al grano** en fase reproductiva avanzada (Peng et al., 2010; Yao et al., 2017). En **Rincón** se observó un patrón similar: a finales de septiembre, **NDVI = 0.95** y **NDRE = 0.75**, seguidos de una reducción progresiva en octubre (Cuadro 11), consistente con reportes donde **NDVI > 0.85** en fase reproductiva temprana se asocia con doseles densos y alto índice de área foliar bajo manejo adecuado de N (Yao et al., 2017; Zheng et al., 2020).

En **Las Cabuyas**, los valores iniciales fueron menores (**NDVI = 0.45; NDRE = 0.25** en agosto), sugiriendo establecimiento más débil o **estrés temprano**; no obstante, en septiembre–octubre aumentaron a **NDVI = 0.90–0.95** y **NDRE = 0.75** (Cuadro 11), indicando **recuperación** y mayor biomasa y clorofila foliar, coherente con la capacidad del arroz de compensar estrés temprano cuando mejoran condiciones de suelo y manejo (Li et al., 2020; Zhang et al., 2021). El **RECI** alcanzó máximos cercanos a **10.0** en septiembre–octubre en las tres localidades (Cuadro 11), compatible con **alta clorofila** y un estado nitrogenado favorable, dada su sensibilidad a la clorofila y su relación con N (Gitelson et al., 2014). Finalmente, el **NDMI** osciló entre **0.30 y 0.50**, con incrementos en septiembre–octubre (Cuadro 11), consistente con mayor contenido hídrico del dosel; en arroz inundado, valores **>0.40** se asocian con condiciones hídricas favorables para fotosíntesis y llenado de grano (Xue & Su, 2017).

En Jima Arriba, los valores de **NDVI** y **NDRE** aumentaron de forma marcada entre finales de agosto y finales de septiembre, alcanzando máximos de 0.95 y 0.80, respectivamente, lo que corresponde con el máximo desarrollo vegetativo y alta actividad fotosintética del arroz. Posteriormente, hacia finales de octubre, ambos índices disminuyeron (**NDVI = 0.65; NDRE = 0.40**), en concordancia con el inicio de la senescencia foliar y la movilización de nutrientes hacia el grano durante la fase reproductiva avanzada, proceso descrito por Peng et al. (2010) y observado con sensores remotos por Yao et al. (2017). Un patrón similar se observó en Rincón: a finales de septiembre, el **NDVI** alcanzó 0.95 y el **NDRE** 0.75, seguido de una disminución progresiva

en octubre (Cuadro 11). Estos valores coinciden con lo reportado para arroz bajo manejo adecuado de N, donde $NDVI > 0.85$ en fase reproductiva temprana se asocia con doseles densos y altos índices de área foliar (Yao et al., 2017; Zheng et al., 2020).

En Las Cabuyas, los valores iniciales de NDVI (0.45) y NDRE (0.25) en agosto fueron inferiores a los de las otras localidades, lo que sugiere un establecimiento más débil o estrés temprano, posiblemente por limitaciones nutricionales o hídricas. Sin embargo, en septiembre y octubre los índices aumentaron hasta $NDVI = 0.90\text{--}0.95$ y $NDRE = 0.75$ (Cuadro 11), indicando recuperación del cultivo y mayor biomasa y clorofila foliar. Este patrón concuerda con la capacidad del arroz de compensar estrés temprano cuando mejoran las condiciones edáficas y de manejo en fase vegetativa y reproductiva temprana (Li et al., 2020; Zhang et al., 2021).

El RECI alcanzó valores máximos cercanos a 10.0 en septiembre–octubre en las tres localidades (Cuadro 11), indicando alta clorofila en el dosel. Dado que este índice es sensible a cambios en clorofila y se asocia estrechamente con el estado nitrogenado del cultivo, estos valores sugieren una nutrición de N adecuada durante la fase de mayor demanda fisiológica (Gitelson et al., 2014).

El NDMI osciló entre 0.30 y 0.50, con incrementos en septiembre–octubre (Cuadro 11), consistente con mayor disponibilidad hídrica y contenido de agua en el dosel durante macollamiento y floración; en arroz inundado, valores >0.40 se han vinculado con condiciones hídricas favorables para fotosíntesis y llenado de grano (Xue y Su, 2017).

4.3.2.1. Concentración de nutrientes foliares en el cultivo de arroz

El Cuadro 12 presenta la concentración de nutrientes foliares evaluados en el cultivo de arroz: N, P, K, Ca, Mg y S; diferenciada por finca, vuelo y etapa fenológica. Esta información permite evaluar la dinámica nutricional del cultivo a lo largo del ciclo productivo y su variabilidad espacial entre las fincas de estudio. La comparación con los rangos de suficiencia por etapa fenológica posibilita identificar situaciones de suficiencia, deficiencia o exceso nutricional y su evolución temporal.

Cuadro 12. Concentración de nutrientes foliares (N, P, K, Ca, Mg y S) en el cultivo de arroz por finca, vuelo y etapa fenológica.

Finca evaluada	Fecha muestreo / vuelo	Vuelo	Latitud	Longitud	Etapa fenológica	Nitrógeno total (N-total)	Fósforo (P)	Potasio (K)	Calcio (Ca)	Magnesio (Mg)	Azufre (S)
						Porcentaje (%)					
Jima Arriba	26/08/2025	Vuelo 1	19.1526	-70.345905	Vegetativa	3.59	0.27	3.60	0.29	0.22	0.21
Rincón	26/08/2025	Vuelo 1	19.13166	-70.390589		2.48	0.36	2.82	0.33	0.22	0.21
Las Cabuyas	26/08/2025	Vuelo 1	19.21199	-70.401691		3.28	0.28	2.73	0.56	0.29	0.23
Rango deseado Vegetativa (macollamiento–PI; Y-leaf)*						2.9–4.2	0.2–0.4	1.8–2.6	0.2–0.6	0.15–0.30	0.16 -0.40
Jima Arriba	23/09/2025	Vuelo 2	19.15242	-70.346169	Reproductiva temprana	2.95	0.22	1.76	0.39	0.19	0.14
Rincón	23/09/2025	Vuelo 2	19.13135	-70.39099		2.03	0.20	1.30	0.40	0.17	0.10
Las Cabuyas	23/09/2025	Vuelo 2	19.21191	-70.401963		2.99	0.25	2.31	0.42	0.24	0.16
Rango deseado Reproductiva (floración; flag-leaf)*						2.4–3.0	0.200.3	1.6–2.2	0.2-0.5	0.15-1.30	0.14–0.25
Jima Arriba	07/10/2025	Vuelo 3	19.15189	-70.344526	Reproductiva avanzada	2.05	0.24	1.66	0.35	0.21	0.10
Rincón	07/10/2025	Vuelo 3	19.13052	-70.390982		1.87	0.21	1.38	0.51	0.25	0.10
Las Cabuyas	07/10/2025	Vuelo 3	19.21305	-70.400471		3.38	0.26	1.52	0.49	0.25	0.14
Rango deseado Reproductiva (floración; flag-leaf)*						2.2-2.5	0.2–0.3	1.4–2.0	0.2-0.5-	0.1-0.2	0.10–0.15
Jima Arriba	31/10/2025	Vuelo 4	19.15363	-70.346964	Maduración	1.35	0.19	1.36	0.48	0.23	0.07
Rincón	31/10/2025	Vuelo 4	19.1301	-70.391794		1.32	0.20	1.31	0.46	0.24	0.07
Las Cabuyas	11/11/2025	Vuelo 4	19.21242	-70.401006		1.22	0.12	1.38	0.46	0.28	0.10
Rango deseado Maduración (hoja)*						1.0–1.5	0.1–0.2	1.0–2.0	0.3-0.6	0.20–0.35	0.08–0.15

Fuente: *Análisis provenientes de Informes de Ensayo y Anexo Técnico asociados a la muestras, Laboratorio AGQ Dominicana. Rangos deseables por etapas, de acuerdo a Dobermann y Fairhurst (2000)

En la **etapa vegetativa (Vuelo 1)**, el **N** se ubicó dentro del rango de suficiencia (2.9–4.2%) en **Jima Arriba** (3.59%) y **Las Cabuyas** (3.28%), mientras que **Rincón** (2.48%) quedó por debajo del umbral inferior, sugiriendo una limitación temprana del crecimiento. El **P** fue adecuado (0.2–0.4%) en las tres fincas. El **K** superó el rango (1.8–2.6%) en **Jima Arriba** (3.60%) y **Las Cabuyas** (2.73%) y se ubicó ligeramente por encima en **Rincón** (2.82%), indicando alta disponibilidad en esta fase. **Ca, Mg y S** permanecieron dentro de rangos, sin evidencias de deficiencia o toxicidad (Cuadro 12).

Durante la **fase reproductiva temprana (Vuelo 2)**, el **N** disminuyó respecto a la fase vegetativa, pero se mantuvo dentro o por encima del rango (2.4–3.0%) en **Jima Arriba** (2.95%) y **Las Cabuyas** (2.99%); **Rincón** (2.03%) continuó por debajo, lo que sugiere limitación de **N** en un periodo crítico para la diferenciación de panículas. El **P** se mantuvo adecuado (0.20–0.30%) en las tres fincas. El **K** fue adecuado en **Jima Arriba** (1.76%) y **Las Cabuyas** (2.31%), pero **bajo en Rincón** (1.30%), señalando riesgo de limitación potásica. **Ca, Mg y S** se mantuvieron dentro de rangos (Cuadro 12).

En la **fase reproductiva avanzada (Vuelo 3)**, el **N** estuvo por debajo del rango (2.2–2.5%) en **Jima Arriba** (2.05%) y **Rincón** (1.87%), mientras que **Las Cabuyas** (3.38%) mostró un exceso relativo, evidenciando heterogeneidad asociada a manejo o absorción en floración. El **P** permaneció en rango (0.2–0.3%) y el **K** fue suficiente (1.4–2.0%), aunque **Rincón** (1.38%) quedó en el límite inferior. **Ca, Mg y S** no mostraron deficiencias evidentes (Cuadro 12).

En **maduración (Vuelo 4)**, el **N** descendió a **1.22–1.35%**, dentro del rango esperado (1.0–1.5%), coherente con la movilización de **N** desde hojas hacia grano (Dobermann & Fairhurst, 2000). El **P** se mantuvo en rango en **Jima Arriba** (0.19%) y **Rincón** (0.20%), pero fue **bajo en Las Cabuyas** (0.12%). El **K** se ubicó dentro del rango (1.0–2.0%) en las tres fincas, al igual que **Ca y Mg** (0.30–0.60% y 0.20–0.35%). El **S** fue **bajo en Jima Arriba y Rincón** (0.07% en ambos) y **adecuado en Las Cabuyas** (0.10%), sugiriendo una posible limitación tardía de **S** en dos localidades (Cuadro 12).

El **Cuadro 12** confirma una dinámica nutricional diferenciada: **Rincón** con limitaciones recurrentes de **N y K**, **Las Cabuyas** con **N elevado en floración**, y **Jima Arriba** con descensos de **N y S** hacia maduración. Este patrón concuerda con la fisiología

del arroz, donde la demanda de **N y K** es máxima entre macollamiento y floración y el **N foliar** disminuye en maduración por traslocación al grano (Dobermann & Fairhurst, 2000).

4.3.2.2. Análisis de la relación entre índices espectrales y nutrientes foliares

Las **matrices de correlación** (Figuras 43, 44 y 45) muestran relaciones significativas entre los índices espectrales y los nutrientes foliares. En Jima Arriba (Figura 43), la correlación positiva entre NDVI y K (%) (0.47) y la correlación negativa con P (%) (-0.36) sugieren que áreas con mayor vigor vegetal pueden tener menores concentraciones de P. En Rincón (Figura 44), se observó una correlación positiva entre NDVI y S (%) (0.38), lo que podría reflejar un mejor contenido de este nutriente en áreas de mayor vegetación. En Las Cabuyas (Figura 45), las correlaciones fueron más dispersas, con un NDVI negativo asociado a Ca (%) (-0.47), lo que podría indicar deficiencias en este nutriente en áreas de alta vegetación.

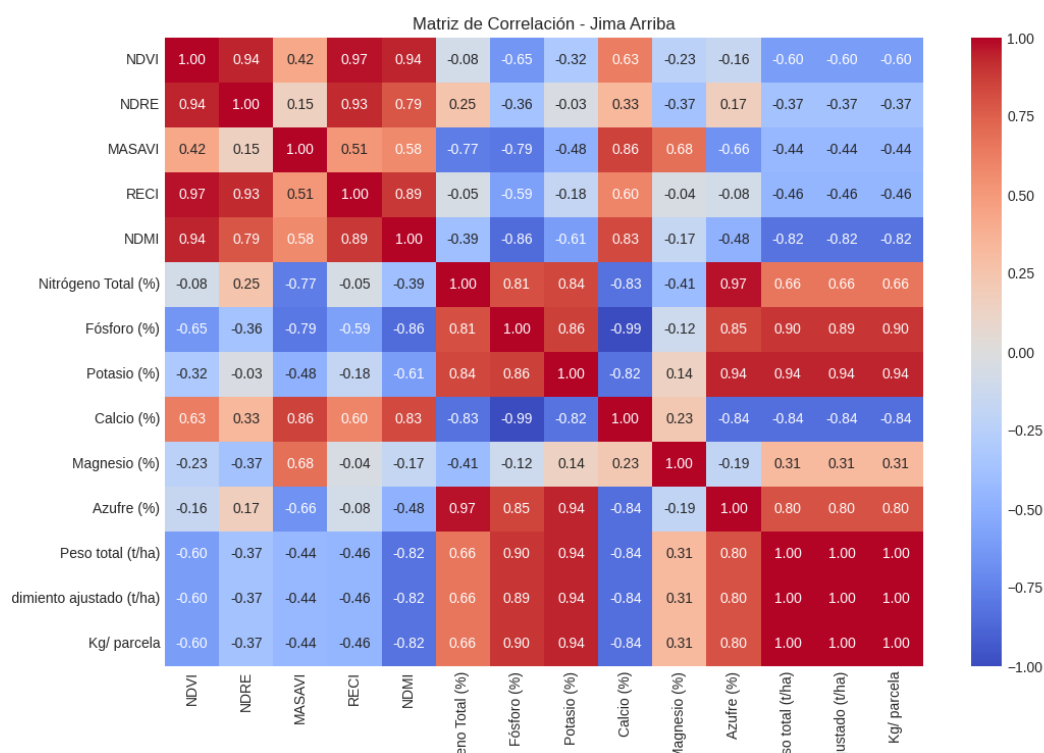
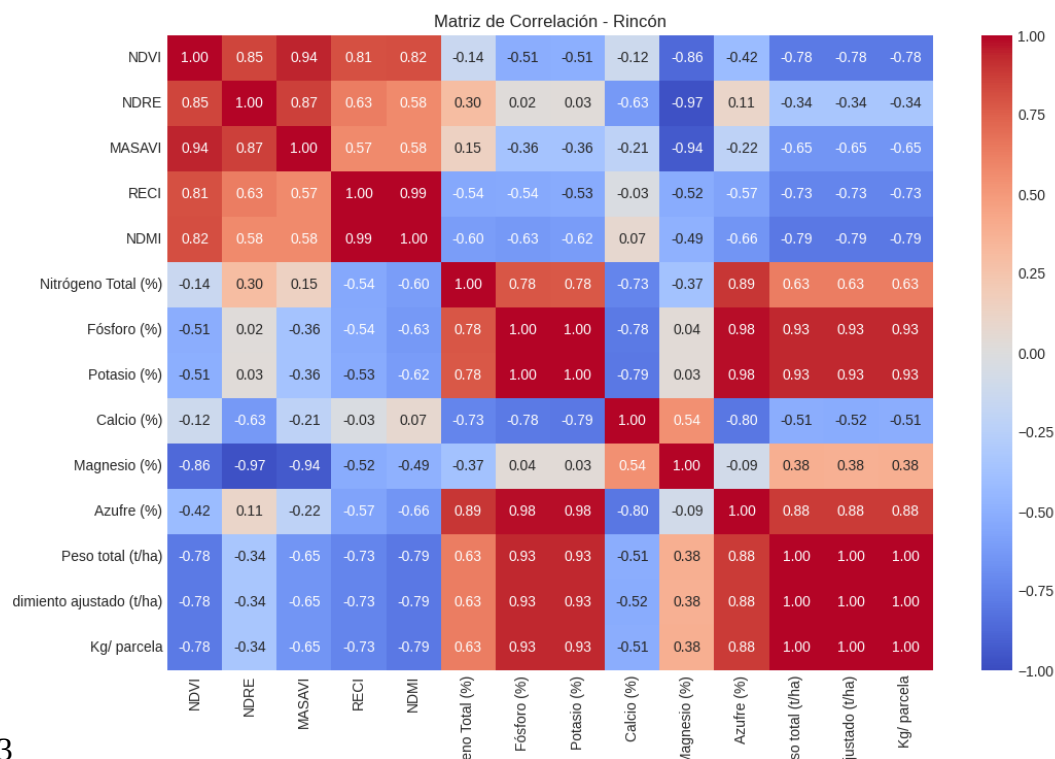


Figura 43. Jima Arriba. Matriz de correlación.



3

Figura 44. Rincón. Matriz de correlación.

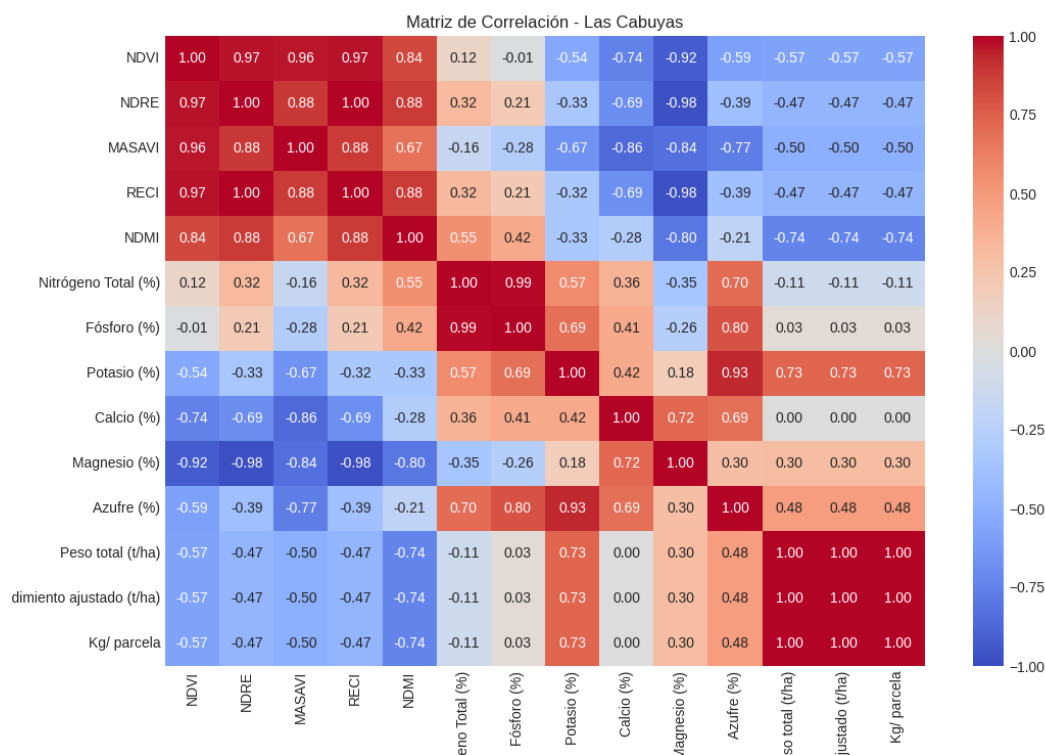


Figura 45. Las Cabuyas. Matriz de correlación.

4.4 Resultados Objetivo 4. Componentes de producción para la caracterización del rendimiento del cultivo de arroz bajo las condiciones de manejo existentes

Se evaluaron los componentes de producción que influyeron en el rendimiento del cultivo de arroz en las fincas evaluadas y bajo las condiciones de manejo actuales.

4.4.1. Cantidad promedio de panículas (espigas) por metro cuadrado

La Figura 46 muestra la cantidad promedio de panículas por metro cuadrado en las diferentes fincas de estudio. Aunque los valores varían, no se encuentran diferencias significativas entre las tres fincas. La finca de Rincón presenta el mayor promedio con 528 panículas/m², seguida de Jima Arriba con 423 panículas/m² y Las Cabuyas con 361 panículas/m². A pesar de las diferencias numéricas, estadísticamente no hay diferencias significativas ($p > 0.05$) entre fincas.

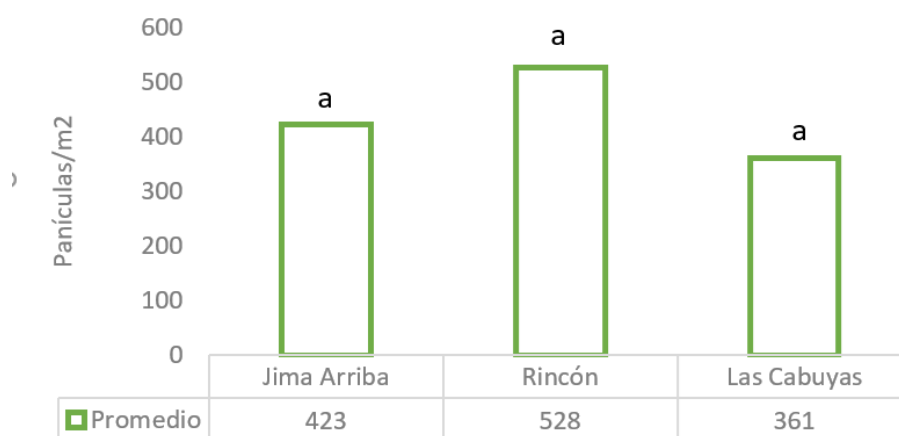


Figura 46. Cantidad promediode panículas/ m², según finca de estudio.

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

4.4.2. Longitud de panícula (LP, cm)

En el Cuadro 13 se observa que las longitudes promedio de panícula en las tres fincas evaluadas son bastante similares. Jima Arriba tiene un promedio de 21.26 cm, seguido por Rincón con 21.10 cm y Las Cabuyas con 20.79 cm. Estas diferencias son mínimas, lo que sugiere que, en términos generales, las panículas tienen un tamaño comparable en las tres fincas. Sin embargo, Las Cabuyas muestra una mayor variabilidad

en las longitudes de las panículas, lo que se refleja en una mayor desviación estándar (DE=8.93 cm) en comparación con Jima Arriba (DE=2.74 cm) y Rincón (DE=2.86 cm).

Cuadro 13. Longitud promedio de panícula (cm)

Localidad	n	Longitud (cm)	D.E.	E.E.
Jima Arriba	450	21.26 a	2.74	0.13
Las Cabuyas	450	20.79 a	8.93	0.42
Rincón	450	21.10 a	2.86	0.13

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$). DE=desviación estándar; EE: error estándar. n=numero de muestras.

4.4.3. Número de ramificaciones por panícula (RP, ramas/ panícula)

En el Cuadro 14 se observa que el número promedio de ramificaciones por panícula varía entre las tres localidades. Las Cabuyas presenta el mayor promedio con 10.59 ramificaciones, seguido de Jima Arriba con 9.44, y Rincón con el menor promedio de 8.28. Estas diferencias son significativas, como lo indican las letras asociadas a cada localidad. Además, Las Cabuyas muestra una mayor dispersión en el número de ramificaciones (D.E. = 2.13), mientras que Rincón tiene la menor variabilidad (D.E. = 1.25). El error estándar es bajo en todas las localidades, lo que sugiere que las medias son estimaciones confiables.

Cuadro 14. Número promedio de ramificaciones por panícula (RP, ramas/ panícula).

Localidad	n	Media	D.E.	E.E.
Jima Arriba	450	9.44 b	1.98	0.09
Las Cabuyas	450	10.59 c	2.13	0.10
Rincón	450	8.28 a	1.25	0.06

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$). DE=desviación estándar; EE: error estándar. n=numero de muestras.

4.4.4. Número de granos totales producidos por panícula

En el Cuadro 15, se muestra el número promedio de granos totales producidos por panícula (GPP) en las tres localidades estudiadas. **Las Cabuyas** presenta el mayor número promedio de granos por panícula, con 84.28 granos, seguido de **Jima Arriba** con 61.62 granos, y **Rincón** con el menor promedio de 58.07 granos. **Las Cabuyas** fue significativamente mayor de granos en comparación con las otras dos localidades, mientras que **Rincón** tiene el promedio más bajo. Además, **Las Cabuyas** muestra una mayor

dispersión en los datos (D.E.=30.19), lo que sugiere más variabilidad en el número de granos por panícula en esta localidad. Por otro lado, **Rincón** presenta la menor desviación estándar (D.E.=19.08), lo que implica menor variabilidad. El **error estándar** es relativamente bajo en todas las localidades, lo que indica que las medias son estimaciones confiables del número de granos producidos por panícula.

Cuadro 15. Número promedio de granos totales producidos por panícula.

Localidad	n	Media	D.E.	E.E.
Jima Arriba	450	61.62 b	23.43	1.10
Las Cabuyas	450	84.28 a	30.19	1.42
Rincón	450	58.07 c	19.08	0.90

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$). DE=desviación estándar; EE: error estándar. n=numero de muestras.

4.4.5. Número de granos cosechados (granos llenos/ panícula)

En el Cuadro 16, se muestra el número promedio de granos llenos cosechados por panícula (GLL) en las tres localidades estudiadas. **Las Cabuyas** tiene el mayor número de granos llenos por panícula, con un promedio de 84.28 granos, seguido de **Jima Arriba** con 61.62 granos y **Rincón** con el menor promedio de 58.07 granos. **Las Cabuyas** fue significativamente mayor de granos llenos que **Rincón**, pero no hay diferencias significativas entre **Jima Arriba** y **Las Cabuyas**. **Las Cabuyas** también presenta una mayor dispersión en el número de granos llenos, con una desviación estándar de 30.19, lo que sugiere mayor variabilidad en los datos. En cambio, **Rincón** tiene la menor desviación estándar (D.E.=19.08), indicando una menor variabilidad en el número de granos llenos. El **error estándar** es bajo en todas las localidades, lo que señala que las medias son estimaciones confiables del número de granos llenos por panícula.

Cuadro 16. Número promedio de granos cosechados por panícula (GLL, granos llenos/ panícula)

Localidad	n	Media	D.E.	E.E.
Jima Arriba	450	61.62 a	23.43	1.10
Las Cabuyas	450	84.28 a	30.19	1.42
Rincón	450	58.07 b	19.08	0.90

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$). DE=desviación estándar; EE: error estándar. n=numero de muestras.

4.4.6. Número de granos vanos por panícula (GV, granos vanos/ panícula)

En el Cuadro 17, se muestra el número promedio de granos vanos por panícula (GV) en las tres localidades estudiadas. Las Cabuyas tiene un promedio de 14.62 granos vanos por panícula, seguida por Jima Arriba con 14.46 granos, y Rincón con el menor promedio de 7.54 granos vanos. De acuerdo a los resultados, Rincón tiene una cantidad significativamente menor de granos vanos que Jima Arriba y Las Cabuyas, mientras que no se encontraron diferencias significativas entre Jima Arriba y Las Cabuyas ($p > 0.05$). En cuanto a la desviación estándar (D.E.), Jima Arriba y Las Cabuyas presentan una dispersión similar en los valores (D.E. = 14.01 y D.E. = 12.95, respectivamente), mientras que Rincón tiene una menor dispersión (D.E. = 6.79). El error estándar (E.E.) es bajo en todas las localidades, lo que sugiere que las medias son estimaciones confiables del número de granos vanos por panícula.

Cuadro 17. Número promedio de granos vanos por panícula (GV, granos vanos/ panícula)

Localidad	n	Media	D.E.	E.E.
Jima Arriba	450	14.46 b	14.01	0.66
Las Cabuyas	450	14.62 b	12.95	0.61
Rincón	450	7.54 a	6.79	0.32

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$). DE=desviación estándar; EE: error estándar. n=numero de muestras.

4.4.7. Peso de 1,000 semillas (granos)

En el Cuadro 18, se muestra el número promedio de peso de 1000 semillas (PMS) en las tres localidades estudiadas. Rincón tiene el mayor peso promedio de 1000 semillas con 27.00 g, seguido por Las Cabuyas con 25.67 g y Jima Arriba con 25.00 g. A pesar de estas diferencias en los valores promedio, las diferencias no son estadísticamente significativas ($p > 0.05$), lo que indica que, aunque los valores numéricos varían, estos no son lo suficientemente grandes como para ser considerados diferentes de manera estadística. En cuanto a la desviación estándar (D.E.), Rincón muestra la mayor variabilidad en el peso de las semillas (D.E.=1.73), mientras que Jima Arriba tiene una desviación estándar de 0.00, lo que sugiere que todas las mediciones fueron iguales. El error estándar (E.E.) es bajo en todas las localidades, lo que sugiere que las medias son estimaciones confiables del peso de 1000 semillas.

Cuadro 18. Número promedio de peso de 1000 semillas (granos) (g)

Localidad	n	Media	D.E.	E.E.
Jima Arriba	3	25.00 a	0.00	0.00
Las Cabuyas	3	25.67 a	0.58	0.33
Rincón	3	27.00 a	1.73	1.00

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$). DE=desviación estándar; EE: error estándar. n=numero de muestras.

4.4.8. Pureza física de la semilla

En el Cuadro 19, se muestra el número promedio de pureza física de la semilla en las tres fincas estudiadas, Rincón presenta la mayor pureza física de la semilla, con un promedio de 99 %, seguido de Las Cabuyas con 98 % y Jima Arriba con 95 %. Aunque Rincón tiene la mayor pureza, las diferencias entre las localidades son mínimas. En cuanto a la D.E., Rincón muestra la menor variabilidad (D.E.=0.006), indicando que las mediciones son más consistentes en esta localidad, mientras que Las Cabuyas y Jima Arriba presentan una mayor variabilidad (D.E.=0.010 y D.E.=0.055, respectivamente).

Cuadro 19. Porcentaje de pureza física de la semilla

Localidad	n	Media	D.E.	E.E.
Jima Arriba	3	0.95 a	0.055	0.032
Las Cabuyas	3	0.98 a	0.010	0.006
Rincón	3	0.99 a	0.006	0.003

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$). DE=desviación estándar; EE: error estándar. n=numero de muestras.

4.4.9. Porcentaje de germinación

En el Cuadro 20, se muestra el porcentaje promedio de germinación (PG, %). Rincón presenta el mayor porcentaje de germinación con 93.70 %, seguido de Jima Arriba con 80.07% y Las Cabuyas con 32.53 %.

Cuadro 20. Porcentaje de germinación (PG. %)

Localidad	n	Media	D.E.	E.E.
Jima Arriba	3	80.07 b	12.47	7.20
Las Cabuyas	3	32.53 a	14.47	8.35
Rincón	3	93.70 b	3.72	2.15

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$). DE=desviación estándar; EE: error estándar. n=numero de muestras.

Las diferencias entre las localidades son notorias, con Rincón significativamente superior en términos de germinación. En cuanto a la DE, Rincón tiene la menor variabilidad (DE=3.72), lo que indica que las mediciones de germinación son consistentes, mientras que Las Cabuyas muestra una mayor variabilidad (D.E. = 14.47), lo que sugiere una dispersión más amplia en los resultados. El error estándar (E.E.) también es bajo para Rincón (E.E. = 2.15), lo que indica que su estimación es confiable, mientras que Las Cabuyas tiene un mayor E.E. (8.35), lo que refleja una mayor incertidumbre en la estimación del porcentaje de germinación.

4.4.10. Rendimiento de grano (g/m²)

En el Cuadro 21, se muestra el rendimiento promedio de grano en gramos por metro cuadrado (g/m²) en las tres localidades estudiadas. Rincón presenta el mayor rendimiento con 718.67 g/m², seguido de Las Cabuyas con 650.67 g/m² y Jima Arriba con 619.00 g/m². A pesar de que Rincón tiene el mayor rendimiento, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las tres localidades ($p > 0.05$), lo que indica que las diferencias en los rendimientos no son lo suficientemente grandes para ser consideradas relevantes en términos estadísticos. En cuanto a la desviación estándar (D.E.), Rincón muestra la mayor variabilidad en los rendimientos (D.E. = 168.78), lo que sugiere que las mediciones en esta localidad son más dispersas, mientras que Las Cabuyas presenta la menor variabilidad (D.E. = 23.09). El error estándar (E.E.) es bajo en todas las localidades, lo que indica que las medias son estimaciones confiables del rendimiento de grano.

Cuadro 21. Rendimiento de grano (g/m²)

Localidad	n	Media	D.E.	E.E.
Jima Arriba	3	619.00 a	65.00	37.53
Las Cabuyas	3	650.67 a	23.09	13.33
Rincón	3	718.67 a	168.78	97.44

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$). DE=desviación estándar; EE: error estándar. n=numero de muestras.

4.4.11. Rendimiento de grano (kg/ parcela)

En la Figura 47 se presenta el rendimiento de grano expresado en kilogramos por parcela para los tratamientos evaluados, lo que permite comparar de manera visual la respuesta productiva del cultivo.

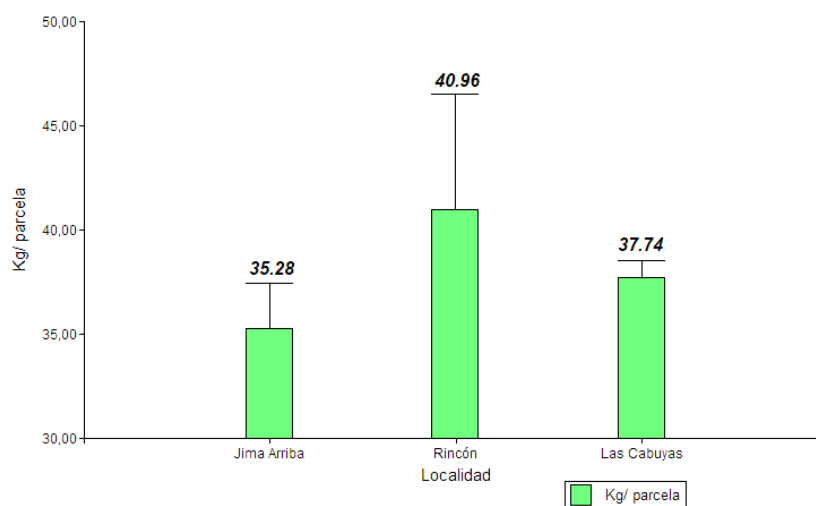


Figura 47. Rendimiento de grano de arroz kg/parcela, según finca de estudio.

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Se observa que Rincón muestra el mayor rendimiento promedio, con 40,96 kg/parcela, seguido por Las Cabuyas con 37,74 kg/parcela, mientras que Jima Arriba registra el valor más bajo, con 35,28 kg/parcela. El gráfico muestra la distribución del rendimiento en las parcelas (fincas), acorde al área evaluada, evidenciando diferencias en la producción de grano que pueden asociarse al manejo nutricional, las condiciones edáficas y las particularidades de cada localidad.

4.4.12. Rendimiento de grano (T/ha)

En el Cuadro 22, se muestra el rendimiento promedio de grano en toneladas por hectárea (T/ha) en las tres localidades estudiadas. **Rincón** tiene el mayor rendimiento con 7.19 t/ha, seguido de **Las Cabuyas** con 6.51 T/ha y **Jima Arriba** con 6.19 T/ha. Aunque **Rincón** tiene el rendimiento más alto, **no se encontraron diferencias estadísticamente significativas** entre las tres localidades ($p > 0,05$), lo que sugiere que las diferencias observadas en los rendimientos no son lo suficientemente grandes como para ser consideradas relevantes.

Cuadro 22. Rendimiento de grano (T/ha)

Localidad	n	Media	D.E.	E.E.
Jima Arriba	3	6.19 a	0.65	0.38
Las Cabuyas	3	6.51 a	0.23	0.13
Rincón	3	7.19 a	1.69	0.97

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$). DE=desviación estándar; EE: error estándar. n=numero de muestras.

En el Cuadro 23, se presenta el rendimiento ajustado de grano (T/ha), considerando un ajuste por humedad. **Rincón** sigue siendo la localidad con el rendimiento más alto, con 6.78 t/ha, seguida de **Las Cabuyas** con 6.14 T/ha y **Jima Arriba** con 5.84 T/ha. Al igual que en el cuadro anterior, **no se encuentran diferencias significativas** entre las tres localidades ($p > 0,05$). En términos de **D.E.**, **Rincón** muestra la mayor variabilidad tanto en el rendimiento de grano como en el rendimiento ajustado, lo que indica que los valores son más dispersos en esta localidad. El **E.E.** es relativamente bajo en todas las localidades, lo que indica que las medias son estimaciones confiables en ambos casos.

Cuadro 23. Rendimiento de grano ajustado (T/ha)

Localidad	n	Media	D.E.	E.E.
Jima Arriba	3	5.84 a	0.62	0.36
Las Cabuyas	3	6.14 a	0.21	0.12
Rincón	3	6.78 a	1.59	0.92

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$). DE=desviación estándar; EE: error estándar. n=numero de muestras.

4.4.13. Concentración de nutrientes foliares y su relación con el rendimiento total y rendimiento ajustado del cultivo de arroz

El Cuadro 24 integra la información nutricional foliar del cultivo de arroz (N, P, K, Ca, Mg y S) con los indicadores productivos (peso total, rendimiento ajustado y kilogramos por parcela), lo que permite analizar de manera conjunta el estado nutricional del cultivo y su respuesta en productividad para las localidades de Jima Arriba, Rincón y Las Cabuyas durante los diferentes muestreos del ciclo.

Cuadro 24. Concentración de nutrientes foliares, rendimiento total y rendimiento ajustado del cultivo de arroz.

Finca	N Total (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	S (%)	Rendimiento total (T/ha)	Rendimiento ajustado (T/ha)	Kg/ parcela
Jima Arriba	3.59	0.27	3.60	0.29	0.22	0.21	6.94	6.55	39.56
	2.95	0.22	1.76	0.39	0.19	0.14	5.79	5.46	33.00
	1.35	0.19	1.36	0.48	0.23	0.07	5.84	5.51	33.29
	2.05	0.24	1.66	0.35	0.21	0.10	6.19	5.84	35.28
Rincón	2.48	0.36	2.82	0.33	0.22	0.21	9.08	8.57	51.76
	2.03	0.20	1.30	0.40	0.17	0.10	5.84	5.51	33.29
	1.32	0.20	1.31	0.46	0.24	0.07	6.64	6.26	37.85
	1.87	0.21	1.38	0.51	0.25	0.10	7.19	6.78	40.96
Las Cabuyas	3.28	0.28	2.73	0.56	0.29	0.23	6.64	6.26	38.51
	2.99	0.25	2.31	0.42	0.24	0.16	6.64	6.26	38.51
	3.38	0.26	1.52	0.49	0.25	0.14	6.24	5.89	36.19
	1.22	0.12	1.38	0.46	0.28	0.10	6.51	6.14	37.74
Rangos deseados	2.5–4.5	0.15–0.40	2.0–4.0	0.30–0.60	0.20–0.40	0.08–0.15	-	-	-

Fuente: Datos obtenidos de análisis de laboratorio en muestras vegetales (foliares), 2025. Cada valor se relaciona con los muestreos foliares realizados

En **Jima Arriba**, el **N foliar** varió entre **1.35–3.59%**: en el primer muestreo (3.59%) estuvo dentro del rango deseado (2.5–4.5%) y coincidió con un **rendimiento ajustado** alto (**6.55 t/ha**) (Cuadro 24). En muestreos posteriores, la caída del N a **1.35–2.05%** se asoció con una leve reducción del rendimiento (**5.51–5.84 t/ha**), sugiriendo sensibilidad productiva a la disminución de N. El **K** descendió de **3.60%** a **1.36–1.66%**, pasando de rango (2.0–4.0%) a valores bajo el umbral, en concordancia con una estabilización o ligera caída del rendimiento. **P**, **Ca** y **Mg** se mantuvieron mayormente en rango, mientras que el **S** bajó de **0.21%** a **0.07–0.10%**, lo que pudo limitar la eficiencia de uso del N (Cuadro 24).

En **Rincón** se registraron los mayores niveles de productividad, con un **rendimiento ajustado máximo de 8.57 t/ha** en el primer muestreo, coincidente con **K** = **2.82%** y **P** = **0.36%** (dentro o por encima del rango deseado). No obstante, el **N inicial** (**2.48%**) estuvo ligeramente por debajo del óptimo, lo que sugiere que el alto rendimiento se asoció más a una buena provisión de **K** y **P** que a N (Cuadro 24). En los muestreos siguientes, la caída del **K** a **1.30–1.38%** junto con **N bajo** (**1.32–2.03%**) se reflejó en una

reducción del rendimiento (**5.51–6.78 t/ha**), evidenciando una limitación nutricional progresiva; **Ca** y **Mg** se mantuvieron en rangos de suficiencia y no parecen restrictivos (Cuadro 24).

En **Las Cabuyas**, el **N** se mantuvo dentro o por encima del rango durante los tres primeros muestreos (**2.99–3.38%**), con rendimientos relativamente estables (**5.89–6.26 t/ha**), lo que sugiere que otros factores pudieron estar condicionando la productividad. El **K** disminuyó de valores adecuados (**2.73–2.31%**) a niveles bajos (**1.38–1.52%**) en los últimos muestreos, en concordancia con una leve reducción del rendimiento; **P**, **Ca** y **Mg** permanecieron mayormente en rangos adecuados y el **S** fue alto al inicio (**0.23%**) y adecuado al final (**0.10–0.14%**) (Cuadro 24).

De forma integrada, el **Cuadro 24** indica que los mayores rendimientos se asociaron a combinaciones de niveles adecuados de **N–P–K** (Rincón en el primer muestreo y Las Cabuyas en muestreos intermedios). Cuando **K** descendió por debajo del rango o **N** se mantuvo bajo, el rendimiento tendió a disminuir aun con **Ca** y **Mg** en rangos adecuados, lo que refuerza el papel combinado de **N** y **K** como condicionantes más directos de productividad y respalda su integración con los índices espectrales **RPAS/satelitales** para diagnóstico nutricional y predicción de rendimiento.

4.4.14. Análisis de la relación entre NDVI y rendimiento ajustado (t/ha) del cultivo de arroz

Las **Figuras 48–53** integran las relaciones entre los **índices espectrales** (RGB y satelitales), los **nutrientes foliares** y el **rendimiento** del arroz en las tres fincas. En particular, los **gráficos de dispersión** (Figuras 48–50) muestran la relación entre **NDVI** y **rendimiento ajustado (t/ha)** por localidad, permitiendo evaluar la asociación entre vigor del dosel y productividad. En **Jima Arriba** se observó una relación **positiva moderada**, sugiriendo que mayores valores de NDVI se vinculan con mayor rendimiento (Figura 48). En **Rincón** (Figura 49) y **Las Cabuyas** (Figura 50), la relación fue **más débil**, con mayor dispersión de puntos y baja correlación, lo que indica que el rendimiento podría estar influido de forma importante por otros factores, como el manejo agronómico o las condiciones edáficas específicas de cada finca.

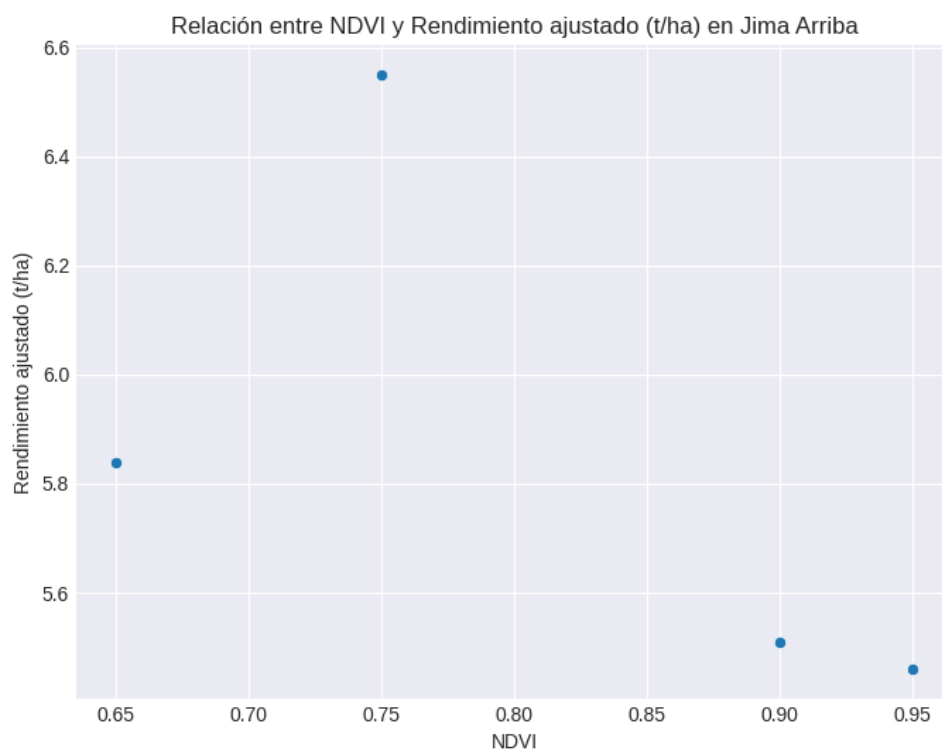


Figura 48. Jima Arriba. Gráfico de dispersión NDVI vs. rendimiento ajustado (T/ha).

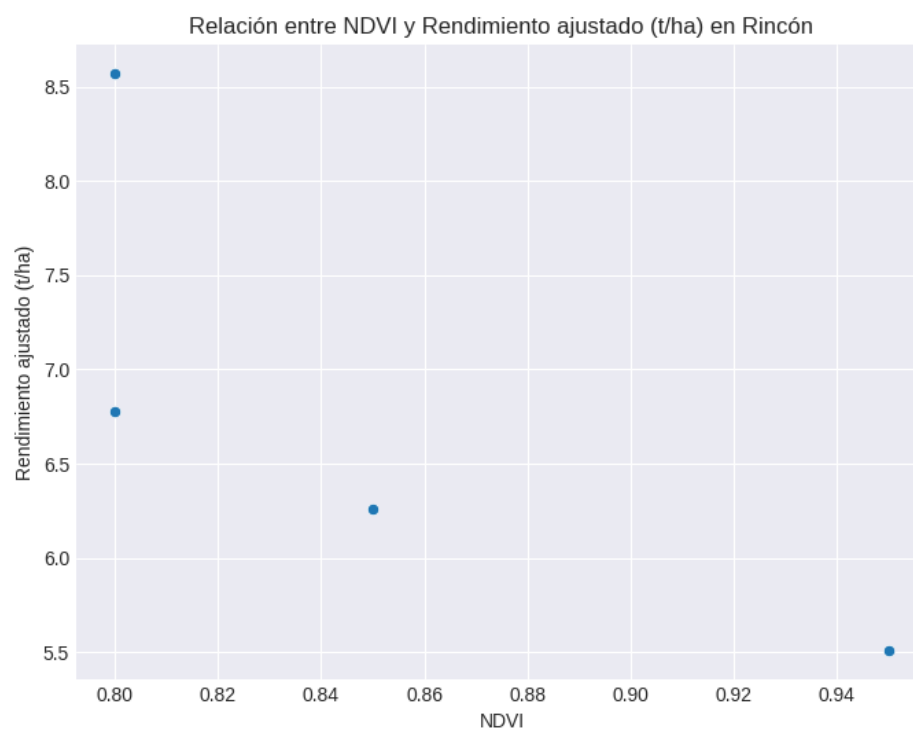


Figura 49. Rincón. Gráfico de dispersión NDVI vs. rendimiento ajustado (T/ha).

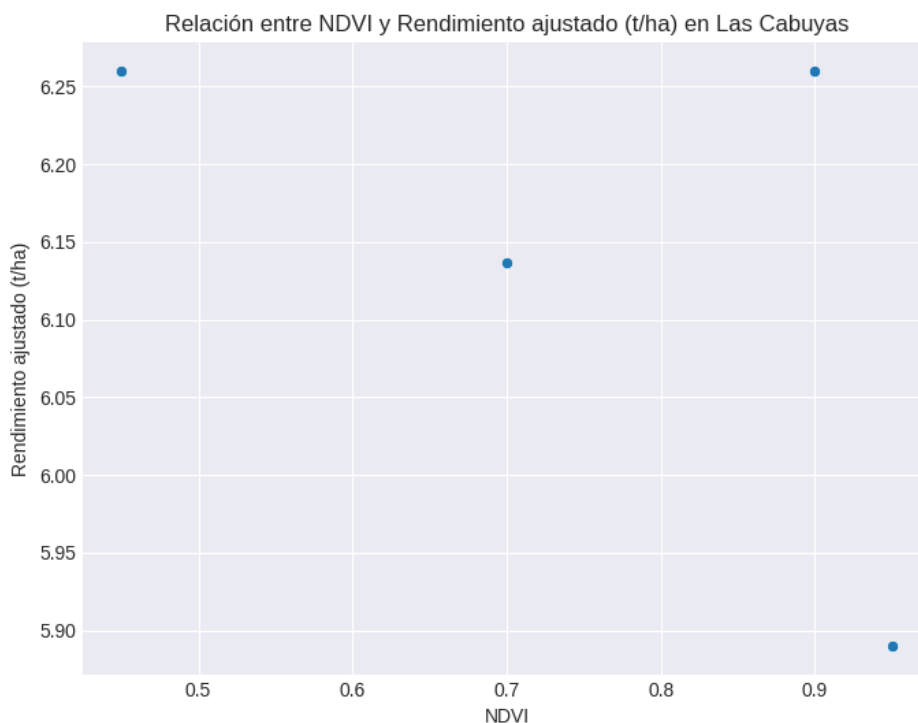


Figura 50. Las Cabuyas. Gráfico de dispersión NDVI vs. rendimiento ajustado (T/ha).

4.4.14.1. Análisis de la distribución y correlación de nutrientes foliares, índices espectrales y rendimiento

Los **boxplots** (Figuras 51–53) describen la **distribución** y **variabilidad** de las variables numéricas y evidencian diferencias entre fincas. En **Jima Arriba** (Figura 51), los índices espectrales **NDVI** y **RECI** se concentran en rangos estrechos, lo que sugiere un dosel relativamente **homogéneo**, posiblemente asociado a un manejo más uniforme. En contraste, las variables de **rendimiento** (total y ajustado, t/ha) muestran **mayor dispersión**, evidenciando variabilidad productiva que podría relacionarse con heterogeneidad local del suelo, disponibilidad de nutrientes o prácticas agronómicas. Al integrar estos resultados con el análisis de correlación, es posible explorar cómo la variabilidad espectral y nutricional se vincula con el desempeño del cultivo. En los **nutrientes foliares** se observa una concentración de valores relativamente bajos de **K**, **Ca** y **P**, lo que sugiere una **posible insuficiencia** en parte del muestreo; en particular, niveles bajos de **K (%)** y **P (%)** podrían contribuir a la variabilidad del rendimiento y reflejar brechas de manejo (dosis, momento o distribución de la fertilización) o limitaciones edáficas que afectan su disponibilidad.

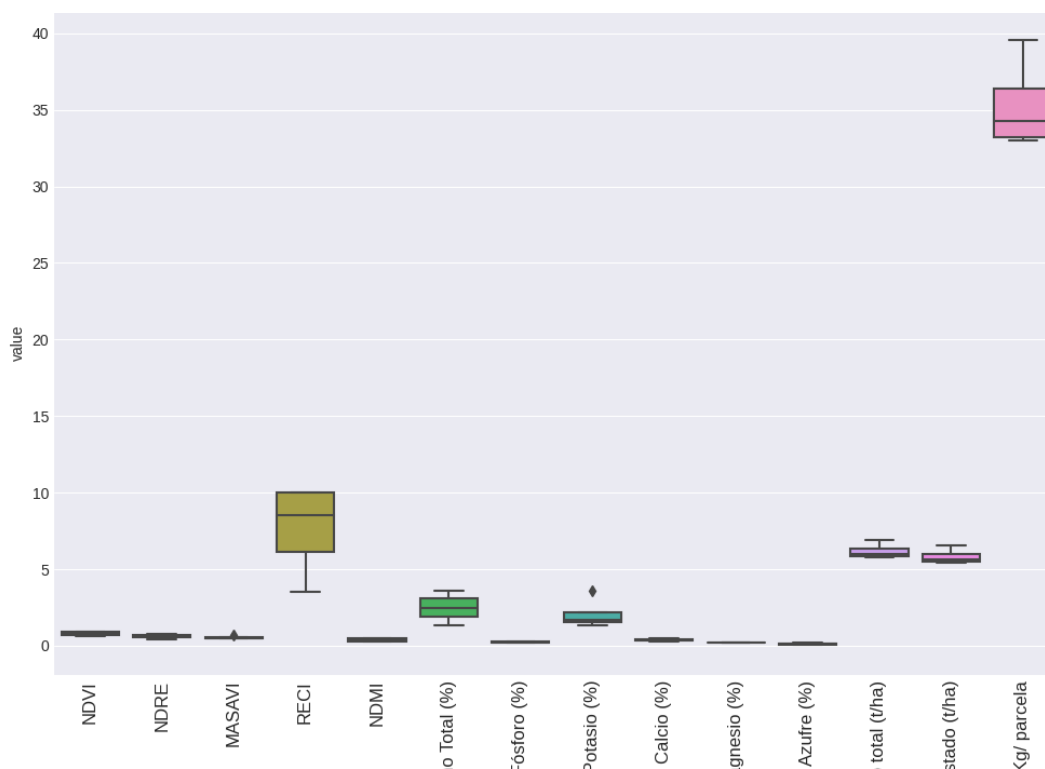


Figura 51. Boxplots de variables numéricas, finca Jima Arriba.

Los **boxplots de finca Rincón** (Figura 52) evidencian una **alta variabilidad** en nutrientes críticos como **K (%)** y **Ca (%)**, confirmando una distribución heterogénea dentro de la parcela que puede limitar el rendimiento al generar diferencias de desarrollo entre sectores; en particular, la mayor dispersión del **K** sugiere que áreas con niveles bajos podrían asociarse con **rendimientos menores** frente a zonas con mejor provisión. Además, **NDVI** y **MSAVI** mostraron **correlaciones significativas** con algunos nutrientes, especialmente **K (%)** y **P (%)**, indicando que los sectores con mayor vigor (valores más altos de NDVI) tienden a coincidir con mayores concentraciones de estos elementos. Sin embargo, el **rendimiento ajustado** presentó una **correlación negativa débil** con los índices espectrales, lo que sugiere que otros factores (manejo agronómico o condiciones edáficas) podrían estar influyendo con mayor peso en la productividad de esta finca. En contraste, **S (%)** y **Mg (%)** exhibieron una distribución más homogénea, lo que apunta a una disponibilidad más uniforme a escala de parcela.

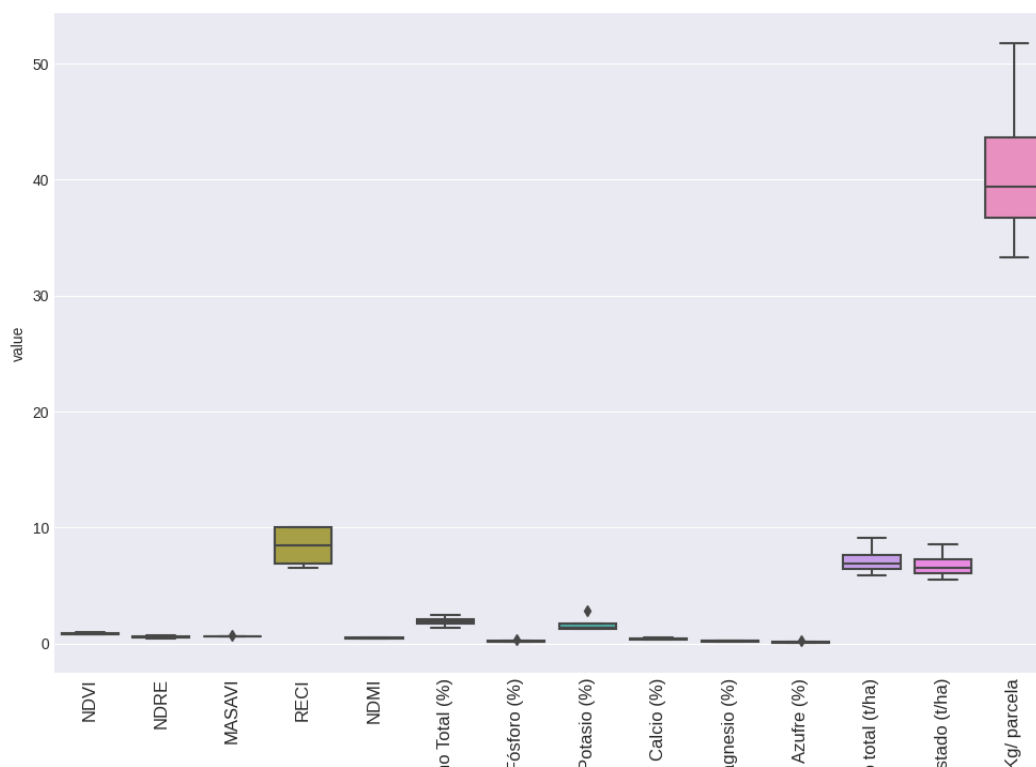


Figura 52. Boxplots de variables numéricas, finca Rincón.

En **Las Cabuyas**, los **boxplots** (Figura 53) muestran una dispersión marcada en nutrientes como **K (%)** y **Ca (%)**, similar a Rincón, lo que evidencia **heterogeneidad intra-parcela** que podría afectar el rendimiento en sectores específicos. Esta variación sugiere diferencias locales en la disponibilidad de K y Ca, potencialmente asociadas al manejo o a condiciones edáficas, y con capacidad de limitar el desempeño del cultivo. Los índices **NDVI** y **MSAVI** presentaron **correlaciones significativas** con **K (%)** y **Ca (%)**, indicando que las áreas con mayor vigor tienden a coincidir con mayores concentraciones de estos nutrientes. En contraste, **S (%)** y **Mg (%)** exhibieron una distribución más homogénea, lo que sugiere una disponibilidad más uniforme; aun así, la variabilidad de **K** y **Ca** refuerza la necesidad de optimizar su manejo para reducir la dispersión del rendimiento y mejorar la productividad.

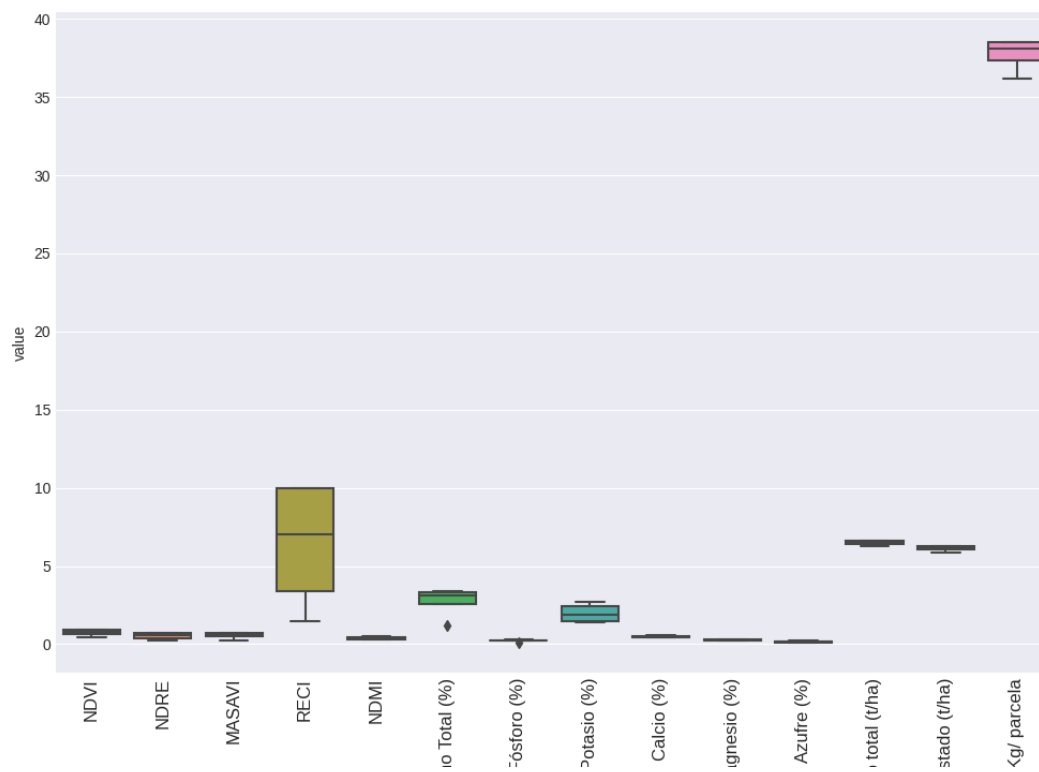


Figura 53. Boxplots de variables numéricas finca Las Cabuyas.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan las **conclusiones y recomendaciones** del estudio, a partir de una síntesis integrada de los resultados en relación con los objetivos planteados. Se destacan los hallazgos clave y sus implicaciones técnicas, ambientales y operativas para el manejo del cultivo a escala de finca, y se proponen recomendaciones para fortalecer la toma de decisiones y optimizar futuros monitoreos y diagnósticos, considerando las limitaciones y oportunidades identificadas..

5.1. Conclusiones

5.1.1. Conclusiones asociadas al objetivo específico a

Las propiedades texturales confirmaron suelos aptos para arroz bajo inundación, con predominio de fracciones finas y buena retención de agua; aunque hubo variaciones texturales entre localidades, no se evidenciaron limitaciones físicas generalizadas. La **CE del suelo** mostró contrastes espaciales y cambios entre muestreos: en algunas fincas se mantuvo baja o disminuyó, mientras que en otra aumentó, sugiriendo acumulación de sales solubles y la influencia del riego y drenaje. El **pH** varió de ligeramente ácido–neutro a moderadamente alcalino, condicionando la disponibilidad de nutrientes (especialmente micronutrientes sensibles a alcalinidad) y la respuesta del cultivo bajo anegamiento, donde los procesos redox modulan la movilidad de elementos.

La **MO** se mantuvo en rangos favorables para la fertilidad y la estabilidad estructural bajo inundación, aportando **CIC** y amortiguación química; el **N total** fue coherente con esa condición, aunque las inconsistencias entre registros iniciales y finales obligan a cautela e indican la necesidad de fortalecer el control de calidad y la trazabilidad analítica. El **P disponible** mostró contrastes marcados entre localidades, desde niveles potencialmente limitantes hasta concentraciones elevadas que requieren vigilancia por riesgo de acumulación, por lo que la reposición debe ajustarse a la condición inicial y al balance del ciclo. El **K intercambiable** también fue heterogéneo (suficiencia intermedia, posible limitación y niveles altos asociados a mayor saturación de bases), con implicaciones directas en macollamiento y llenado de grano, por lo que su manejo debe integrarse con el diagnóstico foliar y la dinámica de fertilización del productor.

Los cationes intercambiables **Ca** y **Mg** evidenciaron una condición general de bases **favorable** en las localidades evaluadas, aunque con diferencias de magnitud. En algunos suelos arcillosos, la **alta saturación de bases** se asoció con **pH más elevado**, lo que orienta la interpretación de la **competencia catiónica** y de posibles restricciones de **micronutrientes** bajo condiciones de alcalinidad.

La **calidad del agua de riego** se ubicó en un rango de **salinidad baja a media**, compatible con un riesgo limitado de salinización bajo un drenaje adecuado; el **pH** varió de ácido a neutro, sin restricción inmediata, aunque la **composición iónica** difirió entre localidades y puede influir en la evolución química del suelo bajo inundación. El **Na** fue bajo en algunas fincas y mayor en otra, con un indicador de sodicidad aún en rangos de bajo riesgo, pero suficiente para justificar seguimiento conjunto con la **CE del suelo** y prácticas de **lavado y drenaje**, especialmente en suelos finos. Asimismo, **K**, **cloruros** y algunos aniones estuvieron por encima de referencias deseables, sin configurar un escenario crítico inmediato, pero sí una condición que amerita **monitoreo continuo** por su potencial contribución a la acumulación salina; el **Fe** fue moderado y los elementos potencialmente tóxicos se mantuvieron bajos o no detectables, indicando **bajo riesgo de intoxicación**.

5.1.2. Conclusiones asociadas al objetivo específico b

La captura multitemporal con **RPAS** generó productos fotogramétricos útiles a escala de parcela (ortomosaicos RGB y modelos digitales), que permitieron interpretar espacialmente el dosel, identificar patrones intra-parcela y comparar fincas de forma consistente al asociar cada vuelo con etapas fenológicas clave. Los ortomosaicos evidenciaron variabilidad desde fases tempranas, con contrastes de color y textura vinculados a diferencias locales de cobertura y vigor, lo que facilitó orientar inspecciones dirigidas y priorizar zonas con comportamiento atípico.

Los índices visibles derivados de RGB describieron de manera coherente la dinámica del verdor: incremento del vigor desde el establecimiento hasta la fase reproductiva y posterior disminución en maduración, asociada a senescencia y redistribución de asimilados. En vegetativa, los mapas mostraron heterogeneidad marcada y sectores de menor verdor, confirmando sensibilidad para detectar variaciones iniciales

de establecimiento y desarrollo con potencial de apoyar decisiones oportunas. En reproductiva, se observó intensificación del verdor y mayor continuidad espacial, aunque persistieron gradientes internos que reflejan diferencias locales en biomasa y actividad fotosintética; en floración, la señal espectral fue consistente con un estado de vigor elevado.

En maduración, los índices registraron una reducción sostenida del verdor, coherente con el envejecimiento fisiológico y el énfasis del cultivo en el llenado de grano, lo que ayuda a reconocer transiciones fenológicas y evitar interpretar como estrés una disminución propia del ciclo. Finalmente, la comparación entre índices mostró **complementariedad**: uno representó transiciones más graduales y patrones más continuos, mientras otro acentuó contrastes locales, permitiendo seleccionarlos según el objetivo operativo (detección puntual de zonas problemáticas o seguimiento global del vigor).

5.1.3. Conclusiones asociadas al objetivo específico c

Los **índices satelitales** permitieron caracterizar el vigor del cultivo a escala de finca y describir patrones espaciales coherentes con la condición del dosel observada en los productos **RPAS**. Los índices asociados a **verdor y biomasa** mostraron predominio de vegetación densa en algunas fincas, mientras que en otra se evidenció una heterogeneidad espacial más marcada, reflejando contrastes internos de vigor. El índice orientado a **minimizar la influencia del suelo** reprodujo los patrones del índice de verdor con una señal más suavizada, facilitando la delimitación de transiciones entre zonas sin amplificar ruido por suelo expuesto y aportando estabilidad en la lectura del dosel.

Los índices vinculados al **contenido relativo de clorofila** discriminaron diferencias locales en la condición del follaje; en particular, el índice de clorofila resaltó con mayor contraste la variabilidad espacial respecto al índice *red-edge*, delimitando áreas de valores altos y bajos con potencial diagnóstico de variaciones nutricionales o fisiológicas dentro de una misma finca. En paralelo, los **nutrientes foliares** siguieron una dinámica coherente con el ciclo del arroz: el **N** tendió a disminuir hacia etapas avanzadas, mientras **P** y **K** mostraron mayor estabilidad durante fases de alta demanda y variaciones al avanzar la maduración; **Ca** y **Mg** se mantuvieron relativamente más estables, en concordancia con su menor movilidad.

La integración índice–nutriente mostró asociaciones variables según finca y condición del dosel, con relaciones directas e inversas que requieren interpretar el efecto de **dilución por biomasa** y la heterogeneidad espacial. En la finca más heterogénea, las asociaciones fueron menos consistentes, reforzando el peso de factores edáficos y de manejo sobre la respuesta espectral. Metodológicamente, la coherencia espacial entre mapas RPAS y satelitales respalda su uso complementario: RPAS aporta detalle intra-parcela para localizar zonas de variación y el satélite brinda continuidad temporal para seguimiento operativo, especialmente al integrarse con muestreos foliares georreferenciados. En este marco, los índices basados en **red-edge** y **clorofila** resultaron los más informativos para describir el estado fisiológico del dosel y discriminar variaciones locales relevantes para decisiones de nutrición.

5.1.4. Conclusiones asociadas al objetivo específico d

Los **componentes de producción** evidenciaron diferencias entre fincas, aunque varios no mostraron contrastes estadísticos marcados, lo que sugiere que el rendimiento respondió a la **combinación** de componentes y a su variabilidad interna. La **densidad de panículas** tendió a ser mayor en una localidad, indicando mayor potencial reproductivo, mientras que la **longitud de panícula** fue comparable entre fincas y con mayor variación interna en una de ellas, por lo que no se perfila como el principal factor diferenciador. En cambio, el **número de ramificaciones por panícula** sí diferenció localidades y se asoció con mayores **granos totales** y **granos llenos**, aunque estos indicadores deben interpretarse con cautela por posibles duplicidades en el reporte.

La proporción de **granos vanos** fue menor en una finca, sugiriendo mejor eficiencia de llenado y menor estrés en etapas críticas (nutrición y estabilidad hídrica), mientras que el **peso de semilla** varió sin separar fuertemente, aunque tendió a ser mayor donde el desempeño global fue mejor. En calidad de semilla, la **pureza física** resultó alta y homogénea, pero la **germinación** mostró diferencias notorias, indicando que la calidad fisiológica puede ser un cuello de botella independiente.

El **rendimiento ajustado por humedad** presentó tendencias favorables hacia una localidad, pero sin conclusiones consistentes en todos los contrastes, por lo que debe leerse como resultado de múltiples factores (componentes, calidad de semilla y condición

edáfica). Finalmente, las relaciones entre rendimiento e **índices espectrales** no fueron uniformes entre fincas, lo que respalda el desarrollo de **modelos locales** que integren variables edáficas y nutricionales para mejorar la predicción a partir de teledetección.

5.2. Recomendaciones

A continuación se presentan las recomendaciones derivadas del estudio, formuladas a partir de una interpretación integrada de los resultados en relación con los objetivos planteados. Estas se orientan a mejorar la toma de decisiones agronómicas a escala de finca, optimizar el manejo del suelo, el agua y la nutrición del cultivo, y fortalecer el uso operativo de productos geoespaciales generados mediante RPAS e información satelital. Asimismo, se proponen acciones para aumentar la trazabilidad y la consistencia metodológica del monitoreo, de modo que los hallazgos se traduzcan en intervenciones más eficientes. Se recomienda lo siguiente:

Fortalecer el manejo sitio-específico de la fertilidad, ajustando la fertilización por finca y por condición inicial. En suelos con **P bajo**, programar reposición estratégica y oportuna para evitar extracción neta; en suelos con **P alto**, evitar aplicaciones adicionales y sostener un seguimiento sistemático que reduzca riesgos de acumulación y pérdidas, complementando con un control periódico del agua de riego (CE, cloruros, K y aniones asociados a salinidad) para anticipar incrementos graduales y ajustar el manejo en ciclos sucesivos.

Implementar un monitoreo continuo de **salinidad y sodio** en suelo y agua integrando **CE, Na** y balance iónico. En fincas con tendencia al incremento de sales, reforzar el manejo de **riego y drenaje** y evaluar lavados en ventanas operativas que no comprometan la fisiología del cultivo; además, en suelos con **pH moderadamente alcalino**, aplicar medidas que mejoren la disponibilidad de micronutrientes sensibles a la alcalinidad (p. ej., enmiendas acidificantes cuando corresponda y mayor aporte de materia orgánica estabilizada), mientras que en suelos cercanos a neutralidad o ligeramente ácidos se deben mantener prácticas que eviten acidificación excesiva y pérdidas por lixiviación.

Consolidar un protocolo operativo de vuelos **RPAS** que estandarice altura, solape, condiciones de iluminación y registro de metadatos por campaña, e incorporar control de calidad fotogramétrico en cada procesamiento (consistencia geométrica y, cuando sea posible, GCP o RTK) para reducir la incertidumbre espacial, especialmente cuando los resultados se integran con muestreos foliares georreferenciados. Usar los mapas de índices visibles para recorridos de campo dirigidos a zonas de bajo vigor en etapa vegetativa e intervenir temprano, seleccionando el índice según el objetivo (uno más sensible para focos puntuales y otro para seguimiento global) y apoyándose en una guía fenológica que diferencie disminuciones por senescencia natural en maduración de disminuciones por estrés.

Mantener la integración **RPAS–satélite** como enfoque complementario, utilizando RPAS para el detalle intra-parcela y satélite para continuidad temporal, priorizando índices basados en **red-edge/clorofila** para orientar muestreos foliares dirigidos y mejorar la pertinencia del diagnóstico. Alinear temporalmente la adquisición de imágenes con el muestreo foliar y estandarizar el control de calidad de muestreo y laboratorio (trazabilidad, revisión de unidades y consistencia entre muestreos) para evitar sesgos por registros inconsistentes; para futuros estudios, ampliar diseños de muestreo que capturen gradientes de suelo y registrar sistemáticamente prácticas de manejo, avanzando hacia reglas o modelos predictivos locales que integren suelo–nutrición–fenología con los índices espectrales para mejorar decisiones y comparabilidad entre campañas.

Referencias Bibliográficas

- Abaca, F.M. (2024). Ensayos comparativos de rendimiento de trigo pan en la Chacra Valles Irrigados Norpatagónicos. Disponible en: <https://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/7014>
- Abarca Baeza, F.L., & González Rodríguez, M.M. (2024). Análisis jurídico y viabilidad del reparto de mercancías a través de drones en Chile: desafíos regulatorios en el derecho comparado. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/203567>
- Acevedo, M.A., Castrillo, W.A., & Belmonte, U.C. (2006). Origen, evolución y diversidad del arroz. *Agronomía tropical*, 56(2), 151-170. Disponible en : https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0002-192X2006000200001&script=sci_arttext
- Acosta Bohórquez, A.F. (2021). Estudio teórico de las afectaciones y soluciones de contaminación de fuentes hídricas por exceso de nitrógeno debido a operación de cultivos de arroz en Casanare, Colombia. Disponible en: <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/44804>
- Adames Farías, Á., Nova Peña, J. A., Flores, D., & López, R. (2020). El mejoramiento genético del arroz en República Dominicana: Una historia de éxito [PDF]. Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (IDIAF). <https://idiaf.gob.do/publicaciones/pdf/Arroz%20Mejoramiento%20Genetico%20del%20Arroz%20Idiaf.pdf>
- Agisoft Metashape. (s/f). Agisoft Metashape. Disponible en: <https://www.agisoft.com/>
- Agrawal, P. S., Jawarkar, P. S., Dhakate, K. M., Parthani, K. M., & Agnihotri, A. S. (2024). Advancements and challenges in drone technology: A comprehensive review. In 2024 4th International Conference on Pervasive Computing and Social Networking (ICPCSN) (pp. 638-644). IEEE.
- Ahmad. A., Martos. V., Cartujo. P. & Ordoñez. J. (2021). Garantizar la sostenibilidad agrícola mediante teledetección en la era de la agricultura 5.0 . *Ciencias Aplicadas*. 11 (13). 5911. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/app11135911>
- Alcaraz Henarejos, A. (2024). Desarrollo de un modelo predictivo para el rendimiento en el cultivo de arroz, en Valencia, a partir de imágenes multiespectrales de satélite y dron. Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/209811>
- Alexandre, M.L.D.S., & Lima, I.D.L., Nilsson, M.S., Rizzo, R., Silva, C.A.A.C., & Fiorio, P.R. (2025). Sugarcane (*Saccharum officinarum*) Productivity Estimation Using Multispectral Sensors in RPAs, Biometric Variables, and Vegetation Indices. *Agronomy*, 15(9), 2149. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2073-4395/15/9/2149>
- Alvarado, R. (2023, 16 de noviembre). DR-Cafta alerta al Gobierno dominicano a cuidar producción nacional. *elDinero*. <https://eldinero.com.do/255236/dr-cafta-alerta-al-gobierno-dominicano-a-cuidar-produccion-nacional/>
- Alvarado, R. (2024, 8 de agosto). La autosuficiencia alimentaria en República Dominicana: ¿Es real o es mito? *elDinero*. <https://eldinero.com.do/290007/la-autosuficiencia-alimentaria-en-republica-dominicana-es-real-o-es-mito/>
- Amaral, L.R., Zerbato, C., Freitas, R., Barbosa Júnior, M., & Simões, I.O. (2020). UAV applications in Agriculture 4.0. *Revista Ciência Agronômica*, 51(Agriculture 4.0 Special Issue), e20207748. Disponible en: <https://periodicos.ufc.br/revistacienciaagronomica/article/view/84923>

- Anaya, Ó.C., & Rincón, S.S. (2025). Integración de VANT y SIG en la enseñanza de la mecanización agrícola: impacto en la percepción y aprendizaje estudiantil. Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería. Disponible en: <https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/4289>
- Andrews, E. (2023). Soil fertility interpretation: General soil fertility test interpretation guide. University of California Cooperative Extension. Disponible en: <https://ucanr.edu/sites/default/files/2023-11/390669.pdf>
- Andrion, R. (2023, 13 de diciembre). Artificial intelligence applied to drone imagery helps improve agricultural productivity. Agência FAPESP. Disponible en: https://agencia.fapesp.br/artificial-intelligence-applied-to-drone-imagery-helps-improve-agricultural-productivity/50441?utm_source=
- APHA. (2017). Métodos estándar para el análisis de agua y aguas residuales (23.^a ed.). Disponible en: <https://www.standardmethods.org>
- Aranda Bastida, B. (2021). Efectos del uso de drones en la agricultura mexicana: el caso del Valle del Mezquital. Disponible en: <https://zaloamati.azc.uam.mx/items/64048a83-84d8-49cd-9726-74d01be3d82c>
- Arredondo Valdez, J. (2022). Adquisición y procesamiento de imágenes RGB e hiperespectrales, para la fenotipificación de la sequía en *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León). Disponible en: <https://eprints.uanl.mx/24173/1/1080328656.pdf>
- Asociación Internacional de Fertilizantes. (2012). Fertirrigación: Una herramienta para una fertilización eficiente . Disponible en: https://www.fertilizer.org/wp-content/uploads/2023/01/2012_ifa_fertirrigación_español.pdf
- Awais, M., Javed, M., & Khan, M. (2025). IoT and Big Data in smart agriculture: Transforming farming practices. *Journal of Smart Farming*, 15(2), 100-115. <https://doi.org/10.1016/jsf.2025.004>
- Ayers, R.S., & Westcot, D.W. (1985). Water quality for agriculture (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29, Rev. 1). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/037837748890100X>
- Bai, Z., Li, H., Yang, X., Zhou, B., Shi, X., Wang, B., Li, D., Shen, J., Chen, Q., Qin, W., Oenema, O., & Zhang, F. (2013). The critical soil P levels for crop yield, soil fertility and environmental safety in different soil types. *Plant and Soil*, 372(1–2), 27–37. Disponible en: <https://www.jstor.org/stable/42953045>
- Bajwa, S., Ghosh, S., & Patel, R. (2019). Machine learning in agriculture: Applications and challenges. *Journal of Agricultural Technology*, 17(4), 134-148. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/jag.2019.001>
- Barrera, V., Lizarazo, C. & González, J. (2022). Eficiencia en el uso del nitrógeno y desafíos en la agricultura latinoamericana. *Ciclo de nutrientes en agroecosistemas*. 123 (2). 245–259. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10705-022-10380-3>
- Bautista, A.S., Tarrazó-Serrano, D., Uris, A., Blesa, M., Estruch-Guitart, V., Castiñeira-Ibáñez, S., & Rubio, C. (2024). Remote Sensing Evaluation Drone Herbicide Application Effectiveness for Controlling *Echinochloa* spp. in Rice Crop in Valencia (Spain). *Sensors*, 24(3), 804. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2077-0472/13/10/1916>

- BBVA. (2024. 14 de julio). ¿Qué es la agricultura de precisión? La gestión digital del campo. Disponible en: <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-la-agricultura-de-precision-la-gestion-digital-del-campo/>
- Bello Patricio, A.B. (2023). Diseño y desarrollo de una metodología de observación con aviones no tripulados de ala fija (RPAS) en medios extremos y su aplicación para el modelado de glaciares antárticos (Doctoral dissertation, ETSI_Informatica). Disponible en: <https://oa.upm.es/id/eprint/72725>
- Beltrán Barreto, G. X. (2023). Antecedentes, uso y aplicación de drones en Colombia como herramienta estratégica de análisis en la agricultura de precisión. Disponible en: <https://repository.udca.edu.co/bitstream/11158/5386/1/BeltranTF.pdf>
- Bendig, J., Bolten, A. & Bareth, G. (2015a). Introducción de un sistema ligero basado en UAV para modelos de superficie de cultivos de alta resolución y monitoreo del NDVI. Teledetección. 7 (10). 11467–11496. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/rs71011467>
- Bendig, J., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., Eichfuss, S. & Bareth, G. (2015b). Estimación de la biomasa de cebada mediante modelos de superficie de cultivo (MSC) derivados de imágenes RGB basadas en UAV. Teledetección. 6 (11):10395–10412. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/rs61110395>
- Bendig, J., Yu, K., Aasen, H., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., Gnyp, M.L. & Bareth, G. (2015c). Combinación de la altura de planta obtenida mediante drones a partir de modelos de superficie de cultivo e índices de vegetación visibles e infrarrojos cercanos para el monitoreo de biomasa en cebada. Revista Internacional de Observación de la Tierra Aplicada y Geoinformación. 39: 79–87. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.02.012>
- Berrueto, P., José, L. A., & Linares, J. F. (2023). Implementación de drones de supervisión con inteligencia artificial. Disponible en: https://bibliotecas.ucasal.edu.ar/opac_css/index.php?lvl=notice_display&id=74338
- Bert, F. (2024). Inteligencia artificial aplicada al agro: ¿Dónde estamos y qué podemos esperar?. Disponible en: <https://repositorio.iica.int/items/3fb5682f-56fc-4f2c-a4b1-89330b808ced>
- Bhatt, R. (2023). Irrigation water – Quality issues, limits, and way forward. Delos: Desarrollo Local Sostenible, 16(45), 1–18. Disponible en: <https://ojs.revistadelos.com/ojs/index.php/delos/article/view/1053>
- Bihari, B., Singh, Y. K., Shambhavi, S., Mandal, J., Kumar, S., & Kumar, R. (2022). Nutrient use efficiency indices of N, P, and K under rice-wheat cropping system in LTFE after 34th crop cycle. Journal of Plant Nutrition, 45(1), 123-140.
- Bongomin, O., Lamo, J., Mugeziaubwa, J., Okello, C., Guina, C. & Collins, O. (2024). Adquisición y procesamiento de imágenes con UAV para fenotipado de alto rendimiento y monitoreo de campo: mejores prácticas y consideraciones. Investigación en fitopatología / Revista de patología vegetal. 7 . 20096. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/ppj2.20096>
- Bouman, B.A.M., Hengsdijk, H., Hardy, B., Bindraban, P. S., Tuong, T. P., & Ladha, J. K. (Eds.). (2002). Water-wise rice production. International Rice Research Institute (IRRI). Disponible en: https://books.irri.org/9712201821_content.pdf
- Bouman, B.A.M., Humphreys, E., Tuong, T. P. y Barker, R. (2007). Arroz y agua. Avances en Agronomía. 92 . 187–237. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(04\)92004-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(04)92004-4)
- Bray, F. (2023). The rice economies: technology and development in Asian societies. Univ of California Press.

- Brea Baldera, G. (2024, 20 de diciembre). El arroz: un pilar de la alimentación dominicana. Acento. <https://acento.com.do/opinion/el-arroz-un-pilar-de-la-alimentacion-dominicana-9436685.html>
- Buitrago Bolívar, E., Rico Franco, J. A., & Rojas Amador, S. (2024). Monitoreo de cultivos y suelos en agricultura de precisión con UAV e inteligencia artificial: una revisión. *Tecnura*, 28(82), 75–103. Disponible en: <https://doi.org/10.14483/22487638.22360>
- Campbell, J.B., & Wynne, R.H. (2011). *Introduction to remote sensing* (5.^a ed.). Guilford Press
- 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. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2072-4292/7/4/4026>
- Carracelas, G., Ballester, C., Marchesi, C., Roel, A. & Hornbuckle, J. (2024). Evaluación de índices de teledetección basados en drones para el monitoreo del estado de nitrógeno en plantas de arroz bajo diferentes técnicas de riego. *Agronomía*. 14 (12). 2976. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/agronomy14122976>
- Carrillo Montoya, K. (2024). Predicción de altura de la planta y rendimiento del sorgo mediante datos multiespectrales y fotogrametría de RPAS. Disponible en: <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/server/api/core/bitstreams/666838e4-c8b7-4050-8249-12a2df7a3483/content>
- Castañeda-Ibáñez, C. R., Flores-Magdaleno, H., Martínez-Menes, M., Esparza-Govea, S., Fernández-Reynoso, D., Prado-Hernández, V., Pascual-Ramírez, F. (2018). Estimación de la evapotranspiración mediante un balance de energía utilizando sensores remotos. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 5(15), 537-545. <https://doi.org/10.19136/era.a5n15.1647>
- Castello, F. A., Alborno, E., & Martínez, C. E. (2018). Desarrollo de un sistema integral de adquisición de imágenes por dron, procesamiento y análisis para agricultura de precisión. In *X Congreso de AgroInformática (CAI)-JAIIO 47 (CABA, 2018)*. Disponible en:
- Castro Aceves, J. M. (2025). Actualización cartográfica urbana mediante segmentación semántica de ortofotografías UAV con técnicas de Deep Learning. <https://riunet.upv.es/bitstreams/61fb376e-ea0b-4eeb-9afd-2d850c161e58/download>
- Castro, G. M., Cruz, K. V. A., Hernández, J. D. J. V., & Fitch, J. D. H. R. (2025). Procesamiento de imágenes con UAV en la agricultura de precisión: panorama actual, tendencias tecnológicas, una revisión sistemática. *Revista de Investigación en Tecnologías de la Información: RITI*, 13(32), 4-16. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10506543>
- Castro, G.M., Cruz, K.V.A., Hernández, J.D.J.V., & Fitch, J. D.H.R. (2025). Procesamiento de imágenes con UAV en la agricultura de precisión: panorama actual, tendencias tecnológicas, una revisión sistemática. *Revista de Investigación en Tecnologías de la Información: RITI*, 13(32), 4-16. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10506543>
- Catenazzo, C. J. (2022). Evaluación de impacto del enriquecimiento de nitrógeno en suelos regados con aguas residuales tratadas de la planta de tratamiento de la ciudad de Ingeniero Jacobacci (Río Negro) (Doctoral dissertation). Disponible en: <http://rid.unrn.edu.ar:8080/handle/20.500.12049/13362>

- Chang, T.T. & Harahap, Z. (1996). *Oryza L.* En: Grubben, G. J. H. & Partohardjono, S. (Editores): Recursos vegetales del sudeste asiático No 10: Cereales . Fundación PROSEA. Bogor. Indonesia. Registro de base de datos: prota4u. org/prosea. Disponible en: <https://prosea.prota4u.org/view.aspx?id=59>
- Chavarría Salas, A. (2022). Determinación de la tolerancia a salinidad de líneas mutantes de arroz (*Oryza sativa L.*) bajo condiciones de invernadero en Barva, Heredia. Disponible en: <https://repositorio.una.ac.cr/items/be97b65a-f1b3-499e-84ac-da1e22fc8f14>
- Chen Teixeira, E.P. (2018). Determinación del efecto del déficit hídrico y temperatura ambiental sobre el cultivo de arroz, en los Llanos de Coclé (Doctoral dissertation, Universidad de Panamá. Vicerrectoría de Investigación y Postgrado). Disponible en: https://up-rid.up.ac.pa/1566/3/elsie_chen.pdf
- Chen, B., Su, Q., Li, Y., Chen, R., Yang, W., & Huang, C. (2025). Field rice growth monitoring and fertilization management based on UAV spectral and deep image feature fusion. *Agronomy*, 15(4), 886. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/agronomy15040886>
- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). (2005). Morfología de la planta de arroz: Guía de estudio . CIAT. Disponible en: <https://alliancebioiversityciat.org/publications-data/morfologia-de-la-planta-de-arroz-guia-de-estudio-0>
- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). (2021). A guide to standardized methods of analysis for soil, water, plant, and fertilizer. CIAT–Soil Health Initiative. Disponible en: https://www.moa.gov.et/wp-content/uploads/2025/03/202110_A-guide-to-standardized-methods-of-analysis-for-soil-water-plant-and-fertilizer_CIAT-SSHI.pdf
- Coelho-Eugenio, F., Badin, T.L., Fernandes, P., Mallmann, C.L., Schons, C., Schuh, M., & Pereira da Silva, S.D. (2021). Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS) and machine learning: A review in the context of forest science. *International Journal of Remote Sensing*, 42(21), 8207-8235. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431161.2021.1975845>
- Coelho-Eugenio, F., Grohs, M., Venancio, L.P., Schuh, M., Bottega, E.L., Ruoso, R., & Fernandes, P. (2020). Estimation of soybean yield from machine learning techniques and multispectral RPAS imagery. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 20, 100397. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352938520301646>
- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79–97. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
- Contreras Reyes, E. (22 de septiembre 2025). Importancia económica de la producción agrícola en República Dominicana 2024. Ojalá. Disponible en: <https://ojala.do/economia-y-empleos/importancia-economica-de-la-produccion-agricola-en-rd-2024>
- Cruz Carrillo, E. S. (2020). Cartografía detallada de lahares primarios del volcán Cotopaxi mediante imágenes de espectro visible e infrarrojo cercano obtenidas por una nave aérea no tripulada (DRONE) (Bachelor's thesis, Quito, 2020.). Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20629>
- CTA (Corporación Tecnológica de Andalucía). (2022). Disponible en: El proyecto SAMA aplica IoT, IA e imágenes satelitales para un cultivo de arroz más sostenible: <https://www.corporaciontecnologica.com/noticias/el-proyecto-sama-aplica-iot-ia-e-imagenes-satelitales-para-un-cultivo-de-arroz-mas-sostenible/>

- Daughtry, C.S., Walthall, C. L., Kim, M.S., De Colstoun, E. B., & McMurtrey Iii, J.E. (2000). Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote sensing of Environment*, 74(2), 229-239.
- Daza. M.C., Díaz. J., Aguirre. E. & Urrutia. N. (2015). Efecto de abonos de liberación lenta en la lixiviación de nitratos y nutrición nitrogenada en estevia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. 9 (1). <https://doi.org/10.17584/rcch.2015v9i1.3750>
- De Datta. S.K. (1981). Principios y prácticas de la producción de arroz. John Wiley & Sons.
- De la Cruz, I. (2023, 26 de diciembre). RD cerraría 2023 sin avances en negociaciones del arroz en DR-Cafta. *Diario Libre*. <https://www.diariolibre.com/economia/agro/2023/12/26/rd-cerraria-2023-sin-avances-en-negociaciones-del-arroz-en-dr-cafta/2558926>
- Degiovanni. V.M. Berrío Orozco. L.E. & Charry Mercado. R.E (2010). Origen. taxonomía. anatomía y morfología de la planta de arroz (*Oryza sativa* L.). En Producción eco-eficiente del arroz en América Latina (págs. 35–59). Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Disponible en: https://ciat-library.ciat.cgiar.org/Articulos_Ciat/2010_Degiovanni-Produccion_eco-eficiente_del_arroz.pdf
- Delegido, J., Verrelst, J., Meza, C.M., & Rivera, J.P. (2011). Evaluation of Sentinel-2 red-edge bands for crop chlorophyll content estimation. *Remote Sensing of Environment*, 115(10), 2345–2355. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.020>
- Delgado, E. (2025, 24 de abril). El arroz dominicano expresado en datos, antes de llegar al plato. *El Dinero*. Disponible en: <https://eldinero.com.do/321255/el-arroz-dominicano-expresado-en-datos-antes-de-llegar-al-plato/>
- Di Leo, N. (2015). Drones: nueva dimensión de la teledetección agroambiental y nuevo paradigma para la agricultura de precisión. Disponible en: <https://rephip.unr.edu.ar/bitstream/handle/2133/13373/2AM41.pdf?sequence>
- Dias, R.L.S., da Silva, D.D., Fernandes-Filho, E.I., do Amaral, C.H., dos Santos, E.P., Marques, J.F., & Veloso, G.V. (2021). Machine learning models applied to TSS estimation in a reservoir using multispectral sensor onboard to RPA. *Ecological Informatics*, 65, 101414. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1574954121002053>
- DJI. (2023a) . Mavic 3 Multispectral — especificaciones y capacidades . Disponible en: <https://enterprise.dji.com/mavic-3-m>
- DJI. (2023b). DJI Terra. Disponible en: <https://www.dji.com/>
- Dobermann. A. y Fairhurst. T. (2000). Arroz: Guía práctica para el manejo de nutrientes (2.^a edición). Instituto Internacional de Investigación del Arroz (IRRI). Filipinas. Disponible en: https://www.fertilizer.org/wp-content/uploads/2023/01/2009_crossroads_buresh.pdf
- DroneDeploy. (s/f). DroneDeploy: Unified reality capture. Disponible en: <https://www.dronedeploy.com/>
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., ... Meygret, A. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- Du, Y., & Noguchi, N. (2017). Application of RGB imagery for crop monitoring using normalized green–red difference index (NGRDI). *Remote Sensing*, 9(4), 310. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/rs9040310>

- Duarte, A., Borralho, N., Cabral, P., & Caetano, M. (2022). Recent advances in forest insect pests and diseases monitoring using UAV-based data: A systematic review. *Forests*, 13(6), 911. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1999-4907/13/6/911>
- Durán, C. (2022). Panorámica de la producción de arroz en la República Dominicana “presentación oral: Cristino Durán, director Bioarroz, Ministerio de Agricultura. En Taller: Socialización de resultados de investigaciones medioambientales en el sector arrocero dominicano.
- Durán Gómez, M. R. (2018). Caracterización de índice de estrés hídrico del cultivo de arroz mediante el uso de sensores térmicos y de humedad del suelo en La Molina, Lima-Perú. Disponible en: <https://repositorio.lamolina.edu.pe/items/bd086325-207a-42b6-b3e3-b9ffc47a4d8f>
- Edmundo, R.R.A. (2024). Índice de área foliar y conteo de árboles de cítricos mediante imágenes a color natural (RGB) captadas con dron. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Axel-Reyes-Rodriguez/publication/383086581_Indice_de_area_foliar_y_conteo_de_arboles_de_citricos_mediante_imagenes_a_color_natural_RGB_captadas_con_dron/links/66bb9a1d299c327096c7286e/Indice-de-area-foliar-y-conteo-de-arboles-de-citricos-mediante-imagenes-a-color-natural-RGB-captadas-con-dron.pdf
- El Nuevo Diario. (2023. 31 de octubre). Día mundial del arroz encuentra RD con autosuficiencia en el mercado. Disponible en: <https://agricultura.gob.do/noticia/dia-mundial-del-arroz-encuentra-rd-con-autosuficiencia-en-el-mercado/>
- EOS Data Analytics. (2022, 22 de junio). Satellite monitoring technologies for agricultural consultants [PDF]. Disponible en: <https://eos.com/wp-content/docs/agriculture-consulting/EOSDA-solutions-for-Agriculture-Consultants.pdf>
- EOS Data Analytics. (2024a). EOSDA Crop Monitoring: Overview. Disponible en: <https://eos.com/user-guide/crop-monitoring/overview/>
- EOS Data Analytics. (2024b). Fields management: User guide on EOSDA Crop Monitoring. Disponible en: <https://eos.com/user-guide/crop-monitoring/fields/>
- EOS Data Analytics. (2024c). Vegetation indices in EOSDA Crop Monitoring (NDVI, NDRE, MSAVI, NDMI). Disponible en: <https://g4g.brcc.bg/eosda-crop-monitoring/>
- EOS Data Analytics. (2024d). MSAVI: Modified Soil Adjusted Vegetation Index. Disponible en: <https://eos.com/make-an-analysis/msavi/>
- EOS. (2025. 7 de julio). NDVI: Cómo funciona el índice y uso en la agricultura. Blog de EOSDA. Disponible en: <https://eos.com/es/blog/indice-de-vegetacion-de-diferencia-normalizada-ondvi/>
- EOSDA. (2022. 13 de mayo). Deficiencia de nitrógeno en las plantas: Cómo repararlo. Disponible en: <https://eos.com/es/blog/deficiencia-de-nitrogeno-en-las-plantas/>
- Espín Sánchez, L. A. (2024). Levantamiento topográfico con fotogrametría aérea del predio Palmar de la Universidad Técnica de Babahoyo (Bachelor's thesis, BABAHOYO: UTB, 2024).
- Espuña, L.A. (2023). Uso y aplicación de sensores RGB y multiespectral embarcados en dron para la monitorización del cultivo de café. *Geofocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (31), 5-38.
- Esri. (s/f). ArcGIS Drone2Map. Disponible en: <https://www.esri.com>

- Estefan, G., Sommer, R., & Ryan, J. (2013). *Methods of soil, plant, and water analysis: A manual for the West Asia and North Africa region* (3rd ed.). International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA). Disponible en: <https://kh.aquaenergyexpo.com/wp-content/uploads/2022/11/Methods-Of-Soil-Plant-And-Water-Analysis-A-Manual-For-The-West-Asia-And-North-Africa-Region.pdf>
- Eugênio, F.C., dos Santos, A. R., Faria, G.M., Neves, A. K., & Peluzio, J.B.E. (2020). Soybean yield estimation using UAV-based multispectral imagery and machine learning models. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 20, 100397. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100397>
- European Space Agency. (2021, 8 de octubre). Copernicus Sentinel-2 Collection 1 MSI Level-2A (L2A). Sentinel Online. Disponible en: <https://sentinels.copernicus.eu/sentinel-data-access/sentinel-products/sentinel-2-data-products/collection-1-level-2a>
- Fan, L., Wu, B., Dai, S., Zhou, X., Dong, T., & You, N. (2024). Rice yield estimation using machine learning and multi-source remote sensing data in hilly and mountainous regions. *Agriculture*, 14(9), 1615. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2077-0472/14/9/1615>
- Fantinel, R. A., Pereira, R. S., Eugenio, F. C., Benedetti, A. C. P., Marchesan, J., Weiler, E. B., & Santos, F. D. D. (2025). The Use Remotely Piloted Aircraft in Counting Agricultural and Forestry Plants: a Systematic Review. *Anuário do Instituto de Geociências*, 48, e64062. Disponible en: <https://www.scielo.br/j/aigeo/a/gbbghrpn4DHpC8ywJBsD8zQ/>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación).. (2017). *Agua para una alimentación y una agricultura sostenibles*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- FAO. (2021). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2021*. Lograr que los sistemas agroalimentarios sean más resilientes a las crisis y las tensiones. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Disponible en: <https://doi.org/10.4060/cb4476es>
- FAO. (2022). 28ª Conferencia Regional para América Latina y el Caribe: El arroz es vida para las principales poblaciones del mundo. y está profundamente integrado en el patrimonio cultural de muchas sociedades. Organización para la Alimentación y la Agricultura. Disponible en: <https://www.fao.org/4/J1225s/J1225s00.htm>
- FAO. (2023a). *Una Sola Salud: Enfoque de la FAO para la salud de los ecosistemas y las personas*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org>
- FAO. (2023b). *Monitor del mercado del arroz*. FAO. Disponible en: <https://www.fao.org/economic/est/publications/rice-publications/rice-market-monitor/en/>
- FAO. (2025). *Innovaciones tecnológicas para mejorar la sostenibilidad agrícola: Inteligencia artificial en los sistemas agroalimentarios*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <https://www.fao.org>
- FAOStat. (2025). *Cultivos y productos de ganadería: Arroz*. Estadísticas de producción de arroz. FAO. Consultado el 28 de septiembre de 2025. Disponible en: <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- Fedearroz. (2025. 30 de septiembre). *Requerimientos nutricionales en el cultivo de arroz*. Federación Nacional de Arroceros de Colombia. Disponible en: <https://www.fedearroz.com.co/es/servicios-al-arrocero/eventos-tecnicos-fedearroz-fna/requerimientos-nutricionales-en-el-cultivos-del-arroz/>

- Fernández Chiclano, R. (2024). Utilización de sistemas RPAS en labores de protección de seguridad ciudadana en la Guardia Civil. <https://repositorio.ucam.edu/handle/10952/9015>
- Fonseca Salazar, S., Verano Zelada, C., & Mariluz Silva, J. P. (2012, octubre 26). Huella hídrica del cultivo del arroz. Huella hídrica del arroz en el Perú. Oficina del Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/546>
- Fontal, B., Suárez, T., Reyes, M., Bellandi, F., Contreras, R., & Romero, I. (2005). El espectro electromagnético y sus aplicaciones. *Escuela de la Ingeniería*, 1, 24. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Bernardo-Fontal/publication/228871821_El_Espectro_Electromagnetico_y_sus_Aplicaciones/links/59946c10aca272ec9087f8bb/El-Espectro-Electromagnetico-y-sus-Aplicaciones.pdf
- Fuller, D.Q. Weisskopf, A., & Castillo, C. (2021). Vías de diversificación del arroz en Asia. *Rice*, 14 (83), 1–22. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s12284-021-00518-4>
- Gade, S.A. Ghosh, S. & Saha, S. (2024). Avances en la teledetección con drones para la predicción del rendimiento agrícola y la reducción de costes. *Agricultural Systems*, 206, 103-112. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.agry.2023.103112>
- Gao, J., Gao, L., Chen, W., Huang, J., Qing, D., Pan, Y., ... & Deng, G. (2024). Genetic effects of grain quality enhancement in indica hybrid rice: insights for molecular design breeding. *Rice*, 17(1), 39.
- García-Cervigón, D., & José, J. (2015). Estudio de índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de éstos a la agricultura de precisión. Disponible en: <https://docta.ucm.es/entities/publication/c644c228-1da0-4a07-8667-50f59d7f1d1e>
- Gitelson, A. A. (2004). Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. *Journal of plant physiology*, 161(2), 165-173.
- Gitelson, A. A., Stark, R., Grits, U., Rundquist, D., Kaufman, Y., & Derry, D. (2002). Vegetation and soil lines in visible spectral space: A concept and technique for remote estimation of vegetation fraction. *International Journal of Remote Sensing*, 23(13), 2537-2562.
- Gitelson, A. A., Viña, A., Arkebauer, T. J., Rundquist, D. C., Keydan, G., & Leavitt, B. (2003). Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies. *Geophysical research letters*, 30(5).
- Gitelson, A.A., Kaufman, Y.J., & Merzlyak, M.N. (1996). Uso de un canal verde en la teledetección de la vegetación global mediante EOS-MODIS. *Teledetección del Medio Ambiente*, 58 (3), 289–298. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00072-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7)
- Godoy Navarro, J.M. (2023). Drones agrícolas, clave para la adopción y transición hacia la agricultura 4.0 en México. Repositorio INFOTEC. Disponible en: https://infotec.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1027/637/1/INFOTEC_MDETIC_JMGN_23022024.pdf
- Gómez-Candón, D., Fraile, R., & Fernández, C. (2014). High-resolution orthoimage generation using UAV photogrammetry: methodology and applications. *International Journal of Remote Sensing*, 35(12), 4560–4575. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.911434>
- González, A. F. C. (2022). Estrategias de búsqueda y análisis de nuevas tecnologías con aplicaciones a la Agricultura de Precisión-modalidad Investigación. Disponible en: <https://repository.udca.edu.co/bitstreams/7425ee3c-32da-4e02-ada3-ce108f786ac5/download>
- González-Valoys, A.C., Chong, T., Arrocha, J., Lloyd, J., Olmos, J., Vergara, F., ... & García-Navarro, F.J. (2025). Geochemical Characterization of Soil and Water in an Agricultural Area

- for the Sustainable Use of Natural Resources. *Agriculture*, 15(7), 702. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2077-0472/15/7/702>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Gudelj, O., Arce, J., & Gudel, V. (2018). Metodología de Muestreo y Determinación de Agua en el Suelo. Información para Extensión en Línea, (29), 18. Disponible en: https://www.academia.edu/download/68928212/metodologia_de_muestreo_y_determinacion_de_agua_del_suelo.pdf
- Guebsi, R., Mami, S. & Chokmani, K. (2024). Drones en la agricultura de precisión: Una revisión exhaustiva de sus aplicaciones, tecnologías y desafíos. *Drones*. 8 (11). 686. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/drones8110686>
- Güílamo Ramírez, D., Acosta Cabrera, M.L. & Reyes Puello, C. (2018). Estudio de factibilidad de la utilización de drones en las plantaciones de berenjena (Monografía licenciatura). Universidad APEC. Disponible en: https://bibliotecaunapec.blob.core.windows.net/tesis/CM_CI_NEG_08_2018_ET180145.pdf
- Guzmán-Álvarez, J.A., González-Zuñiga, M., Fernandez, J.A.S., & Calvo-Alvarado, J.C. (2022). Uso de sensores remotos en la agricultura: aplicaciones en el cultivo del banano. *Agronomía Mesoamericana*, 33(3). Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/437/43771129020/43771129020.pdf>
- Haboudane, D., Miller, J. R., Tremblay, N., Pattey, E., & Vigneault, P. (2004). Estimation of leaf area index using ground spectral measurements over agriculture crops: Prediction capability assessment of optical indices. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. ISPRS Arch*, 35, 108-113. Disponible en: <https://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm7/papers/21.pdf>
- Hernández Salazar, R. S. (2017). Metodología para discriminación de malezas basada en la respuesta espectral de la vegetación (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia). Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59816>
- Heros Aguilar, E.C., Lozano-Isla, F., & Casas Diaz, A.V. (2023). Tecnologías para la producción de arroz: recomendaciones para el Perú basadas en investigaciones científicas. *South Sustainability*, 4(1), Article e069. <https://doi.org/10.21142/SS-0401-2023-e069>
- Herrera, F.A.S., Páez, J.A.P., Cabiativa, E.C.D., & Hernández, J.V.P. (2023). La agricultura de precisión y herramientas TIC de apoyo. Fondo Editorial–Ediciones Universidad Cooperativa de Colombia.
- Honkavaara, E., Khoramshahi, E., & Näsi, R. (2021a). Calibración radiométrica de cámaras de fotograma hiperespectral basadas en drones. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 178. 163–178. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.06.013>
- Honkavaara, E., Saari, H., Kaivosoja, J. y Hakala, T. (2021b). Procesamiento de datos multiespectrales de UAV para agricultura de precisión: técnicas y aplicaciones. *Teledetección*. 13 (10). 1954. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/rs13101954>
- Horneck, D.A., Sullivan, D. M., Owen, J.S., & Hart, J.M. (2011). Soil test interpretation guide (EM 1478). Oregon State University Extension Service. Disponible en: https://www.canr.msu.edu/foodsystems/uploads/files/soil_test_interpretation.pdf

- Houborg, R., & McCabe, M. F. (2018). A hybrid training approach for leaf area index estimation via Cubist and random forests machine-learning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 135, 173–188. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.10.004>
- Huang, M., Zou, Y., Jiang, P., Xia, B., Ao, H. y Jiang, L. (2023). Las altas temperaturas alteran la fenología, el desarrollo de las semillas y el rendimiento en tres variedades de arroz. *Plants*, 12 (4), 907. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/plantas12040907>
- Hunt, E. R., Jr., Doraiswamy, P. C., McMurtrey, J. E., Daughtry, C. S. T., Perry, E. M., & Akhmedov, B. (2013). A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the canopy scale. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 103–112. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.07.020>
- Ibrahim, K., Zhou, W., Xie, J., & Zhang, Y. (2021). Determining the optimum level of soil Olsen phosphorus for sustainable maize production. *Sustainability*, 13(11), 5983. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/11/5983>
- IDIAF (Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales). (2021). Informe anual de resultados de investigación 2020-2021. Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales. Disponible en: <https://idiaf.gob.do>
- IFA (International Fertilizer Industry Association). (2012, noviembre). Fertilizing crops to improve human health: A scientific review (Feeding the Earth, issue brief) [PDF]. Disponible en: https://www.fertilizer.org/wp-content/uploads/2023/01/2012_fertilizers_human_health_brief.pdf
- IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura). (s/f). El Cultivo del Arroz en República Dominicana: un Cultivo Básico en la Alimentación del País. Disponible en: <http://www.iica.int/es/prensa/noticias/el-cultivo-del-arroz-enrep%C3%BAblica-dominicana>
- IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura). (2017). El cultivo del arroz en la República Dominicana. IICA. Disponible en: <https://repositorio.iica.int/handle/11324/6760>
- IICA. (2023). El cultivo del arroz en República Dominicana. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Disponible en: <https://iica.int/es/node/17938>
- Index Database. (s/f). Red-Edge Chlorophyll Index (CIred-edge / Chl-Red-Edge). Disponible en: <https://www.indexdatabase.de>
- IRRI (2013). Gestión del agua en el arroz de regadío: Cómo afrontar la escasez de agua. Los Baños. Filipinas.
- ISO. (2017). ISO 18400-102: Calidad del suelo — Muestreo — Parte 102: Selección y aplicación de técnicas de muestreo. Organización Internacional de Normalización. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/63331.html>
- Ivars Soriano, M. (2024). Integración de IA y RPAS en la vigilancia portuaria: desarrollo, aplicaciones y perspectivas en el contexto español. <https://titula.universidadeuropea.es/handle/20.500.12880/8374>
- Jarma Orozco, A., Cardona Ayala, C., & Araméndiz Tatis, H. (2012). Efecto del cambio climático sobre la fisiología de las plantas cultivadas: una revisión. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 15(1), 63-76. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-42262012000100008&script=sci_arttext

- Jarma, A., Degiovanni Beltramo, V.M., & Montoya, R.A. (2010). Índices fisiotécnicos, fases de crecimiento y etapas de desarrollo de la planta de arroz. Disponible en: <https://cgspace.cgiar.org/items/009e3acb-2126-4920-beb1-df5be7324e75>
- Jiménez, M. B. (2021). Importancia de los factores climáticos en el cultivo de arroz: Importance of climate factors in rice crop. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 6(1), 28-34. Disponible en: <https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/rcyta/article/view/1080>
- Kesowa. (2025). Datos RGB y NIR de cámaras de drones: Aplicaciones y casos de uso. Disponible en: [https://www.kesowa.in/Aplicaciones y casos de uso de datos de cámaras de drones RGB y NIR](https://www.kesowa.in/Aplicaciones%20y%20casos%20de%20uso%20de%20datos%20de%20c%C3%A1maras%20de%20drones%20RGB%20y%20NIR)
- Kior, A., Yudina, L., Zolin, Y., Sukhov, V., & Sukhova, E. (2024). RGB imaging as a tool for remote sensing of characteristics of terrestrial plants: A review. *Plants*, 13(9), 1262. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2223-7747/13/9/1262>
- Kumar, V., Meena, R., & Yadav, R. (2020). Machine learning applications in precision agriculture. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 90(2), 124-135. <https://doi.org/10.1016/ija.2020.021>
- Lassaletta, L., Aguilera, E. y Bouwman, A. (2023). Desafíos globales del nitrógeno y oportunidades para la sostenibilidad agrícola. *Nature Food*. 4 (1). 30–42. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s43016-022-00696-0>
- Lata-Tenesaca, L., Villaseñor-Ortiz, D., & Chabla-Carrillo, J. (2017). Fraccionamiento de la absorción de nutrientes en cuatro etapas fenológicas del cultivo de Fréjol. *Revista Universidad y Sociedad*, 9(1), 20-27. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2218-36202017000100003&script=sci_arttext&tlng=en
- Laza, M.R.C., et al. (2004). Effect of panicle size on grain yield of IRRI-released rice cultivars. *Plant Production Science*, 7(3), 271–276. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1626/pps.7.271>
- León, R. H. C., & Ortega, I. A. A. (2023). Sistemas aéreos remotamente tripulados en aplicaciones militares. Una revisión. *Ciencia y poder aéreo*, 18(2), 75-93. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9225611>
- León, R.H.C., & Ortega, I.A.A. (2023). Sistemas aéreos remotamente tripulados en aplicaciones militares. Una revisión. *Ciencia y poder aéreo*, 18(2), 75-93.
- Li, Y., Wu, J., Shen, J., Liu, S., Wang, C., Chen, D., ... & Zhang, J. (2016). Soil microbial C: N ratio is a robust indicator of soil productivity for paddy fields. *Scientific reports*, 6(1), 35266. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/srep35266>
- Li, X., Zhang, C. y Chen, J. (2021). Agricultura de precisión basada en UAV: Aplicaciones y perspectivas futuras. *Precision Agriculture*. 22. 1364–1392. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09834-5>
- Li, Z., Hu, M., Liu, T., Tang, Y., Liu, R., Peng, Z., Wang, C., Peng, Z., Wang, Z., Chen, Z., Yang, Z., Sun, Y. & Ma, J. (2025). Efectos de las estrategias de manejo de nitrógeno y potasio sobre la eficiencia de absorción de nutrientes, resistencia al encamado y rendimiento en arroz trasplantado mecanizado. *Fronteras en la ciencia vegetal*. 16. 1658245. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1658245>
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). Remote sensing and image interpretation (7th ed.). Wiley. <https://onlinelibrary.wiley.com>
- Adamo, T. (2025). Optimización del riego y la fertirrigación en la agricultura inteligente. *ScienceDirect*. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772375525001182>

- Lima, G. S. A., Ferreira, M. E., Passos, J. S., Costa, J. V. S., Sales, J. C., & Santos, M. L. (2023). Estimativa de produtividade de arroz a partir de imagens multiespectrais registradas com aeronaves remotamente pilotadas. XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto; XX SBSR: Florianópolis, SC, Brasil. Disponible en: <http://marte2.sid.inpe.br/attachment.cgi/sid.inpe.br/marte2/2023/04.25.16.08/doc/156001.pdf>
- Liu, Y., Lan, X., Hou, H., Ji, J., Liu, X., & Lv, Z. (2024). Multifaceted ability of organic fertilizers to improve crop productivity and abiotic stress tolerance: Review and perspectives. *Agronomy*, 14(6), 1141. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2073-4395/14/6/1141>
- López-Rodríguez, G.L., Gómez-Moya C., Avilés Quezada, E., Sánchez Martínez, L., Vargas Victoriano, C., Mota Galán, D.M., Valdez Caraballo, Y.E., Aquino Tapia, K.A., Jiménez Durán T.J. & Coelho Eugenio, F. (2024). Modelos predictivos de nutrientes en arroz inundado a partir de imágenes multiespectrales de alta resolución y algoritmo de aprendizaje automático. 3er Congreso Latinoamericano de Agricultura de Precisión (CLAP2024). Santo Domingo, República Dominicana.
- Lozano, L.A.C., & Ospina, Y.C.T. (2019). Fundamentos técnicos para la nutrición del cultivo de arroz. Disponible en: https://fedearroz.com.co/documents/674/cartilla_fundamentos_nutricion.pdf
- Lussem, U. (2018). Evaluation of RGB-based vegetation indices from UAV imagery to estimate forage yield in grassland (Tesis doctoral). University of Bonn. Disponible en: <https://d-nb.info/1161192468/34>
- Macancela Poveda, J. C., & Lucero Otorongo, P. M. (2016). Procesamiento de imágenes mediante el uso de un vehículo aéreo no tripulado (UAV) para el monitoreo y detección de incendios forestales (Bachelor's thesis). <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/12352>
- Marschner. P. (2012). Nutrición mineral de plantas superiores de Marschner (3.^a ed.). Prensa académica. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00001-0>
- Martínez, A. (2024). El uso de drones para la fumigación en invernaderos: beneficios y aspectos clave. Fumigadora Pro. Disponible en: <https://fumigadorapro.com/el-uso-de-drones-para-la-fumigacion-en-invernaderos-beneficios-y-aspectos-clave/>
- Martos, V., Ahmad, A., Cartujo, P., & Ordoñez, J. (2021). Ensuring agricultural sustainability through remote sensing in the era of agriculture 5.0. *Applied Sciences*, 11(13), 5911. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/13/5911>
- Matese, A., Capraro, F., Primicerio, J., Gualato, G., Di Gennaro, S. F., & Agati, G. (2013). Mapping of vine vigor by UAV and anthocyanin content by a non-destructive fluorescence technique. In *Precision agriculture'13* (pp. 201-208). Wageningen Academic. Disponible en: <https://brill.com/edcollchap/book/9789086867783/BP000025.xml>
- Matyukira, C., & Mhangara, P. (2024). Utilising RGB drone imagery and vegetation indices for accurate above-ground biomass estimation: a case study of the cradle nature reserve, Gauteng Province, South Africa. *Geocarto International*, 39(1), 2390512. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10106049.2024.2390512>
- Mazza, M. (2024). Tecnología UAV (Aeronaves No Tripuladas) para aplicarse en la defensa, vigilancia y control de los espacios marítimos. Disponible en: <https://cefadigital.edu.ar/handle/1847939/2693>

- Medina Litardo, R.C., García Bendejú, S.J., Carrillo Zenteno, M.D., & Parismoreno Rivas, L.L. (2023). Sistema de producción del cultivo de arroz en zonas con alta salinidad en suelos y agua. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 24(2). Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0122-87062023000200016&script=sci_arttext
- Medranda, E.V., & Solórzano, T.Z. (2025). Impacto de drones en la agricultura: aplicaciones y beneficios en la producción de cultivos.: Impact of Drones on Agriculture: Applications and Benefits in Crop production. *Revista Científica Multidisciplinar G-nerando*, 6(1), ág-3960. Disponible en: <https://revista.gnerando.org/revista/index.php/RCMG/article/view/583>
- Mejía de Tafur, S., & Menjívar, J.C. (2010). Nutrición mineral del arroz. En V. Degiovanni B., C. P. Martínez R., & F. Motta O. (Eds.), *Producción eco-eficiente del arroz en América Latina* (Tomo I, pp. 306–335). Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Disponible en: <https://cgspace.cgiar.org/bitstreams/76738797-7f79-4a79-a4aa-54dd1d4fb323/download>
- MEPyD (Ministerio de Economía, Planificación y Desarrollo). (2012). Estrategia Nacional de Desarrollo 2030 (END 2030) [Informe en PDF]. Gobierno de la República Dominicana. https://mepyd.gob.do/wp-content/uploads/drive/UAAES/END/Informes%20Anuales%20END/end_2030.pdf
- Micasense. (2023). Especificaciones del sensor multispectral RedEdge-MX . MicaSense. Disponible en: <https://www.micasense.com/rededge-mx>
- Ministerio de Agricultura de la República Dominicana. (2018, 6 de junio). El arroz: un cultivo de impacto social. <https://agricultura.gob.do/noticia/el-arroz-un-cultivo-de-impacto-social/>
- Ministerio de Agricultura de la República Dominicana. (2019, 10 de abril). AgriculturaRD presenta cuatro nuevas variedades de arroz de alto rendimiento. <https://agricultura.gob.do/noticia/agriculturard-presenta-cuatro-nuevas-variedades-de-arroz-de-alto-rendimiento/>
- Ministerio de Agricultura de la República Dominicana. (2023. 31 de octubre). Día Mundial del Arroz encuentra a RD con autosuficiencia en el mercado. Ministerio de Agricultura de la República Dominicana. Disponible en: <https://agricultura.gob.do/noticia/dia-mundial-del-arroz-encuentra-rd-con-autosuficiencia-en-el-mercado/>
- Ministerio de Agricultura de la República Dominicana. (2025a). Lineamientos para la modernización productiva y tecnologías innovadoras en el sector agrícola. <https://agricultura.gob.do>
- Ministerio de Agricultura de la República Dominicana. (2025c). República Dominicana lanza nueva tecnología arroceras para enfrentar retos DR Cafta. Disponible en: https://agricultura.gob.do/noticia/república-dominicana-lanza-nueva-tecnología-arrocera-para-enfrentar-retos-dr-cafta/?utm_source
- Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica. (2015). Fertilización del cultivo del arroz (*Oryza sativa*). Disponible en: <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/a50-6907-III-p123.pdf>
- Ministerio de Agricultura. (2025b). Estadísticas agropecuarias 2023: Superficie, producción y rendimiento de arroz por región. Ministerio de Agricultura de la República Dominicana. Disponible en: <https://agricultura.gob.do/estadisticas>
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (s. f.). Información ambiental de la provincia La Vega. Gobierno de la República Dominicana. <https://ambiente.gob.do/informacion-ambiental/informacion-provincial/la-vega/>

- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2021). Políticas y prácticas sostenibles para la conservación de los recursos naturales. <https://ambiente.gob.do>
- Mohidem, N. A., Jaafar, S., & Che'Ya, N. N. (2024). Integration of unmanned aerial vehicle and multispectral sensor for paddy growth monitoring application: A review. *Pertanika Journal of Science and Technology*, 32(2), 521–550. Disponible en: <https://doi.org/10.47836/pjst.32.2.04>
- Monteiro. A. (2021). Precision agriculture for crop and livestock farming. PMC. Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8388655/>
- Montiel León, V. D. (2024). Análisis de curvas de absorción de nutrientes en cultivo de maíz y arroz (Bachelor's thesis, BABAHOYO: UTB, 2024). Disponible en: <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/16037>
- Mora Parrales, A. F. (2025). Implementación de drones con cámaras multiespectrales para optimizar el monitoreo y manejo de cultivos (Bachelor's thesis, BABAHOYO: UTB, 2025). Disponible en: <https://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/18044>
- Mora Parrales, A. F. (2025). Implementación de drones con cámaras multiespectrales para optimizar el monitoreo y manejo de cultivos (Bachelor's thesis, BABAHOYO: UTB, 2025). Disponible en: <https://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/18044>
- Moreira. L. (2023). Intensificación en los sistemas arroceros y su impacto sobre el potencial funcional de la comunidad microbiana edáfica [Tesis de maestría. Universidad de la República]. Colibrí. Disponible en: <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/35347>
- Moroni, B. (2021). Análisis multicriterio para determinar la fertilización del cultivo de arroz aplicando SIG (Doctoral dissertation, UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR).
- Mosquera. J., Berrío. V., & Alzate. D. (2015). Uso de drones para el analisis de imágenes multiespectrales en agricultura de precisión. *@limentech. Ciencia Y Tecnología Alimentaria*. 13(1). 28–40. Disponible en: <https://doi.org/10.24054/limentech.v13i1.1600>
- Mota Galán. D.M., Aquino Tapia. K.A., & Valdez Caraballo. Y.E. (2024). Utilización de imágenes multiespectrales para mapeo nutricional del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.). variedad LRC Juma 69-20 en distintas etapas fenológicas (Trabajo de grado. Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña. Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Escuela de Agronomía). La Vega. República Dominicana.
- Motohka, T., Ishitsuka, N., Hamamoto, T., & Nagaoka, S. (2010). Applicability of green–red vegetation index for remote sensing of vegetation phenology. *Remote Sensing*, 2(1), 236–242. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/rs2010236>
- Mulla, D.J. (2013a). The definition and measurement of precision agriculture. *Precision Agriculture*, 14(5), 1-5. <https://doi.org/10.1007/s11119-013-9301-2>
- Mulla. D.J. (2013b). Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*. 114(4). 358–371. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009>
- Muramatsu, K. (2019, October). Use of chlorophyll index-green and the red-edge chlorophyll index to derive an algorithm for estimating gross primary production capacity. In *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XXI* (Vol. 11149, pp. 54-61). SPIE. Disponible en: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/11149/1114906/Use-of-chlorophyll-index-green-and-the-red-edge-chlorophyll/10.1117/12.2532468.short>

- Naciones Unidas. (2015). Transformar nuestro mundo: La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (A/RES/70/1). <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- Nova Morales, A. F. (2025). Planeación de trayectoria para UAVs en la agricultura de precisión. Disponible en <https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/b1d6e94c-9401-4be4-8302-3d67597479e2>
- Observatorio Gastronómico Dominicano. (2024). El arroz dominicano expresado en datos. antes de llegar al plato. Disponible en: <https://www.observatoriogastronomicord.org/el-arroz-dominicano-expresado-en-datos-antes-de-llegar-al-plato/>
- Olmos, S. (2006). Morfología, fenología, ecofisiología y mejoramiento genético del arroz. Apunte de Cultivos II. Facultad de Ciencias Agrarias. UNNE. Corrientes. Argentina.
- Onofre, J.M.C., García, I.H.T., Romero, M.Á.M., Sinchiguano, B.E.O., & García, K.D.R. H. (2025). Tecnologías Disruptivas en la Agricultura 4.0: IA, IoT, Drones, Economía Circular y Modelación. Know Press.
- OpenDroneMap Authors. (2020). OpenDroneMap. Disponible en: <https://www.opendronemap.org>
- OPS (Organización Panamericana de la Salud). (2025). Una sola salud. Disponible en: <https://www.paho.org/es/una-sola-salud>
- Oregon State University Extension Service. (2024). Managing salt-affected soils for crop production (PNW 601). Disponible en: <https://extension.oregonstate.edu/sites/extd8/files/catalog/auto/PNW601.pdf>
- Oregon State University. (2019). Methods and equipment – Soil Health Lab. College of Agricultural Sciences. Disponible en: <https://cropandsoil.oregonstate.edu/shl/methods-and-equipment>
- Orquera Guevara, E. I. (2020). Análisis de empleo de sistemas aéreos no tripulados (UAVs) como apoyo a los sistemas de monitoreo actuales para REDD+ en Ecuador (Master's thesis, Buenos Aires: FLACSO. Sede Académica Argentina.). <https://repositorio.flacsoandes.edu.ec/handle/10469/17205>
- Palacios-López, L.A. (2024). Nuevas tendencias e innovaciones para una agricultura sostenible. *Horizon Nexus Journal*, 2(2), 15-28. Disponible en: <https://horizonnexusjournal.editorialdoso.com/index.php/home/article/view/36>
- Palomino Suárez, D.S. (2020). Supervisión autónoma de cultivos agrícolas por medio de vehículos aéreos no tripulados (UAV) usando técnicas de procesamiento de imágenes y fotogrametría (Doctoral dissertation, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito). Disponible en: <https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstreams/38f04a2c-938a-4d42-b39b-d5cd214128eb/download>
- Pardo Ibarra, J.A. (2016). Implementación de un sistema de comunicación inalámbrico entre un UAV/RPA con su estación terrena para la transmisión de imágenes térmicas en tiempo real y su utilización en el control de incendios. https://www.lareferencia.info/vufind/Record/EC_f98b02b4e67b6f64eda8acfe238df68a
- Peralta Vera, A. E. (2024). Análisis de la productividad del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) sujeta a un manejo orgánico (Bachelor's thesis, BABAHOYO: UTB, 2024). Disponible en: <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/16047>

- Pérez Ramírez, G.L. (2025). Mecanismos de difusión de drones agrícolas en México. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Chapingo. Analiza adopción vía importadores y prestadores de servicios, identificando exclusión de pequeños productores.
- Pérez Reyes, K.C. (2025). Gestión de energía en sistema IOT: análisis de tecnologías de red y en un uav atado a tierra: tecnologías de red aplicadas en la gestión de captación de energía. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/26683>
- Pérez, J. (2023). Desarrollo de una metodología para la gestión de cultivos: Arroz (Tesis de grado). Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Bogotá. Disponible en: <https://www.unad.edu.co/tesis/12345>
- Piera, P., Palacios, J., Morales, S., Domingo, C., Roselló, I., Vicent, A., ... & Cano, A. M. (2024). DETECTORYZA: Agricultura de precisión en el cultivo del arroz para la detección precoz de síntomas de *Pyricularia oryzae* y determinación de la dosis óptima de fertilizantes. Phytoma España: La revista profesional de sanidad vegetal, (359), 47-53.
- Pincioli, M., Ponzio, N. R., & Salsamendi, M. (2015). El arroz. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.
- Pino, E. (2019). Los drones una herramienta para una agricultura eficiente: un futuro de alta tecnología. Idesia (Arica), 37(1), 75-84. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-34292019000100075&script=sci_arttext&tlng=en
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Kerr, Y. H., & Sorooshian, S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index. Remote Sensing of Environment. 48(2). 119–126. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90134-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90134-1)
- Qiu, Z., Ma, F., Li, Z., Xu, X., Ge, H., & Du, C. (2021). Estimation of nitrogen nutrition index in rice from UAV RGB images coupled with machine learning algorithms. Computers and Electronics in Agriculture, 189, 106421. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169921004385>
- Qiu, Z., Ma, F., Zhou, J., & Du, C. (2025). Improving rice nitrogen nutrition index estimation using UAV images combined with meteorological and fertilization variables. Agronomy. 15(8). 1946. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/agronomy15081946>
- Quesada Moreno, C. C. (2022). Evaluación correctiva de carbonatos, óxidos y silicatos de ca y/o Mg en un suelo oxisol. Disponible en: <https://repository.udca.edu.co/bitstream/11158/4513/1/TRABAJO.pdf>
- Quintero, C.E. (2009). Factores limitantes para el crecimiento y productividad del arroz en Entre Ríos, Argentina. Disponible en: <https://ruc.udc.es/items/ac5e0832-2771-47b7-9784-8428e78199da>
- Quispe-Tito, D.J., Ramos-Fernández, L., Pino-Vargas, E., Quille-Mamani, J. & Torres-Rua, A. (2024). RPAS para precisión de la evapotranspiración en arrozales y reducir el consumo de agua. Agronomía Mesoamericana, 35(1), 56529. Disponible en: <https://www.sidalc.net/search/Record/oai:portal.ucr.ac.cr:article56529/Description>
- Rakotoson, T., Johnson, J. M., Senthilkumar, K., Ibrahim, A., & Saito, K. (2025). On-farm nitrogen, phosphorus, and potassium partial balances in three major rice production systems in sub-Saharan Africa. Field Crops Research, 322, 109714. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429024004672>

- Rathore, N., Gupta, R. K., Singh, Y., & Singh, B. (2017). Determining critical value of soil Olsen P for dry direct seeded rice (*Oryza sativa*) in a greenhouse study in northwestern India. *Journal of Environmental Biology*, 38(4), 623–629. Disponible en: <https://doi.org/10.22438/jeb/38/4/MS-143>
- RealityCapture. (s/f). RealityCapture. Disponible en: <https://www.capturingreality.com/>
- Red Agrícola. (2024, diciembre 30). Análisis de suelos, selección de enmiendas y plan de fertilización. Disponible en: <https://redagricola.com/analisis-de-suelos-seleccion-de-enmiendas-y-plan-de-fertilizacion/>
- Redagricola. (2024). Febrero 2024 [Papel digital]. Disponible en: <https://redagricola.com/papel/febrero-2024/>
- Remondino, F., Sörgel, U., Höhle, J., Nex, F., & Wenzel, K. (2017). Multi-sensor photogrammetry for precision agriculture and environmental monitoring. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-2/W4, 85–92. Disponible en: <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W4-85-2017>
- Rendon, N., & Guerrero, C. (2024). Evaluación de rendimiento y calidad nutricional de arroz biofortificado bajo un sistema de rotación con frijol. Disponible en: <https://cgspace.cgiar.org/items/fea1e129-4d16-4524-a42b-7c53e4895751>
- Restrepo Ángel, J.S. (2024). Estrategia didáctica digital para el entrenamiento de competencias no técnicas en los pilotos de ARP de la FAC. Disponible en: <https://repository.usergioarboleda.edu.co/handle/11232/2222>
- Reyes, J., Godoy, A., & Realpe, M. (2019). Uso de software de código abierto para fusión de imágenes agrícolas multispectrales adquiridas con drones. In *LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology* (pp. 1-8). Disponible en: https://refbase.cidis.espol.edu.ec/files/josereyes/2019/102_JoseReyes_etal2019.pdf
- Rivera Ordoñez, D.E., & Nieto Velandia, S. (2024). Diseño de un sistema de riego automático para monitorear el estado de un cultivo. Disponible en: <https://repositorio.utp.edu.co/entities/publication/4981d34d-0634-4289-8d17-69a07b1fbb73>
- Rivera, L.B., Montoya Bonilla, B., & Vidal, F.O. (2021). Procesamiento de imágenes multispectrales captadas con drones para evaluar el índice de vegetación de diferencia normalizada en plantaciones de café variedad Castillo. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 22(1), 1-16. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7942575>
- Rodríguez Fernández, J. (2023). Modelización predictiva del rendimiento en maíz mediante índices de vegetación. Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/66339>
- Roman-Gonzalez, A., & Vargas-Cuentas, N. I. (2013). Análisis de imágenes hiperespectrales. *Revista Ingeniería & Desarrollo*, 9(35), 14-17. Disponible en: <https://hal.science/hal-00935014/>
- Rondeaux, G., Steven, M., & Baret, F. (1996). Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote sensing of environment*, 55(2), 95-107.
- Rosario, A.R., Concepción, E.P., Ogando, E.C., Paulino, G.T.A., Rodríguez, I.M.J., Torres, L.E., ... & Martínez, L.S. (2024). Utilización de teledetección remota con drones para la evaluación de bioestimulantes de origen marino en el cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.). *Revista Científica El Capacho*, 13(13), 87-121. Disponible en: <https://metxi.net/desarrollo/ojsuteco/index.php/capacho/article/view/113>

- Rosello Petit, F. (2025). Estudio de Viabilidad y Fiabilidad de Trackers para la Identificación Remota en U-Space: Análisis de Caso con Dronetag. Disponible en: <https://riunet.upv.es/items/7ab70ac0-213b-48a1-90be-dc7c30b7cf93>
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Volume 1: Technical Presentations, NASA SP-351, 309–317
- S&P. (2024). Temperature sensors for HVAC applications. Disponible en: <https://www.sp.com/temperature-sensors-hvac>
- Sáa Lara, C. A. (2023). El uso de drones y los derechos a la intimidad, privacidad y protección de datos personales (Bachelor's thesis). Disponible en: <https://dspace.uniandes.edu.ec/handle/123456789/16143>
- Salazar, J.A.Q. (2025). Transformación digital y liderazgo adaptativo en el sector eléctrico: una vía realista para mejorar la eficiencia y mitigar el alza de tarifas. *Palermo Business Review*, (31), 61-93. Disponible en: <https://www.palermo.edu/negocios/cbrs/pdf/pbr31/pbr-31-03.pdf>
- Salgado-García, S., Palma-López, D. J., Lagunes-Espinoza, J., & Castelán-Estrada, M. (2006). Manual para el muestreo de suelos plantas y aguas e interpretación de análisis. Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco-ISPROTAB. H. Cárdenas, Tabasco, México, 90. Disponible en: https://www.academia.edu/download/99906407/primer_libro_de_analisis_de_suelo_agua_y_planta.pdf
- Santos, E. (2024, 19 de diciembre). ¿Qué es el DR-CAFTA y por qué arroceros dominicanos lo denunciaron como amenaza? *El Caribe*. <https://www.elcaribe.com.do/panorama/dr-cafta-impacto-y-amenazas-produccion-de-arroz-en-rd/>
- Schumann, A. (2008). Placement and variable rate fertilizer application. South Florida Water Management District. Disponible en: https://www.sfwmd.gov/sites/default/files/documents/2008_bmp_workshop_using_precision_agriculture_technology.pdf
- Sewiko, R., & Sagala, H.A.M.U. (2022). The use of drone and visible atmospherically resistant index (VARI) algorithm implementation in mangrove ecosystem health's monitoring. *Asian Journal of Aquatic Sciences*, 5(3), 322-329. Disponible en: <https://jipas.ejournal.unri.ac.id/index.php/ajoas/article/view/2675>
- Silva, L. A. (2023). A platform for smart infrastructure monitoring with unmanned aerial vehicles and deep learning techniques. Disponible en: <https://gredos.usal.es/handle/10366/157594>
- SimActive. (s/f). Correlator3D. Disponible en: <https://www.simactive.com/>
- Space4Water. (s/f). VARI – Visible Atmospherically Resistant Index. Disponible en: <https://www.space4water.org/vari>
- Stavrakoudis, D., Katsantonis, D., Kadoglidou, K., Kalaitzidis, A., & Gitas, I. Z. (2019). Estimating rice agronomic traits using drone-collected multispectral imagery. *Remote Sensing*, 11(5), 545. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/rs11050545>
- Taylor, J.A. (2023). Crop vigor. In *Encyclopedia of Soils in the Environment* (2nd ed.). Elsevier. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/crop-vigor>

- Terán Varela, O.E., Espinosa Ayala, E., Hernández García, P.A., Álvarez González, A.L., Sánchez Gil, A., & Ruiz González, E.I. (2018). Drones para el monitoreo geodemográfico en el sector agrícola en el municipio de Ayapango. Estado de México. Revista Global de Negocios. 6(6). 61-71. Disponible en: <https://ssrn.com/abstract=3243489>
- Torres Pita, K. A. (2025). Diseño de detalle y simulación aero-estructural de un vehículo aéreo no tripulado (UAV) tipo (VTOL) de larga autonomía con sistema de propulsión eléctrico: diseño y simulación aero-estructural de un vehículo aéreo no tripulado de despegue y aterrizaje vertical (VTOL) para una carga de 3, 5 kg. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/26751>
- Tripathi, R., Kumar, A., Guru, P., Debnath, M., Mohapatra, S.D., Mohanty, S., Khanam, R., Shahid, M., & Nayak, A.K. (2021). Precision farming technologies for water and nutrient management in rice: Challenges and opportunities. ORYZA-An International Journal of Rice. 58(1 SPL). 126-142.
- Tucker, C.J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment. 8(2). 127–150. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
- Tuong, T.P., & Bouman, B.A.M. (2003). Rice production in water-scarce environments. In J. W. Kijne, R. Barker, & D. Molden (Eds.). Water productivity in agriculture: Limits and opportunities for improvement (pp. 53–67). CABI.
- UMILES Group. (2022, 19 de octubre). RPAS, UAS y UAV: ¿Qué son y en qué se diferencian? UMILES Group. Disponible en: <https://umilesgroup.com/rpas-uas-uav-diferencias/>
- United Nations. (2015). Objetivos de Desarrollo Sostenible: Agenda 2030. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment>
- USDA (U.S. Salinity Laboratory Staff). (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils (Agriculture Handbook 60). U.S. Department of Agriculture. Disponible en: https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/20361500/hb60_pdf/Hb60ch5.pdf
- USGS (United States Geological Survey (a)). (s/f). Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI2). Disponible en: <https://www.usgs.gov/>
- Uva, M., & Campanella, O. (2009). AP-SIG: Un SIG con funciones específicas para Agricultura de Precisión. In XI Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación. Disponible en: <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/19801>
- Vaghefi, S. A., Ibrahim, M. F., Mohd Zaman, M. H., Mustafa, M. M., Mustaza, S. M., & Zulkifley, M. A. (2025). Optimized Weed Image Classification via Parallel Convolutional Neural Networks Integrating an Excess Green Index Channel. International journal of electrical and computer engineering systems, 16(3), 205-216. Disponible en: <https://hrcak.srce.hr/clanak/476166>
- Valero Mora, J.O. (2019). Dinámica de absorción de los macroelementos en el cultivo de arroz (*Oryza sativa* L) bajo condiciones de riego (Bachelor's thesis, Babahoyo: UTB, 2019). Disponible en: <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/6148>
- Varela, S.A. (2010). Aspectos básicos de la fisiología en respuesta al estrés y el clima como condicionante del mismo en las plantas. INTA EEA Bariloche. Comun. Técnica, 78, 1-23. Disponible en: <http://listas.exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/Aspectosb%C3%A1sicosfisiolog%C3%A1darespuestaestr%C3%A9s..pdf>

- Velasco Haz, K. D. (2024). Diseño de un vehículo aéreo no tripulado (uav) con sistema de propulsión eléctrico para despegue y aterrizaje vertical (vtol): Evaluación técnica-económica de sistemas de propulsión eléctrica para un uav tipo vtol. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/25387>
- Veneros, J., García, L., Morales, E., Gómez, V., Torres, M., & López-Morales, F. (2020). Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua. *Idesia* (Arica), 38(4), 99-107. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-34292020000400099&script=sci_arttext
- Vera Vera, J. E. (2019). Efecto de fertilizantes nitrogenados de liberación controlada en la producción de arroz (*Oryza sativa* L.) en la zona de Ricaurte, provincia de Los Ríos (Bachelor's thesis, Babahoyo: UTB, 2019). Disponible en: <https://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/6104>
- Vera Esmeraldas, A., Pizarro-Oteiza, S., Labbé, M., Rojo, F., & Salazar, F. (2025). UAV-Based Spectral and Thermal Indices in Precision Viticulture: A Review of NDVI, NDRE, SAVI, GNDVI, and CWSI. *Agronomy*, 15(11), 2569. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2073-4395/15/11/2569>
- Virués Ortega, D., García-Cabañas Bueno, J. A., Vergara Merino, R., Bernardo Sanz, S., Hernández Correas, A., & Ramos Campo, D. (2019). *Piloto de dron (RPAS)* (3.^a ed.). Ediciones Paraninfo, S.A.
- Wang, L., Zhang, X., Li, Y., Guo, S., & Ge, X. (2025a). Precision estimation of rice nitrogen fertilizer using UAV multispectral imagery and NNI-based nitrogen balance. *Plants*, 14(8), 1195. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2223-7747/14/8/1195>
- Wang, Y., Hou, E., Lu, X., Elnour, M. A. H., Zhang, L., & He, X. (2023a). The agronomic and environmental assessment of soil phosphorus levels for crop production: A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 43, 23. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13593-023-00887-8>
- Wang, Y., Yang, Z., Kootstra, G., & Khan, H. A. (2023b). The impact of variable illumination on vegetation indices and evaluation of illumination correction methods on chlorophyll content estimation using UAV imagery. *Plant Methods*, 19(1), 51. Disponible en: <https://plantmethods.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13007-023-01028-8>
- Wang, J., Zhang, S., & Liu, Y. (2025b). Drone multispectral imaging captures the effects of soil nitrogen variability on canopy characteristics and grain yield in rice. *Agricultural Systems*. 224. 103595. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016816992500448X>
- Watson, A. (1974). The Arab Agricultural Revolution and Its Diffusion. 700–1100. In *The Cambridge Economic History of Europe* (pp. 8–35). Cambridge University Press.
- Weiss, M., Baret, F., Jay, S., & Ren, X. (2020). Copernicus Sentinel-2 for agriculture: Opportunities and challenges. *Remote Sensing*, 12(23), 1–23. <https://doi.org/10.3390/rs12233942>
- WHO (World Health Organization). (2022). One Health: Un enfoque integrado para la salud humana, animal y ambiental. World Health Organization. <https://www.who.int>
- Wu, T., Chen, C., Chen, C., & Peng, S. (2022). On the changing cool season affecting rice growth and yield in Taiwan. *Agronomy*. 12(11). 2625. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/agronomy12112625>

- Xie, Y., Sha, Z., & Yu, M. (2020). Remote sensing imagery in precision agriculture: A review. *Precision Agriculture*. 21(1). 1–23. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09621-1>
- Xin, L., Liu, J., & Wang, X. (2022). IoT applications in agriculture: The role of sensors and networks. *Journal of Smart Agriculture*, 11(3), 135-145. Disponible en: <https://doi.org/10.5678/jsa.2022.030>
- Xu, S., Xu, X., Zhu, Q., Meng, Y., Yang, G., Feng, H., Yang, M., Zhu, Q., Xue, H., & Wang, B. (2023). Monitoring leaf nitrogen content in rice based on information fusion of multi-sensor imagery from UAV. *Precision Agriculture*. 24(6). 2327–2349. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11119-023-10042-8>
- Xu, X. P., He, P., & Zhou, W. (2019). Spatial variation of yield response and fertilizer requirements on regional scale for irrigated rice in China. *Field Crops Research*. 237. 1–10. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.03.001>
- Xue, J., & Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors*, 2017, 1353691. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2017/1353691>
- Yoshida, S. (1981). *Fundamentals of rice crop science*. International Rice Research Institute. Disponible en: https://books.irri.org/0851985651_content.pdf
- Yumnam, C., Marak, A. B., Kumar, M., Khatri, S., Kumar, S., Soni, S., .. & Chaudhary, V. P. (2025). Utilising Drones in Agriculture: A Review on Remote Sensors, Image Processing and Their Application. *Modern Agriculture*, 3(2), e70021.
- Zhang, X., & Kovacs, J. M. (2020). Deep learning in precision agriculture: Applications and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 175, 105617. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105617>
- Zhang, X., Yang, M., Al Mamun, A., & Masud, M. M. (2025). Estimation of rice leaf nitrogen content using UAV multispectral imagery and machine learning. *Remote Sensing*, 17(14), 2499. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2072-4292/17/14/2499>
- Zhang, Y., Li, X., & Yang, H. (2023). Integrated management of nitrogen and irrigation to improve rice yield. *Field Crops Research*, 281, 108443. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108443>
- Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. *Precision Agriculture*. 13(6). 693–712. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9274-5>
- Zhang, C., Walters, D., Kovacs, J., Liu, Y., & Shang, J. (2022). Applications of UAV remote sensing in precision agriculture: A review. *Remote Sensing*. 14(8). 1973. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/rs14081973>

Anexos

Anexo 1. Formulario diagnóstico para la recolección de la información de manejo del predio agrícola.



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DEL CIBAO ORIENTAL (UTECO)

**Diagnóstico sobre el manejo del cultivo de arroz en las fincas de productores del estudio:
“Aplicación de Sistema de Aeronave Pilotada Remotamente (Drone) para el mapeo de
nutrientes en arroz (*Oryza sativa* L.) a escala de fincas”**

FORMULARIO DE DIAGNÓSTICO

I. Información general del productor y la finca

Nombre del productor:			
Ubicación de la finca (Provincia, Municipio, Comunidad):			
Coordenadas (GPS):	Lat.	Long.	Altitud:

II. Preparación del terreno

Método de preparación del suelo: Arado Rastra ☐ Nivelación Otro (s) (especifique):

Número de pasadas de arado:

Prácticas de conservación de suelos aplicadas: Sí ☐ No Especifique (si responde sí):

Uso de herbicidas antes de la siembra: Sí ☐ No ☐ Si responde sí ¿Cuál o cuáles utilizó?: _____ Glifosato _____

III. Siembra/ Cosecha

Fuente de semillas: Certificada Propia ☐ Intercambio ☐ Otro (especifique):

Sistema de siembra utilizado: Siembra directa al voleo ☐ Trasplante manual ☐ Trasplante mecánico ☐ Otro: _____

Superficie sembrada (tareas o ha): _____

Variedad o variedades sembradas: _____

Variedad evaluada: _____

Fecha de siembra: _____

Densidad de siembra (kg/ha o libras/ta): _____

Trasplante: densidad de siembra (plantas/ta): _____

IV. Fertilización y manejo nutricional

¿Análisis de suelo realizado antes de la siembra? Sí ☐ No

Fecha del último análisis de suelos: _____

Tipo de fertilizantes utilizados: Químico Orgánicos ☐ Ambos ☐ Especifique: _____

Número de aplicaciones: _____

Etapas de aplicación: Pre-siembra ☐ Ahijamiento Embuchamiento ☐ Floración ☐

Método de aplicación: Al voleo ☐ Disuelto en agua ☐ Otro (especifique): _____

Fórmula utilizada. dosis promedio aplicada (kg/ha) y fecha de aplicación:

Primera aplicación: _____

Segunda aplicación: _____

Tercera aplicación: _____

Cuarta aplicación: _____

Uso de biofertilizantes o enmiendas (ej. cal agrícola. materia orgánica): Sí ☐ No Especifique: _____

V. Manejo del agua

Fuente de riego: Canal Pozo ☐ Río ☐ Otro (especifique): _____

Sistema de riego: Gravedad Bombeo ☐ Otro (especifique): _____

Frecuencia de riegos: _____

Duración de cada riego (horas): _____

Prácticas de drenaje: Sí No ☐ Describa: _____

VI. Manejo fitosanitario y de malezas

Principales malezas presentes:

Control aplicado: Manual ☐ Mecánico ☐ Químico ☐ Integrado ☐ Otro (especifique): _____

Herbicidas utilizados: Nombre comercial / Dosis/ Tipo de método/ equipo utilizado para la aplicación (si combina más de un método. favor indicar): _____

Tipo de método/ equipo utilizado para la aplicación (si combina más de un método. favor indicar): _____

Plagas insectiles frecuentes:

Control aplicado: Biológico ☐ Químico ☐ Integrado ☐ Otro(especifique):

Insecticidas utilizados: Nombre comercial / Dosis/ Tipo de método/ equipo utilizado para la aplicación (si combina más de un método. favor indicar):

Tipo de método/ equipo utilizado para la aplicación (si combina más de un método. favor indicar):

Enfermedades frecuentes:

Fungicidas utilizados: Nombre comercial / Dosis/ Tipo de método/ equipo utilizado para la aplicación (si combina más de un método. favor indicar):

Tipo de método/ equipo utilizado para la aplicación (si combina más de un método. favor indicar):

VII. Cosecha y poscosecha

Fecha de cosecha: _____

Método de cosecha: Manual ☐ Mecánico ☐

Superficie cosechada (tarefas o ha): _____

Rendimiento obtenido (qq/ha o t/ha): _____

Problemas principales en la cosecha: _____

Destino de la producción: Autoconsumo ☐ Mercado local ☐ Industria ☐ Venta a factoría ☐ Otro (especifique): _____

VIII. Aspectos socioeconómicos

Costo aproximado de producción (RD\$/ha): _____

Principales limitantes en la producción de arroz: Nutrición ☐ Agua ☐ Malezas ☐ Plagas ☐ Enfermedades ☐ Mercado ☐ Otro (especifique): _____

Observaciones adicionales del encuestador: _____

Anexo 2. Entrevista sobre el uso de drones en la agricultura: sector arroz.



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DEL CIBAO ORIENTAL (UTECO)

“Aplicación de Sistema de Aeronave Pilotada Remotamente (Drone) para el mapeo de nutrientes en arroz (*Oryza sativa* L.) a escala de fincas”

ENTREVISTA SOBRE:

PERCEPCIÓN DEL USO DE DRONES EN AGRICULTURA

I. Datos generales

Nombre del productor:

Ubicación de la finca:

Superficie cultivada con arroz (ha/tareas):

II. Experiencia con el uso de drones

¿Desde cuándo utiliza drones en su finca? Menos de 1 año ☐ 1–3 años ☐ Más de 3 años ☐

¿Con qué frecuencia se aplican vuelos de drones en su cultivo de arroz? Cada ciclo ☐ Varias veces por ciclo ☐ Solo cuando hay problemas ☐ Otro: ☐

¿Para qué finalidades ha utilizado los drones en su finca? Monitoreo de nutrientes ☐ Plagas y enfermedades ☐ Estado hídrico ☐ Mapas NDVI ☐ Otro: ☐

III. Percepción y beneficios

En una escala de 1 a 5. ¿cómo calificaría la utilidad de los drones para su cultivo de arroz? 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐

Beneficios observados: Mayor eficiencia en fertilización ☐ Reducción de costos ☐ Mejor planificación de riegos ☐ Control de plagas/malezas ☐ Aumento de rendimientos ☐ Otro: ☐

¿Ha cambiado alguna práctica de manejo del arroz a partir de la información obtenida con drones? Sí ☐ No ☐ ¿Cuál?: ☐

¿Qué tan satisfecho está con la información que los drones generan sobre su cultivo? Muy satisfecho ☐ Satisfecho ☐ Poco satisfecho ☐ Insatisfecho ☐

IV. Limitaciones y desafíos

Dificultades encontradas: Costo de servicios ☐ Interpretación de información ☐ Disponibilidad de operadores ☐ Problemas técnicos ☐ Otro: ☐

¿Considera que necesita mayor capacitación para aprovechar al máximo esta tecnología? Sí ☐ No ☐ Tal vez ☐

¿Qué tipo de apoyo cree necesario para ampliar el uso de drones en su finca?
 Subsidio/financiamiento ☐ Asistencia técnica ☐ Capacitación ☐ Servicios compartidos ☐
 Otro
 (especifique):_____

V. Perspectivas futuras

¿Recomendaría el uso de drones a otros productores de arroz? Sí ☐ No ☐ ¿Por qué?:

¿Qué mejoras le gustaría que tuviera esta tecnología para adaptarse mejor a las necesidades de su finca?

Observaciones del entrevistador:

IX. Percepción sobre el uso de drones en el cultivo.

Percepción sobre el uso de drones en agricultura: Muy útil ☐ Útil ☐ Poco útil ☐ No útil ☐

Observaciones adicionales del encuestador:

Anexo 3. Actividades realizadas durante el periodo de estudio.

Fecha	Actividad	Instrumentos/ Herramientas	Detalle
02/06/2025	Contacto con productores y visita a las fincas potenciales de estudio.		Consulta vía telefónica
10/06/2025	Ubicación fincas y selección de áreas para fines del estudio.		Jima arriba. Rincón y Las Cabuyas
16/06/2025	Configuración de planes de vuelos en fincas seleccionadas.	Dron DJI Mavic 3M (multiespectral)	
	Realización de vuelos de prueba.		
	Recolección de muestras de suelos y agua de riego para determinación de parámetros físico-químicos.	Barreno Edelman. cubeta. pala de jardín. marcadores. bolsas tipo ziploc. botellas de plásticos.	
17/06/2025	Envío de muestras de suelo y agua al laboratorio AGQ Dominicana.		Santiago de los Caballeros
22 y 25 jul 2025	Recepción de resultados de los análisis de agua y suelos.		Vía correo electrónico
13/08/2025	Entrenamiento básico en el uso de drones para captura de imágenes aéreas multiespectrales.	Dron DJI Mavic 3M (multiespectral)	IDIAF Centro Norte. (Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales) y Universidad Católica del Cibao (UCATECI). en La Vega
26/08/2025	Primer vuelo y recolección de muestras foliares para análisis de nutrientes.	Dron DJI Mavic 3M (multiespectral) & placa de reflectancia MicaSense. tijeras. bolsas. marcadores. GPS (teléfono móvil)	Fincas Jima arriba. Rincón y Las Cabuyas
	Envío de muestras foliares al laboratorio AGQ Dominicana. para análisis de macronutrientes (N. P. K. Ca. Mg y S).		Santiago de los Caballeros
18/09/2025	Recepción de resultados de análisis vegetal		Vía correo electrónico
23/09/2025	Segundo vuelo y recolección de muestras foliares para análisis de nutrientes.	Dron DJI Mavic 3M (multiespectral) & placa de reflectancia MicaSense. tijeras. bolsas. marcadores. GPS (teléfono móvil)	Fincas Jima arriba. Rincón y Las Cabuyas
23/09/2025	Envío de muestras foliares al laboratorio AGQ Dominicana. para análisis de macronutrientes (N. P. K. Ca. Mg y S)		Santiago de los Caballeros
16/10/2025	Recepción de resultados de análisis vegetal		Vía correo electrónico
07/10/2025	Tercer vuelo y recolección de muestras foliares para análisis de nutrientes.	Dron DJI Mavic 3M (multiespectral) & placa de reflectancia MicaSense.	Fincas Jima arriba. Rincón y Las Cabuyas

		tijeras. bolsas. marcadores. GPS (teléfono móvil)	
08/10/2025	Envío de muestras foliares al laboratorio AGQ Dominicana. para análisis de macronutrientes (N. P. K. Ca. Mg y S).		Santiago de los Caballeros
23/10/2025	Recepción de resultados de los análisis.		Vía correo electrónico
31/10/2025	Cuarto vuelo y recolección de muestras foliares para análisis de nutrientes.	Dron DJI Mavic 3M (multiespectral) & placa de reflectancia MicaSense. tijeras. bolsas. marcadores. GPS (teléfono móvil)	Fincas Jima arriba y Rincón
	2do. Muestreo de suelos para análisis físico-químicos.	Barreno Edelman. cubeta. pala de jardín. marcadores. bolsas tipo ziploc. botellas de plásticos.	
	Envío de muestras foliares al laboratorio AGQ Dominicana. para análisis de macronutrientes (N. P. K. Ca. Mg y S).		Santiago de los Caballeros
	Envío de muestras de suelos para análisis físico-químicos.		
14/11/2025	Recepción de resultados de los análisis vegetal de fincas Jima Arriba y Rincón		Vía correo electrónico
03/11/2025	Cosecha de sub-unidades de 1 m ²	Marco artesanal de tubos de PVC y segadoras	Fincas Jima arriba y Rincón
	Recepción de material cosechado y separación de espigas de arroz y biomasa.		Centro Norte. IDIAF
07 al 11 nov 2025	Medición de espigas. conteo de ramificaciones. conteo de granos llenos y granos vanos. separación de mil granos. pesaje de mil granos. pesaje total. etc.	Reglas. folder. cinta pegante. formularios de recolección de datos. balanza. marcadores. bolsas de papel. etc.	Centro Norte. IDIAF
11/11/2025	Cuarto vuelo y recolección de muestras foliares para análisis de nutrientes	Dron DJI Mavic 3M (multiespectral) & placa de reflectancia MicaSense. tijeras. bolsas. marcadores. GPS (teléfono móvil)	Finca Las Cabuyas
	2do. Muestreo de suelos para análisis físico-químicos.	Barreno Edelman. cubeta. pala de jardín. marcadores. bolsas tipo ziploc. botellas de plásticos.	
12/11/2025	Envío de muestras foliares al laboratorio AGQ Dominicana. para análisis de macronutrientes (N. P. K. Ca. Mg y S).		Santiago de los Caballeros
	Envío de muestras de suelos para análisis físico-químicos.		
14/11/2025	Cosecha de sub-unidades de 1 m ² .	Marco artesanal de tubos de PVC y segadoras	Finca Las Cabuyas

	Recepción de material cosechado y separación de espigas de arroz y biomasa.		Centro Norte. IDIAF
14 al 21 nov 2025	Medición de espigas. conteo de ramificaciones. conteo de granos llenos y granos vanos. separación de mil granos. pesaje de mil granos. pesaje total. etc.	Reglas. folder. cinta pegante. formularios de recolección de datos. balanza. marcadores. bolsas de papel. etc.	Centro Norte. IDIAF
18 y 22 nov 2025	Recolección de información de fincas para diagnóstico.	Instrumentos de recolección de datos (cuestionario/ entrevista)	Productores de las fincas evaluadas.
01/12/2025	Recepción de resultados del análisis vegetal de finca Las Cabuyas		Vía correo electrónico
02/12/2025	Recepción de resultados de los análisis de suelos 2do. Muestreo todas las fincas		Vía correo electrónico
08 al 10 diciembre 2025	Tabulación y análisis de datos e informaciones recolectadas en campo		

Anexo 4. Combinación de drones con tecnologías de agricultura de precisión

Tecnología / Herramienta	Función principal	Integración con drones	Beneficios
Drones (UAVs)	Captura de imágenes multiespectrales y RGB. generación de mapas de vegetación y estrés	Base para la adquisición de datos aéreos	Alta resolución espacial y temporal. identificación de zonas con variabilidad de cultivo
Sensores de suelo	Medición de humedad. nutrientes y pH	Correlación de datos con mapas obtenidos por drones	Aplicación localizada de fertilizantes y riego. detección temprana de deficiencias
Estaciones meteorológicas	Registro de temperatura. humedad. viento y radiación solar	Integración de datos con mapas de drones para modelos predictivos	Ajuste preciso de riego y manejo de cultivos según condiciones ambientales
Sistemas de información geográfica (SIG)	Análisis espacial y visualización de mapas de cultivo	Procesamiento y superposición de imágenes de drones y sensores	Zonificación de manejo. planificación de fertilización y riego variable
Maquinaria agrícola de precisión	Aplicación de fertilizantes. agroquímicos y riego de manera localizada	Guiada por mapas de prescripción generados a partir de drones	Reducción de insumos. aumento de eficiencia y disminución de impactos ambientales
Sistemas de riego automatizados	Control del agua aplicada según necesidad del cultivo	Integración con mapas de humedad y estrés hídrico generados por drones	Optimización del uso del agua. reducción de pérdidas por evaporación y escorrentía

Fuente: Cuadro elaborado en Chat GPT (2025).

Anexo 5. Clasificación y recomendación de manejo de la salinidad (tabla 1) y sodicidad (tabla 2) en aguas de riego.

Tabla 1. Salinidad

Clasificación	Recomendación
C1: Bajo	Se puede utilizar sin restricción. Sin embargo, en algunos cultivos frutales sensibles se pueden presentar daños.
C2: Medio	Se puede emplear en zonas con buena lixiviación y con plantas que tengan moderada tolerancia.
C3: Alto	Se puede usar en suelos con buena lixiviación, manejo para la salinidad y con cultivos tolerantes.
C4: Muy Alto	No puede ser utilizada para riego bajo condiciones comunes.

Tabla 2. Sodicidad

Clasificación	Recomendación
S1: Bajo	Se puede utilizar para riego.
S2: Medio	Se pueden presentar problemas en suelos arcillosos. No obstante, se puede usar en texturas arenosas.
S3: Alto	Puede causar problemas en suelo, requiere manejo especial (especies tolerantes, buen drenaje y aplicaciones de SO_4^{2-} y Ca^{+2}).
S4: Muy Alto	No se recomienda utilizar en riego agrícola.

Fuente: Halvín et al.. 2014.

Anexo 6. Clasificación de suelos y aguas de riego según la relación de adsorción de sodio (RAS) y la conductividad eléctrica (CE), indicando el peligro de sodificación y salinidad para distintas combinaciones de ambos parámetros.

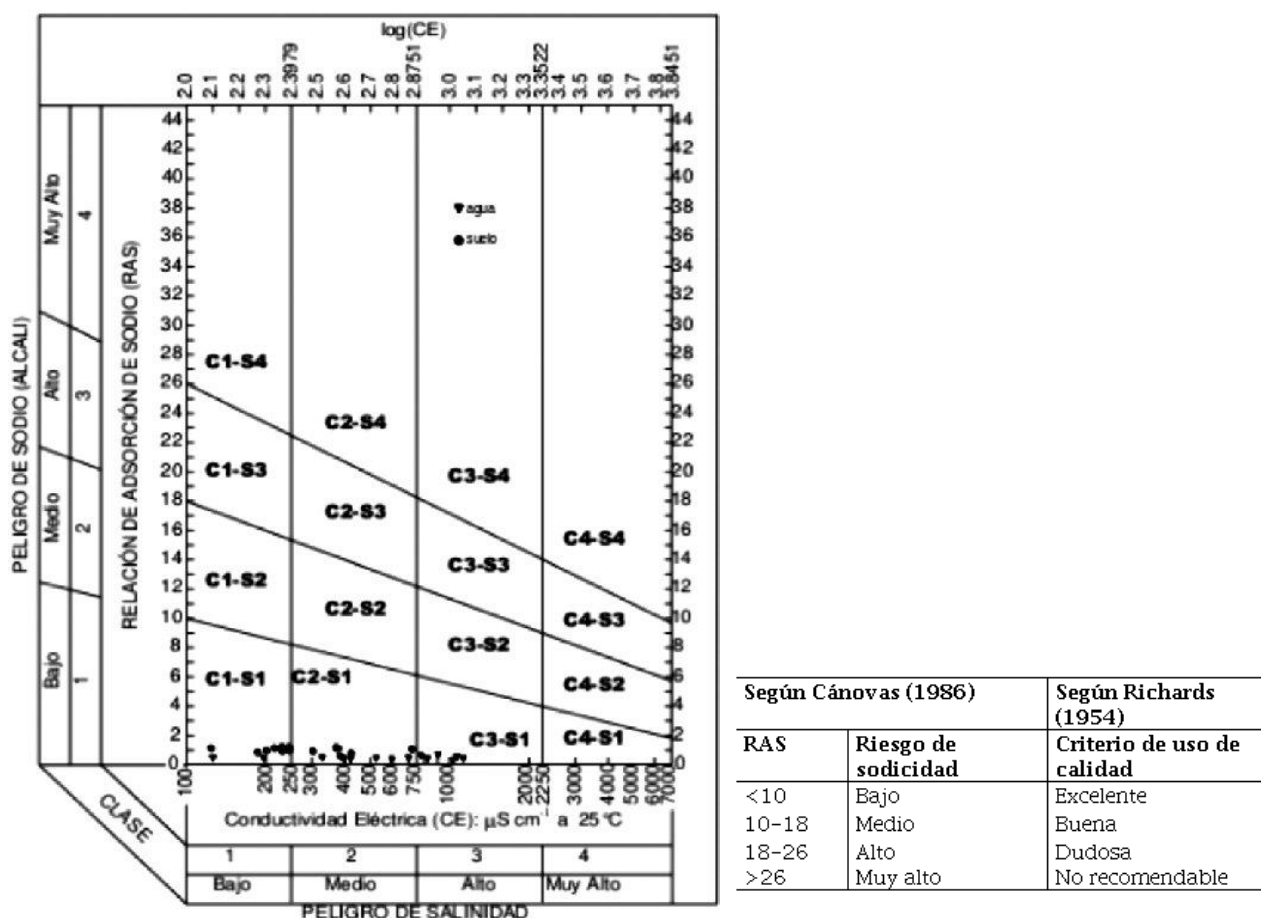


Figura 54. Diagrama de clasificación de suelos y aguas de riego según la relación de adsorción de sodio (RAS) y la conductividad eléctrica (CE).

Fuente: Adaptado de Richards (1954) y Cánovas (1986).

Anexo 7. Análisis estadísticos de los componentes de producción.

Análisis de la varianza

1- No. de panículas/ m² (cm)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
No. Panículas/ m ²	9	0.48	0.30	20.12

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	42634.67	2	21317.33	2.75	0.1418
Finca	42634.67	2	21317.33	2.75	0.1418
Error	46451.33	6	7741.89		
Total	89086.00	8			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=220.43068

Error: 7741.8889 gl: 6

Finca	Medias	n	E.E.
Las Cabuyas	361.33	3	50.80 A
Jima Arriba	422.67	3	50.80 A
Rincón	528.00	3	50.80 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

2- Longitud panícula (cm)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Longitud panícula (cm)	1350	1.2E-03	0.00	26.78

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	51.87	2	25.94	0.82	0.4424
Localidad	51.87	2	25.94	0.82	0.4424
Error	42811.76	1347	31.78		
Total	42863.63	1349			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.88218

Error: 31.7830 gl: 1347

Localidad	Medias	n	E.E.
Las Cabuyas	20.79	450	0.27 A
Rincón	21.10	450	0.27 A
Jima Arriba	21.26	450	0.27 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

3- No. ramificaciones

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
No. ramificaciones	1350	0.21	0.21	19.36

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1204.10	2	602.05	180.38	<0.0001
Localidad	1204.10	2	602.05	180.38	<0.0001
Error	4495.92	1347	3.34		
Total	5700.02	1349			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.28588

Error: 3.3377 gl: 1347

Localidad	Medias	n	E.E.	
Rincón	8.28	450	0.09	A
Jima Arriba	9.44	450	0.09	B
Las Cabuyas	10.59	450	0.09	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)**4- Total de granos**

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Total de granos	1350	0.23	0.23	31.32

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	260820.67	2	130410.33	206.69	<0.0001
Localidad	260820.67	2	130410.33	206.69	<0.0001
Error	849885.26	1347	630.95		
Total	1110705.93	1349			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=3.93057

Error: 630.9467 gl: 1347

Localidad	Medias	n	E.E.	
Rincón	65.61	450	1.18	A
Jima Arriba	76.07	450	1.18	B
Las Cabuyas	98.90	450	1.18	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

5- Granos llenos

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Granos llenos	1350	0.18	0.18	36.27

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	181991.73	2	90995.87	149.62	<0.0001
Localidad	181991.73	2	90995.87	149.62	<0.0001
Error	819233.14	1347	608.19		
Total	1001224.87	1349			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=3.85904

Error: 608.1909 gl: 1347

Localidad	Medias	n	E.E.	
Rincón	58.07	450	1.16	A
Jima Arriba	61.62	450	1.16	A
Las Cabuyas	84.28	450	1.16	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

6- Granos vanos

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Granos vanos	1350	0.07	0.07	95.81

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	14705.76	2	7352.88	53.80	<0.0001
Localidad	14705.76	2	7352.88	53.80	<0.0001
Error	184110.03	1347	136.68		
Total	198815.79	1349			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=1.82942

Error: 136.6815 gl: 1347

Localidad	Medias	n	E.E.	
Rincón	7.54	450	0.55	A
Jima Arriba	14.46	450	0.55	B
Las Cabuyas	14.62	450	0.55	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

7- Peso de 1000 granos (g)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Peso de 1000 granos (g)	9	0.48	0.31	4.07

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	6.22	2	3.11	2.80	0.1384
Finca	6.22	2	3.11	2.80	0.1384
Error	6.67	6	1.11		
Total	12.89	8			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=2.64075

Error: 1.1111 gl: 6

Finca	Medias	n	E.E.	
Jima Arriba	25.00	3	0.61	A
Las Cabuyas	25.67	3	0.61	A
Rincón	27.00	3	0.61	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

8- Pureza física

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Pureza física	9	0.23	0.00	3.34

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1.9E-03	2	9.3E-04	0.88	0.4607
Localidad	1.9E-03	2	9.3E-04	0.88	0.4607
Error	0.01	6	1.1E-03		
Total	0.01	8			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.08139

Error: 0.0011 gl: 6

Localidad	Medias	n	E.E.	
Jima Arriba	0.95	3	0.02	A
Las Cabuyas	0.98	3	0.02	A
Rincón	0.99	3	0.02	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

9- Porcentaje de Germinación

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
% Germinación	9	0.89	0.85	16.34

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	6187.37	2	3093.69	24.51	0.0013
Localidad	6187.37	2	3093.69	24.51	0.0013
Error	757.38	6	126.23		
Total	6944.75	8			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=28.14686

Error: 126.2301 gl: 6

Localidad	Medias	n	E.E.	
Las Cabuyas	32.53	3	6.49	A
Jima Arriba	80.07	3	6.49	B
Rincón	93.70	3	6.49	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

10- Peso total:Rendimiento (g/m2)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Peso total (g/m2)	9	0,19	0,00	15,88

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Localidad	15560,22	2	7780,11	0,70	0,5321
Error	66487,33	6	11081,22		
Total	82047,56	8			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=263,71960

Error: 11081,2222 gl: 6

Localidad	Medias	n	E.E.
Jima Arriba	619,00	3	60,78 A
Las Cabuyas	650,67	3	60,78 A
Rincón	718,67	3	60,78 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)**11- Peso total:Rendimiento (kg/ha)**

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Peso total (kg/ha)	9	0,19	0,00	15,88

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Localidad	1556022,22	2	778011,11	0,70	0,5321
Error	6648733,33	6	1108122,22		
Total	8204755,56	8			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=2637,19597

Error: 1108122,2222 gl: 6

Localidad	Medias	n	E.E.
Jima Arriba	6190,00	3	607,76 A
Las Cabuyas	6506,67	3	607,76 A
Rincón	7186,67	3	607,76 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)**12- Peso total:Rendimiento (t/ha)**

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Peso total (t/ha)	9	0,19	0,00	15,88

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Localidad	1,56	2	0,78	0,70	0,5321
Error	6,65	6	1,11		
Total	8,20	8			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=2,63720

Error: 1,1081 gl: 6

Localidad	Medias	n	E.E.
Jima Arriba	6,19	3	0,61 A
Las Cabuyas	6,51	3	0,61 A
Rincón	7,19	3	0,61 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

13-Rendimiento de grano ajustado

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Rendimiento ajustado (t/ha..	9	0,19	0,00	15,91

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Localidad	1,39	2	0,69	0,70	0,5329
Error	5,94	6	0,99		
Total	7,32	8			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=2,49185

Error: 0,9893 gl: 6

Localidad	Medias	n	E.E.	
Jima Arriba	5,84	3	0,57	A
Las Cabuyas	6,14	3	0,57	A
Rincón	6,78	3	0,57	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)**14-Pureza física**

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Pureza física	9	0,23	0,00	3,34

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Localidad	1,9E-03	2	9,3E-04	0,88	0,4607
Error	0,01	6	1,1E-03		
Total	0,01	8			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,08139

Error: 0,0011 gl: 6

Localidad	Medias	n	E.E.	
Jima Arriba	0,95	3	0,02	A
Las Cabuyas	0,98	3	0,02	A
Rincón	0,99	3	0,02	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)**15- % Germinación**

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
% Germinación	9	0,89	0,85	16,34

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Localidad	6187,37	2	3093,69	24,51	0,0013
Error	757,38	6	126,23		
Total	6944,75	8			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=28,14686

Error: 126,2301 gl: 6

Localidad	Medias	n	E.E.	
Las Cabuyas	32,53	3	6,49	A
Jima Arriba	80,07	3	6,49	B
Rincón	93,70	3	6,49	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Anexo 8. Banco de imágenes de las actividades realizadas en el marco del estudio “ Aplicación de aeronave pilotada remotamente (drone) para el mapeo de nutrientes en arroz (*Oryza sativa* L.) a escala de fincas”



Figura 55. Aplicación de instrumentos de recolección de datos a los propietarios de las fincas evaluadas (de arriba hacia abajo).

En fotos: Sr. Jesús Padilla (Finca La Modelo, Jima Arriba); Sr. José Luis Bencosme (Finca Las Cabuyas (centro)) y Sr. Juan Pablo Pérez (Finca Rincón, Factoría La Nueva).



Figura 56. Muestreo de suelos y agua de riego antes de la siembra del cultivo. Actividades realizadas y financiadas en el marco del proyecto Fondocyt-IDIAF 2020-2021-3A5-027.
En foto: estudiantes de agronomía Johanny Vargas y Ramona Morel (izquierda); Ramona Morel (derecha).



Figura 57. Recolección de material vegetal de arroz, posterior al vuelo con el dron, actividad realizada en cuatro etapas fenológicas del cultivo.
En foto: Johanny Vargas y Leocadia Sánchez (maestra de agronomía en UTECO y investigadora colaboradora del proyecto Fondocyt-IDIAF 2020-2021-3A5-027).



Figura 58. Recolección de material vegetal de arroz, posterior al vuelo con el dron con el cultivo más avanzado.
En foto: Johanny Vargas y Ramona Morel.

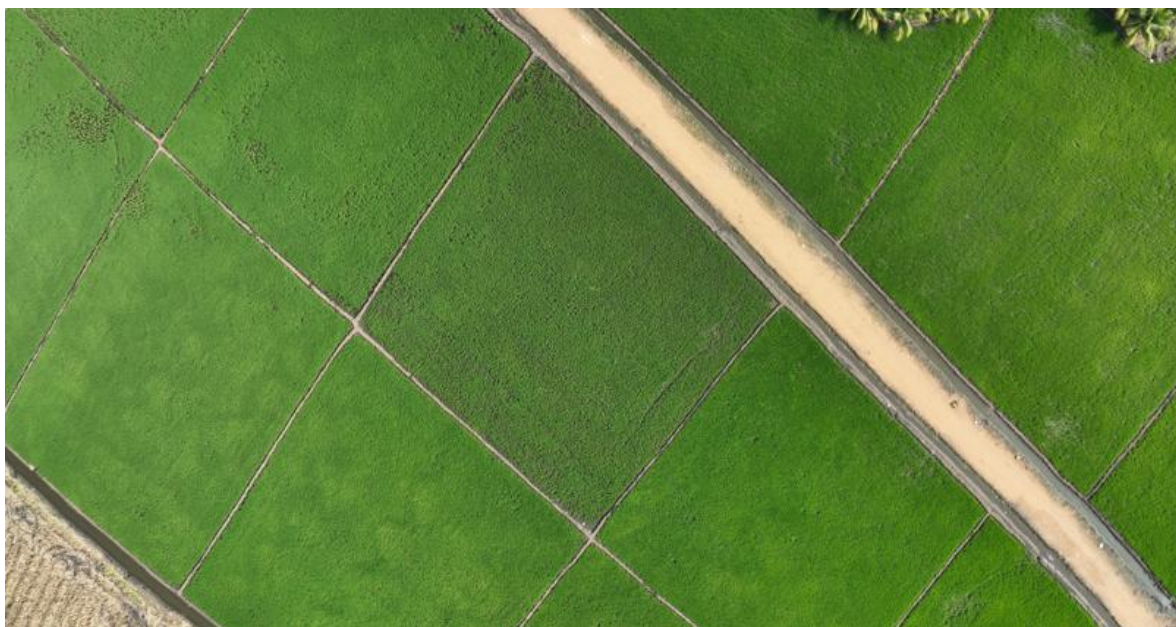


Figura 59. Vista aérea de finca La Modelo, ubicada en Jima Arriba, Rincón, , prov. La Vega, República Dominicana. Fotografía RGB tomada con un dron DJI Mavic 3 M (2025).

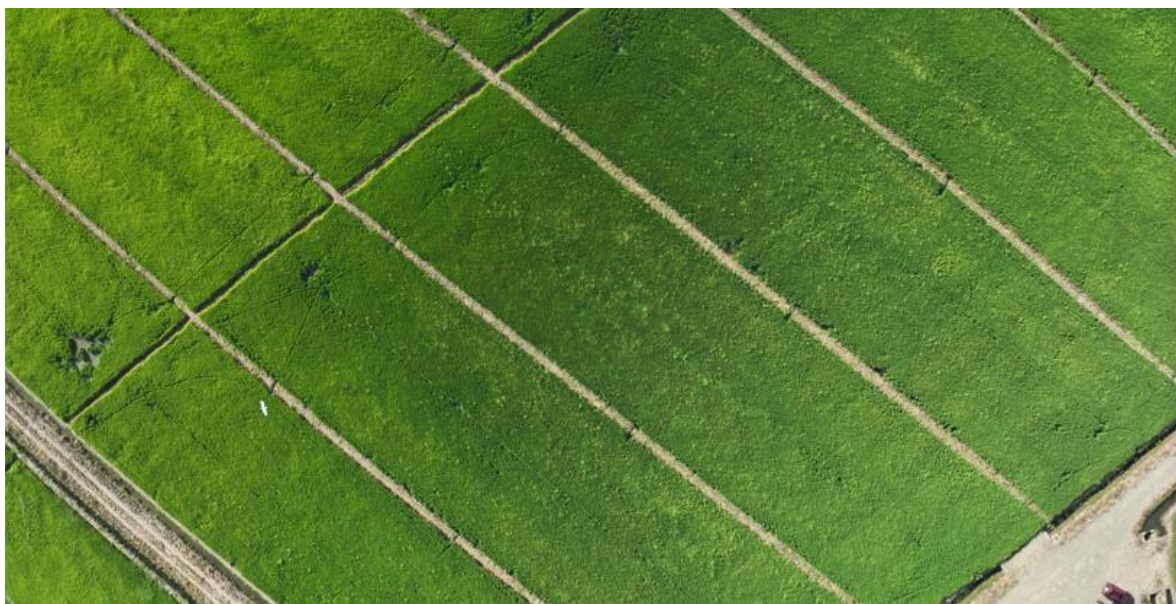


Figura 60. Vista aérea de J.P. Pérez, ubicada en Rincón, prov. La Vega, República Dominicana. Fotografía RGB tomada con un dron DJI Mavic 3 M (2025).



Figura 61. Vista aérea de finca J.L. Bencosme, ubicada en Las Cabuyas, prov. La Vega, República Dominicana. Fotografía RGB tomada con un dron DJI Mavic 3 M (2025).



Figura 62. Último vuelo y recolección de material vegetal para posterior análisis de nutrientes en laboratorio. Estudiantes de agronomía de la UTECO.
En foto: Ramona Morel y Johanny Vargas, junto a la maestra Dra. Glenny López Rodríguez, investigadora principal del proyecto Fondocyt-IDIAF 2020-2021-3A5-027.



Figura 63. Recolección de material de cosecha. para determinación de componentes de producción.
En foto: Roselys Díaz Caba y Elix Díaz Caba (pasantes de IDIAF) (foto superior); Ing. Leocadia Sánchez. investigadora colaboradora (inferior- izquierda) y Ramona Morel y Johanny Vargas (inferior- derecha).



Figura 64. Marco utilizado en la cosecha del cultivo para determinación de componentes de producción (foto superior-izquierda); separación de espigas de biomasa en material de cosechado (foto superior-derecha); conteo de espigas (foto inferior-izquierda) y determinación de componentes de producción en laboratorio (foto inferior-derecha).

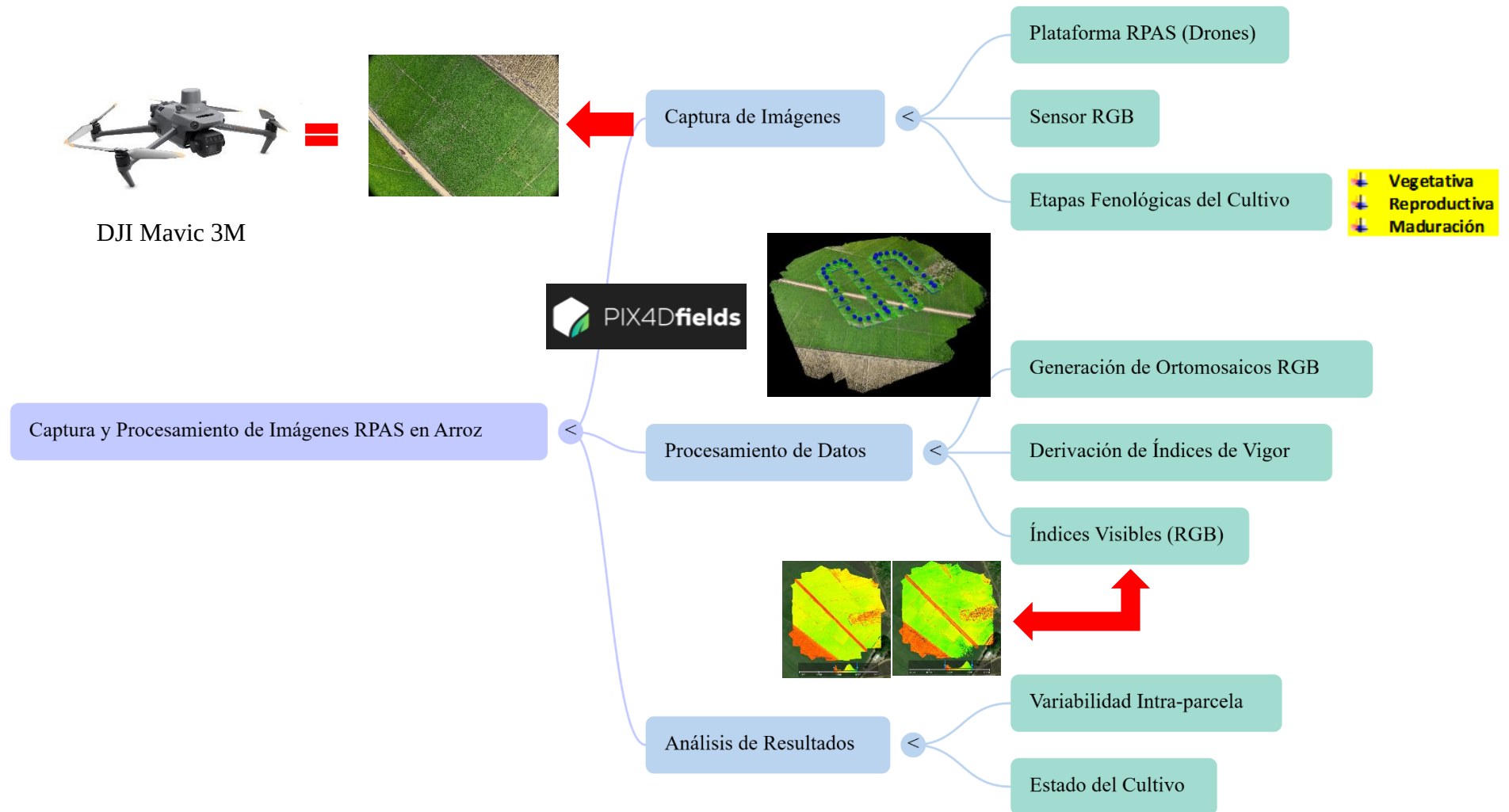


Figura 65. Determinación de porcentaje de germinación.



Figura 66. Participación en el 2do. Entrenamiento Básico Uso de Drone para Captura de Imágenes Aéreas, realizado el 13 de agosto 2025, en el Salón de Reuniones del Centro Norte, IDIAF y Campus Universitario UCATECI, La Vega, República Dominicana.

Anexo 9. Representación esquemática de la captura y procesamiento de imágenes RPAS en el cultivo de arroz.



Fuente: Elaboración propia (2025). Esquema metodológico desarrollado por las autoras con apoyo de la herramienta NotebookLM.