



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS

INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIEROS GEÓGRAFOS Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**TEMA: ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN ESPECTRAL DEL CHOCHO
(*Lupinus mutabilis Sweet*) POR LOS EFECTOS DE TRATAMIENTOS DE
DESINFECCIÓN DE SEMILLA**

AUTOR: GODOY GUANÍN, LUIS FERNANDO

LUNA GRANIZO, PEDRO JAIR

DIRECTOR: SINDE GONZÁLEZ, IZAR

SANGOLQUÍ

2019

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “*ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN ESPECTRAL DEL CHOCHO (Lupinus mutabilis Sweet) POR LOS EFECTOS DE TRATAMIENTOS DE DESINFECCIÓN DE SEMILLA*” realizado por los señores *Godoy Guanin, Luis Fernando y Luna Granizo, Pedro Jair* el mismo que sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar a los señores para que lo sustenten públicamente.



Sangolquí, 09 de enero del 2019

Ing. Izar Sinde González

C.C.: 1756491278

DIRECTOR

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, *Godoy Guanín, Luis Fernando y Luna Granizo, Pedro Jair*, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación “*ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN ESPECTRAL DEL CHOCHO (Lupinus mutabilis Sweet) POR LOS EFECTOS DE TRATAMIENTOS DE DESINFECCIÓN DE SEMILLA*” es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Luis Fernando Godoy Guanín

C.C.: 1718596032

Sangolquí, 09 de enero del 2019

Pedro Jair Luna Granizo

C.C.: 0926597857

AUTORIZACIÓN



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORIZACIÓN

Nosotros, *Godoy Guanín, Luis Fernando y Luna Granizo, Pedro Jair*, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación “*ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN ESPECTRAL DEL CHOCHO (Lupinus mutabilis Sweet) POR LOS EFECTOS DE TRATAMIENTOS DE DESINFECCIÓN DE SEMILLA*” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.



Sangolquí, 09 de enero del 2019

Luis Fernando Godoy Guanín

C.C.: 1718596032

Pedro Jair Luna Granizo

C.C.: 0926597857

DEDICATORIA

Desde un plano espiritual, agradezco a Dios por cuidarme, guiarme, corregirme y llenarme de muchas bendiciones, que esta profesión adquirida obré bajo tus principios y valores. Este trabajo es un momento épico, fruto del esfuerzo y apoyo incondicional de las personas que marcaron, apoyaron y contribuyeron en mi formación personal y académica en cada tiempo relativo de mi vida.

Con un cariño infinito, esta investigación es para mí familia. Nestor Fernando Godoy Chamorro que durante esta vida fuimos nuevos en el trabajo de ser padre e hijo, pero desarrollamos el mejor compromiso y no te cambiara por nada, para ti papito que esta es la mejor herencia que me puedes dejar, mi razón de ser no me faltes nunca. María Eufemia Guanín García, mi primer amor, mi primera amiga, el mejor ejemplo de la palabra madre, no podría definirte en pocas líneas, para ti mamita. Finalmente, y no menos importante Erika Alexandra Godoy Guanín, a darle fuerte a esta vida, eres mi eterna compañera y cuidaré de ti hasta el final de los días, para ti hermanita.

A mi compañero de tesis Pedro Jair Luna Granizo por todo el esfuerzo, la dedicación y el infinito empeño a lo largo de todo el desarrollo de nuestra investigación. Este logro es digno de nosotros mi hermano. ¡Gracias Peter lo logramos!

DEDICATORIA

Un camino largo de recorrer, las adversidades marcan la grandeza del éxito. En los tiempos difíciles no debemos perder de vista nuestros objetivos. Cuando tus sueños se hacen realidad con un esfuerzo sincero, no existe mayor satisfacción. Este trabajo es un sueño cumplido, fruto de la entrega y dedicación, de varios años de estudio y el apoyo incondicional de muchas personas.

A Dios, el pilar fundamental en mi vida, por siempre brindarme su bendición y dicha de compartir mi vida con una familia maravillosa.

A mis padres, por ser ese apoyo incansable e incondicional a lo largo de mi vida. Todos los logros que he alcanzado y alcanzaré, van dedicados a ustedes, son la fuerza que me impulsa día a día a levantarme y seguir luchando por mis sueños. A mi mami Miriam, por ser una madre amorosa, y siempre estar pendiente de toda su familia, no existe ser más maravilloso que usted en este mundo. A mi papi Pedro, por ser esa persona ejemplar y correcta que ha marcado mi personalidad, la disciplina y la honestidad son los valores más destacables que me ha podido brindar.

A mi hermana hermosa Brendita, el amor que te tengo es infinito, como siempre me has dicho soy el mejor regalo en tu vida, este logro también es tuyo; ese amor de hermanos que es difícil explicar, pero tiene un alcance gigante. Eres ese gran ejemplo a seguir, por tu lucha y gran inteligencia, imitarte en tus logros siempre será un orgullo para mí.

Al amor de mi vida, Lucy, este logro también es tuyo, me supiste levantar en los momentos más duros de mi vida, tu presencia oportuna y amor incondicional me han permitido alcanzar hoy este sueño. Siempre voy a estar presente para ti, te amo.

Sé que cuanto algo bueno me pasa, es gracias a esos tres angelitos que tengo, les dedico este triunfo, aunque no tuve la dicha de compartir con ustedes, estoy seguro que desde el cielo su protección y bendición nunca me van a faltar.

A mi hermano, amigo y compañero de tesis Lucho, por todas las horas de dedicación en este trabajo y en la universidad, por tantos momentos memorables, por las conversaciones y consejos que me has brindado, y por ser ese pana incondicional.

Pedro Luna.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de las Fuerzas Armadas y a sus distinguidos docentes de la Carrera de Ingeniería Geográfica y Medio Ambiente, que me han formado como profesional, inculcando principios y valores. Adicionalmente a la parte académica de una manera personal agradezco a los ingenieros Eduardo Kirby, Theofilos Toulkeridis, Marco Luna, Alexander Robayo, Wilson Jácome, Tania Crisanto, Oswaldo padilla y Pablo Pérez, a todos gracias por la confianza, las palabras, consejos, y las oportunidades brindadas.

Al Ing. Izar Sinde, director de nuestra tesis, por su tiempo y su guía en la elaboración de la presente investigación. Un eterno agradecimiento por el tiempo y la abundancia de conocimiento transmitidos al Ing. Cesar Falconí, PhD quien siempre estuvo prestos a resolver nuestras dudas e inquietudes, involucrando siempre que la ciencia e investigación es un campo multidisciplinario.

Al instituto Espacial Ecuatoriano (IEE) por darnos la oportunidad y las facilidades para desarrollar esta investigación. Al Ing. Javier Manguashca, quien fue la base fundamental para el proceso de elaboración del tema de investigación. A la Ing. Ruth Nato por su tiempo, dedicación y paciencia impartida.

Luis Godoy.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, sobre todo a los profesionales de la Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente, por todos los conocimientos compartidos y los valores éticos, para alcanzar una formación profesional de alto nivel.

A mis profesores y amigos, Ing. Eduardo Kirby, Ing. Marco Luna, Ing. Pablo Pérez, Ing. Pauli y Química Erika Murgueitio, por compartir sin restricción sus conocimientos, por ser grandes maestros y sobre todo, por ser excelentes personas.

A mi tutor de tesis, Ing. Izar Sinde, gracias por formar parte de este trabajo, por la presencia siempre oportuna, y su ayuda.

Una mención muy especial para el Doctor Falconí, por ayudarnos dentro de la parte agronómica a complementar nuestra formación profesional, y la predisposición de siempre ayudar e impulsar la investigación.

Al Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE), por abrirnos las puertas. Por brindarnos, el apoyo y acceso a todos los equipos necesarios y el acceso a los conocimientos de su personal. Al Ing. Javier Manguashca, por ser parte fundamental en este trabajo, por el apoyo para consolidar de manera correcta todos los conocimientos adquiridos. A la Ing. Ruth Nato, por acompañarnos a todos los muestreos realizados, gracias por tener siempre esa buena predisposición para ayudarnos.

A todas las personas que nos ayudaron a recolectar la información de campo, DaniO, Mish, Dennys, Lucy.

A mis padres, hermana, abuelitos, Mami Antuqui y Papi Vichi, por sus bendiciones y amor. A mis tíos, que han sido como unos abuelitos, Ñaña Grima y Ñaña Miguel, ustedes que siempre encuentran las palabras correctas para corregirme y guiarme. A mis tíos, Ñaña Fanny y Ñaña Willy, por el apoyo incondicional. A toda mi familia, por siempre estar pendientes de mi progreso.

A mis amigas y hermanas, DaniO, Daniba y Joha, gracias por compartir tantos momentos inolvidables, y por brindarme esta maravillosa amistad. A mis ñañas, Chiki, Shushu y Joito, por estar siempre en los buenos y malos momentos. A mis amigos de la Universidad, Dari, Kerby, Pateins, Lucho, Omar y Dennys, por compartir el fútbol y una gran amistad.

A mi mejor amigo, Carlitos, eres muy importante en mi vida, nos une ese gran sentimiento por el mejor deporte del mundo, aunque no nos veamos frecuentemente, no existe dudas que siempre podré contar contigo.

A ti mi vida, Lucy, por amarme incondicionalmente y sobre todo apoyarme a lo largo de este camino. Se viene más logros y todos los quiero compartir contigo. Eres una increíble persona, la vida y Dios me brindaron la dicha de poder vivir compartir momentos únicos. Te amo.

Pedro Luna.

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTOS	vi
ÌNDICE	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT	xiv
CAPÍTULO I.....	1
ASPECTOS GENERALES.....	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Estudios relacionados.....	3
1.3 Planteamiento del problema	3
1.4 Justificación e importancia.....	4
1.5 Descripción del área de estudio.....	6
1.6 Objetivos	7
1.6.1 Objetivo General.....	7
1.6.2 Objetivos Específicos	7
1.7 Metas del proyecto	8
CAPITULO II	9
MARCO TEÓRICO.....	9
CAPITULO III	28
METODOLOGÍA	28
3.1 Tamaño de la muestra.....	29
3.2 Planificación de muestreo	30
3.3 Materiales y equipos.....	30
3.4 Ensayo A - Invernadero.....	31

3.4.1	Diseño experimental para el ensayo A	32
3.4.2	Metodología para la captura general de datos espectrales o radiométricos	33
3.4.2.1	Captura de datos espectrales o radiométricos	33
3.4.2.2	Procesamiento de datos espectrales o radiométricos	34
3.4.2.3	Generación de Índices de Vegetación	34
3.4.2.4	Análisis estadístico de los valores de índices de vegetación	35
3.4.3	Metodología para la captura general de contenido de clorofila.....	37
3.4.3.1	Captura de datos de contenido de clorofila.....	37
3.4.3.2	Procesamiento de los datos de contenido de clorofila	37
3.4.3.3	Análisis estadístico del contenido de clorofila.....	38
3.5	Ensayo B - Campo.....	38
3.5.1	Diseño experimental para el ensayo B.....	39
3.5.2	Metodología para la captura general de imágenes aéreas mediante UAV	40
3.5.2.1	Planificación de vuelo.....	40
3.5.2.2	Parámetros de vuelo.....	41
3.5.2.3	Puntos de apoyo fotogramétrico	41
3.5.2.4	Ejecución del vuelo.....	43
3.5.2.5	Descarga de la información.....	44
3.5.2.6	Proceso Fotogramétrico	44
3.5.2.7	Generación de Índices de Vegetación para imágenes obtenidas por el UAV	45
3.5.2.8	Análisis estadístico de los valores de NDVI _U	50
CAPITULO IV		51
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		51
4.1	Resultados del ensayo A – Invernadero	51
4.1.1	Resultados de firmas espectrales para el ensayo A	51
4.1.2	Resultados del contenido de clorofila para el ensayo A	52
4.1.3	Análisis de Varianza (ADEVA) para ensayo A – Invernadero.	53
4.1.4	Prueba de Fisher	54
4.1.4.1	Tratamientos de desinfección de semilla por calor seco.....	54
4.1.4.2	Estados fenológicos del cultivo de chocho para el ensayo A	56
4.2	Resultados del ensayo B – Campo	62

4.2.1 Resultados de firmas espectrales para el ensayo B.....	62
4.2.2 Resultados de contenido de clorofila para el ensayo B	63
4.2.3 Resultados de NDVI _U y NDVI _E	64
4.2.4 Análisis de Varianza (ADEVA) para el ensayo B – Campo	64
4.2.5 Prueba de Fisher	66
4.2.5.1 Tratamientos de desinfección de semilla por radiación solar	66
4.2.5.2 Estados fenológicos del cultivo para el ensayo B	68
CAPITULO V	76
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	76
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Proyectos relacionados</i>	3
Tabla 2. <i>División del espectro electromagnético.</i>	12
Tabla 3. <i>Pigmentos de las plantas y su absorción máxima.</i>	15
Tabla 4. <i>Diferentes Índices de vegetación.</i>	16
Tabla 5. <i>Estados fenológicos del chocho.</i>	22
Tabla 6. <i>Componentes de la ADEVA para un DCA.</i>	27
Tabla 7. <i>Planificación de muestreo según el ciclo vegetativo para datos espectrales.</i>	30
Tabla 8. <i>Materiales y equipos.</i>	31
Tabla 9. <i>Tratamientos de desinfección de semilla por calor seco.</i>	32
Tabla 10. <i>Pseudo bandas del sensor multiespectral Parrot Sequoia.</i>	35
Tabla 11. <i>Tratamientos de desinfección de semilla por radiación solar.</i>	40
Tabla 12. <i>Planificación de la captura de imágenes aéreas mediante UAV.</i>	41
Tabla 13. <i>Parámetros de vuelo para el Phantom 4.</i>	41
Tabla 14. <i>Coordenadas procesadas de los puntos de apoyo fotogramétrico.</i>	43
Tabla 15. <i>Resultados de datos espectrales para el ensayo A.</i>	52
Tabla 16. <i>Resultados de datos de contenido de clorofila para el ensayo A.</i>	52
Tabla 17. ρ – valor para datos radiómetros y contenido de clorofila en el ensayo A.	53
Tabla 18. <i>Prueba de Fisher de contenido de clorofila por tratamientos para el ensayo A.</i>	55
Tabla 19. <i>Prueba de Fisher para los índices NDVI y TNDVI por estados fenológicos para el ensayo A.</i> ..	56
Tabla 20. <i>Prueba de Fisher para el índice SR-RE por estados fenológicos para el ensayo A.</i>	58
Tabla 21. <i>Prueba de Fisher para el índice NDRE por estado fenológico para el ensayo A.</i>	59
Tabla 22. <i>Prueba de Fisher para el índice CCI por estados fenológicos para el ensayo A.</i>	60
Tabla 23. <i>Prueba de Fisher para el contenido de clorofila por estado fenológico para el ensayo A.</i>	61
Tabla 24. <i>Resultados de datos espectrales para el ensayo B.</i>	63
Tabla 25. <i>Resultados de contenido de clorofila para el ensayo B.</i>	63
Tabla 26. <i>Resultados de NDVI_E y NDVI_U para el ensayo B.</i>	64
Tabla 27. ρ – valor para datos radiómetros, índice para UAV y contenido de clorofila en el ensayo B...64	
Tabla 28. <i>Prueba de Fisher para índices de vegetación NDVI, TNDVI y CCI por tratamientos en el ensayo B.</i>	66
Tabla 29. <i>Prueba de Fisher para índices de vegetación NDVI_U y NDVI_E por tratamientos en el ensayo B.</i>	67
Tabla 30. <i>Prueba de Fisher para los índices NDVI y TNDVI por estado fenológico para el ensayo B.</i> ...69	
Tabla 31. <i>Prueba de Fisher para el índice SR-RE por estado fenológico para el ensayo B.</i>	70
Tabla 32. <i>Prueba de Fisher para el índice NDRE por estado fenológico para el ensayo B.</i>	71
Tabla 33. <i>Prueba de Fisher para el índice CCI por estado fenológico para el ensayo B.</i>	72
Tabla 34. <i>Prueba de Fisher para el contenido de clorofila por estado fenológico para el ensayo B.</i>	73
Tabla 35. <i>Prueba de Fisher para el índice NDVI_E por estado fenológico para el ensayo B.</i>	74
Tabla 36. <i>Prueba de Fisher para el índice NDVI_U por estado fenológico para el ensayo B.</i>	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización geográfica del área de estudio.	6
Figura 2. Formas de teledetección.	9
Figura 3. Resoluciones dentro de los sistemas sensores de Teledetección.	11
Figura 4. Espectro electromagnético.	12
Figura 5. Firma espectral típica de la vegetación.	14
Figura 6. Clasificación de UAVs por despegue.	20
Figura 7. Condiciones Edafoclimáticas.	21
Figura 8. Estados fenológicos del cultivo de chocho.	22
Figura 9. Variación total de los componentes del DCA.	26
Figura 10. Esquema de la metodología general.	28
Figura 11. Distribución de las parcelas de estudio para el ensayo A.	32
Figura 12. Calibración y montaje del espectroradiómetro.	33
Figura 13. Captura de datos espectrales para cada planta.	33
Figura 14. Base de datos en formato .xlsx de valores de reflectancia y primera derivada.	34
Figura 15. Captura de contenido de clorofila por hoja de chocho.	37
Figura 16. Distribución de las parcelas de estudio para el ensayo B.	39
Figura 17. Distribución de los puntos de control en la zona de estudio.	42
Figura 18. Dimensiones de las marcas para puntos de apoyo fotogramétrico.	43
Figura 19. Visualización de vuelo en la aplicación Pix4D Capture.	44
Figura 20. Diagrama de flujo para el proceso fotogramétrico.	45
Figura 21. Visualización de los ortomosaicos generados: a) Ortomosaico sin calibración; b) Ortomosaico calibrado en la aplicación Mapir Camera Control.	46
Figura 22. Generación de NDVI _U para los ortomosaicos.	47
Figura 23. (Izq.) Estación base y (Der.) móvil para la georreferenciación de las plantas.	48
Figura 24. Georreferenciación de plantas.	49
Figura 25. Extracción de valores de NDVI _U	49
Figura 26. Contenido de clorofila por tratamientos para el ensayo A.	55
Figura 27. a) Comportamiento de NDVI por estado fenológico para el ensayo A; b) Comportamiento de TNDVI por estado fenológico para el ensayo A.	57
Figura 28. Comportamiento del índice SR-RE por estados fenológicos para el ensayo A.	58
Figura 29. Comportamiento del índice NDRE por estados fenológicos para el ensayo A.	59
Figura 30. Comportamiento del índice CCI por estados fenológicos para el ensayo A.	61
Figura 31. Comportamiento del contenido de clorofila por estados fenológicos para el ensayo A.	62
Figura 32. a) Comportamiento del índice NDVI por estados fenológicos para el ensayo; b) Comportamiento del índice TNDVI por estados fenológicos para el ensayo B.	69
Figura 33. Comportamiento del índice SR-RE por estados fenológicos para el ensayo B.	70
Figura 34. Comportamiento del índice NDRE por estados fenológicos para el ensayo B.	71
Figura 35. Comportamiento del índice CCI por estados fenológicos para el ensayo B.	72
Figura 36. Comportamiento del contenido de clorofila por estados fenológicos para el ensayo B,	73
Figura 37. Comportamiento del índice NDVI _E por estados fenológicos para el ensayo B.	74
Figura 38. Comportamiento del índice NDVI _U por estados fenológicos para el ensayo B.	75

RESUMEN

La agricultura de precisión (AP) consiste en la aplicación de diversas tecnologías para identificar variaciones en el cultivo, con el fin de optimizar recursos. El objetivo del proyecto es analizar el comportamiento espectral de chocho, mediante técnicas de teledetección para su control y monitoreo por la aplicación de tratamientos de desinfección de semilla y su efecto en sus diferentes estados fenológicas. Se implementaron dos ensayos, en invernadero y en campo. Se utilizó un DCA con tres repeticiones y se consideraron 6 muestreos en función de los estados fenológicos del cultivo. En ambos ensayos, se generaron los índices de vegetación: NDVI, TNDVI, SR-RE, NDRE, NDVIE y CCI, con un espectralradiómetro y se empleó un medidor de clorofila. Además, en campo, se empleó un UAV con una lente modificada para generar un índice NDVI_U. Una vez registrado todos los datos espectrales, se aplicó un análisis de varianza (ADEVA) y una prueba de LSD Fisher al 5% para encontrar diferencias significancias para tratamientos y estados fenológicos. Se obtuvo, que para todos los índices existen diferencias significativas para estados fenológicos. Se concluye, que el mejor tratamiento de desinfección de semilla en invernadero es el T2 (60 min calor seco), y campo el T4 (45 min ambiente). Para la caracterización espectral del cultivo, los índices CCI, SR-RE y NDRE presentan mayor precisión dentro de invernadero; en cambio, los índices SR-RE y NDRE presentan mayor precisión en campo. Los índices NDVI y TNDVI, son indicadores más sensibles de presencia de estrés en la planta.

PALABRAS CLAVE:

AGRICULTURA DE PRECISIÓN

TRATAMIENTOS DE DESINFECCIÓN DE SEMILLA

CHOCHO

ÍNDICES DE VEGETACIÓN

ESTADOS FENOLÓGICOS

ABSTRACT

Precision agriculture (AP) involves the application of various technologies to identify variations in the crop, in order to optimize resources. The objective of the project is to analyze the spectral behavior of lupine, by means of remote sensing techniques for its control and monitoring by the application of seed disinfection treatments and their effect in their different phenological stages. Two trials were implemented, one in the greenhouse and the other in the field. A DCA with three replications was used and 6 samplings were considered depending on the phenological stages of the crop. In both tests, vegetation indices were generated: NDVI, TNDVI, SR-RE, NDRE, NDVIE and CCI, with a spectroradiometer and a chlorophyll meter was used. In addition, in the field, a UAV with a modified lens was used to generate an NDVIU index. Once all the spectral data had been recorded, an analysis of variance (ADEVA) and a 5% Fisher LSD test were applied to find significant differences for treatments and phenological stages. It was obtained that for all the indexes there are significant differences for phenological stages. It is concluded that the best seed disinfection treatment in the greenhouse is T2 (60 min dry heat), and field T4 (45 min ambient). For the spectral characterization of the crop, the CCI, SR-RE and NDRE indices present greater precision within the greenhouse; On the other hand, the SR-RE and NDRE indices have greater accuracy in the field. The NDVI and TNDVI indices are more sensitive indicators of the presence of stress in the plant.

KEY WORDS:

PRECISION FARMING

SEED DISINFECTION TREATMENTS

LUPINE

VEGETATION ÍNDICES

PHENOLOGICAL STAGES

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1 Antecedentes

El chocho andino (*Lupinus mutabilis*) es una leguminosa que se cultiva en los Andes a partir de los 1.500 msnm, se encuentra en ciertos países tales como: Ecuador, Perú, Bolivia, Chile y Argentina (Guaytarilla & Falconí, 2014).

El proyecto Mejora de la cadena productiva del chocho (*Lupinus mutabilis*) en Ecuador es una Alianza Estratégica Nacional integrada por un equipo multidisciplinario de expertos de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, Universidad de las Américas (UDLA) y Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC), que con el auspicio de la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT), impulsan el desarrollo sostenible de la producción del chocho, suministrando alimentos en buena cantidad y calidad para la nutrición saludable; de esta manera, los agricultores impulsarán el desarrollo de una agricultura sostenible.

Para lograr una agricultura sostenible, se necesita la implementación de nuevas tecnologías que faciliten la ejecución de esta actividad; por tal razón, surge el concepto de Agricultura de Precisión (AP), que consiste principalmente en tres aspectos: una aplicación correcta de insumos, en el momento oportuno y en el lugar exacto (García & Flego, 2008). Para lograr el cumplimiento de estos tres aspectos, se utilizan herramientas tecnológicas como: sistemas de posicionamiento global, imágenes multiespectrales (Imágenes satelitales e imágenes de UAV) y sensores terrestres de planta-clima-suelo (Díaz, 2015). La información obtenida del estudio multitemporal del cultivo

mediante estas herramientas, se refleja en datos numéricos como: tablas, índices de vegetación, y curvas espectrales.

El estudio multitemporal de un cultivo, a través del espectro electromagnético con énfasis en las longitudes de onda, se desarrolla dentro del espectro visible e infrarrojo cercano, y de esta manera, los índices de vegetación se enfocan para el análisis de un cultivo dentro de la agricultura de precisión. Gilabert et al. (1997) en su estudio “Acerca de los Índices de Vegetación”, aporta desde una perspectiva docente la definición y funcionalidad de los índices de vegetación mediante el análisis de datos radiométricos en laboratorio. Por otro lado, Ortega (2015) en su trabajo “Respuesta espectral del cultivo de arroz (*Oryza sativa L.*) en dos fases fenológicas durante el periodo invernal 2014” menciona que: “...se muestra el incremento de la reflectancia en las longitudes de onda que corresponde a la región visible del espectro electromagnético (450 y 700 nm), que coinciden con la radiación fotosintéticamente activa (PAR) provocados por la falta de nutrientes, estableciéndose dentro de la fase reproductiva, en la etapa de floración estas variaciones se pueden observar con mayor claridad...”.

Araque y Jiménez (2009) en su artículo “Caracterización de firma espectral a partir de sensores remotos para el manejo de sanidad vegetal en el cultivo de palma de aceite”, plantean una metodología para el seguimiento de la problemática de sanidad en una plantación de palma de aceite a escala regional. De esta manera, relacionar el estado fenológico del cultivo con la información en el espectro del infrarrojo cercano.

1.2 Estudios relacionados

Los estudios realizados dentro del ámbito de la agricultura de precisión en diferentes cultivos que integren las tecnologías como la Teledetección, UAV e índices de vegetación son diversos. Por otro lado, los estudios del cultivo del chocho se enmarcan dentro de la caracterización de sus enfermedades, fitonutrición y aspectos generales del cultivo. En la Tabla 1 se mencionan algunos trabajos dentro de estos campos:

Tabla 1.
Proyectos relacionados

Autores	Tema	Lugar/Año de Publicación
Ortega, C.	Respuesta espectral del cultivo de arroz (<i>Oryza sativa</i> L.) en dos fases fenológicas durante el periodo invernal 2014.	Quito - Ecuador 2015
Araque, L., & Jiménez, A.	Caracterización de firma espectral a partir de sensores remotos para el manejo de sanidad vegetal en el cultivo de palma de aceite.	Revista Palmas, 2009
Díaz, J.	Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión.	Madrid - España, 2015
Falconí, D. & Yáñez-Mendizábal, V.	Dry heat treatment of Andean lupin seed to reduce anthracnose infection	Sangolquí – Ecuador, 2016
Caicedo, C., & Peralta, E.	El cultivo de chocho <i>Lupinus mutabilis</i> Sweet: Fitonutrición, enfermedades y plagas, en el Ecuador.	Quito - Ecuador, 2001
Guaytarilla, P., & Falconí, C.	Selección por arquitectura de la planta y resistencia a la Antracnosis de 7 Genotipos de Chocho (<i>Lupinus mutabilis</i>).	Sangolquí – Pichincha - Ecuador: Congreso de Ciencia y Tecnología (ISSN: 1390-4663), 2014

1.3 Planteamiento del problema

El rendimiento de un cultivo se ve limitado no solo por la variabilidad espacial de las propiedades del suelo, sino también, a la susceptibilidad hacia las enfermedades que se presentan durante su ciclo vegetativo. En Ecuador se han reportado algunos patógenos foliares presentes principalmente en las semillas que afectan el cultivo del chocho. Estos patógenos disminuyen el

rendimiento del cultivo (Caicedo & Peralta, 2001). La antracnosis es una de las principales enfermedades que afecta al cultivo del chocho, Murillo et al. (2007) en su estudio “Avances preliminares en el mejoramiento genético del chocho (*Lupinus mutabilis Sweet*) para resistencia a la antracnosis” señalan que el agente causal de la antracnosis (*Colletotrichum spp*) genera pérdidas con un porcentaje de hasta el 100%. Desde la perspectiva de la producción, INEC (2002) y Peralta (2016), mencionan que la producción por hectárea del cultivo es muy baja, esto se debe a diversos factores como la presencia de plagas o enfermedades.

Por abordar dicha problemática, es necesario generar mapas espectrales de los problemas sanitarios de una planta, mediante la caracterización de valores bajos de reflectancia en el espectro electromagnético visible y valores muy altos en el infrarrojo cercano (Aunirundronkool et al., 2008). En la actualidad, existen bibliotecas espectrales, con respuestas espectrales típicas de cultivos, sin embargo, estas respuestas están limitadas a regiones y/o períodos particulares, por lo que no se pueden aplicar directamente (Rueda-Ayala, Kunapuli, & Manguashca, 2015).

En el Ecuador, la información espectral de cultivos en bibliotecas espectrales es limitada, no existen estudios del comportamiento del cultivo de chocho por la aplicación de tratamientos de desinfección de semilla desde una perspectiva radiométrica, utilizando metodologías, herramientas y software modernos relacionados a la Teledetección y tecnologías como los UAV, evidenciando así la falta de aplicación de éstas en el seguimiento y control de este cultivo.

1.4 Justificación e importancia

Con finalidad de mejorar el monitoreo de cultivos, las nuevas herramientas tecnológicas como: la Teledetección, uso de UAV y la generación de índices de vegetación, constituyen excelentes

alternativas para el manejo de recursos ambientales y toma de decisiones (Quishpe, 2015). Es importante, que en el Ecuador se desarrollen estudios utilizando estas tecnologías, con la finalidad de proyectar un desarrollo sostenible en donde se optimicen recursos de toda índole (tiempo, recursos naturales, dinero); considerando la respuesta espectral de los cultivos como una alternativa para mejorar el rendimiento.

Por otro lado, la importancia agroecológica del cultivo de chocho, es la fijación de nitrógeno atmosférico para mejorar la fertilidad del suelo mediante su sistema radicular y sirve como una alternativa de rotación con otros cultivos como cereales y tubérculos (Caicedo & Peralta, 2001). La importancia socioeconómica, radica en el contenido proteico, sus semillas contienen más del 40% de proteína (Horton, 2014), y a su vez este cultivo puede mejorar las fuentes de ingresos de los agricultores por su rentabilidad (Guaytarilla & Falconí, 2014). Por tal razón, los estudios sobre este cultivo permiten el desarrollo económico, social, ambiental e investigativo del país, aportando en diferentes áreas del conocimiento, no solo en el ámbito de la Teledetección, sino también dentro de la disciplina de la Agronomía.

Este estudio utilizó herramientas tecnológicas como el análisis espectral y el uso de UAV para caracterizar la respuesta espectral del chocho (*Lupinus mutabilis Sweet*) y su variabilidad espectral durante sus diferentes estados de desarrollo, por la aplicación de tratamientos de desinfección de semilla, con la finalidad de mejorar el rendimiento del cultivo.

1.5 Descripción del área de estudio

El área de estudio se encuentra en el campus IASA I, Hda. el Prado de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, dentro del ubérrimo Valle de los Chillos de la provincia de Pichincha, cantón Rumiñahui, parroquia de Sangolquí, sector Selva Alegre (Figura 1). La Hacienda el Prado tiene una altura de 2722 m.s.n.m.

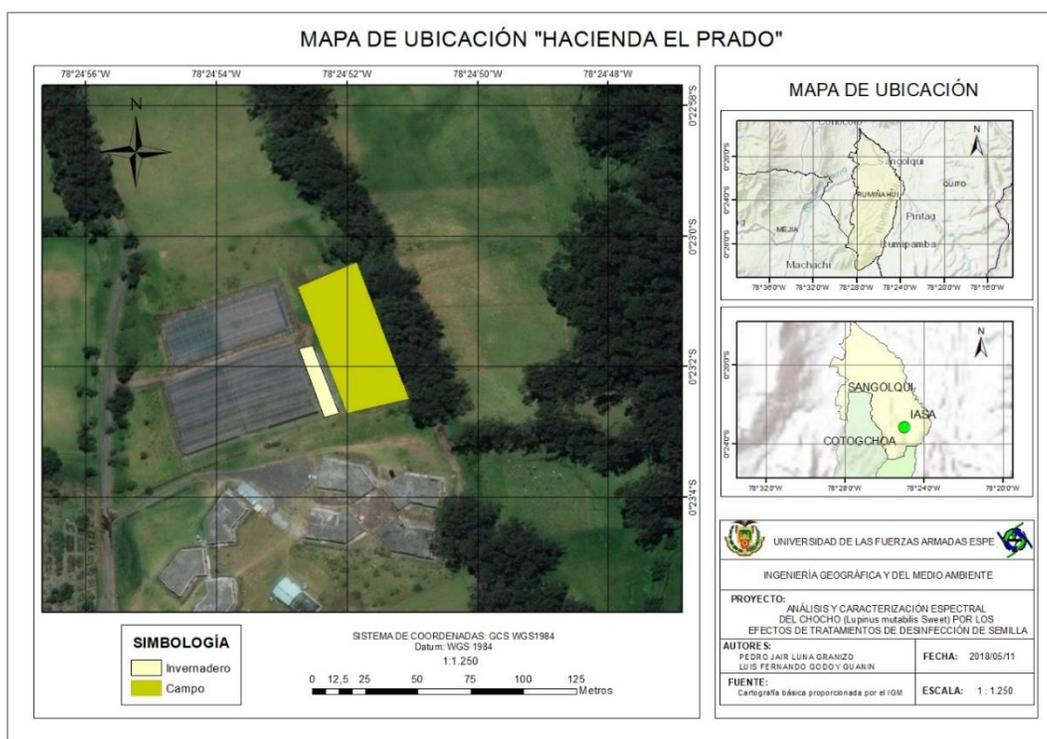


Figura 1. Localización geográfica del área de estudio.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo General

Analizar el comportamiento espectral de chocho, mediante técnicas de teledetección para su control y monitoreo por la aplicación de tratamientos de desinfección de semilla y su efecto en sus diferentes estados fenológicos.

1.6.2 Objetivos Específicos

- Obtener datos espectrales multitemporales y el contenido de clorofila en un cultivo de chocho en dos ensayos (invernadero y campo), mediante un espectroradiómetro y un medidor de clorofila.
- Obtener datos radiométricos multitemporales del cultivo en campo mediante un sensor multiespectral (modificado) aerotransportado.
- Generar índices de vegetación NDVI, TNDVI, SR-RE, CCI y NDRE y analizar estadísticamente los resultados obtenidos por espectroscopia e imágenes aéreas, con la finalidad de evaluar una correlación radiométrica entre los tratamientos de desinfección de la semilla.
- Realizar un análisis bioestadístico para correlacionar los datos radiométricos de los tratamientos de desinfección de las semillas presentes en los dos ensayos.

1.7 Metas del proyecto

- Un registro de respuestas espectrales obtenidas del cultivo en diferentes estados fenológicos presentes en los dos ensayos y su relación radiométrica a los tratamientos de desinfección de la semilla.
- Una tabla con datos cuantitativos de clorofila en los diferentes estados fenológicos presentes en los dos ensayos y su relación radiométrica a los tratamientos de desinfección de la semilla.
- Imágenes multiespectrales de al menos tres estados fenológicos del cultivo para la zona de estudio.
- Índices de vegetación de al menos tres estados fenológicos del cultivo.
- Respuesta espectral típica de chocho para la zona de estudio.
- Un informe del análisis bioestadístico para la correlación de los datos obtenidos en los ensayos de investigación.
- Artículo científico con el contenido y estructura a ser presentados en revistas al menos indexadas.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

La teledetección tiene por finalidad identificar y caracterizar los materiales de la superficie terrestre y los procesos que en ella ocurren, mediante el uso de sensores aéreos o espaciales. Para poder caracterizar dichos procesos, es indispensable la interacción de tres elementos: un sensor, un elemento a observar y un flujo de energía (radiación electromagnética); el flujo procede del objeto por reflexión de la luz solar, también se puede considerar como un tipo de energía emitida por el propio objeto, o incluso por el sensor. Por lo tanto, se puede considerar tres formas de obtener información a partir de un sensor remoto: por reflexión (i), por emisión (ii) y por emisión-reflexión (iii) (Chuvieco, 2008) (ver figura 2).

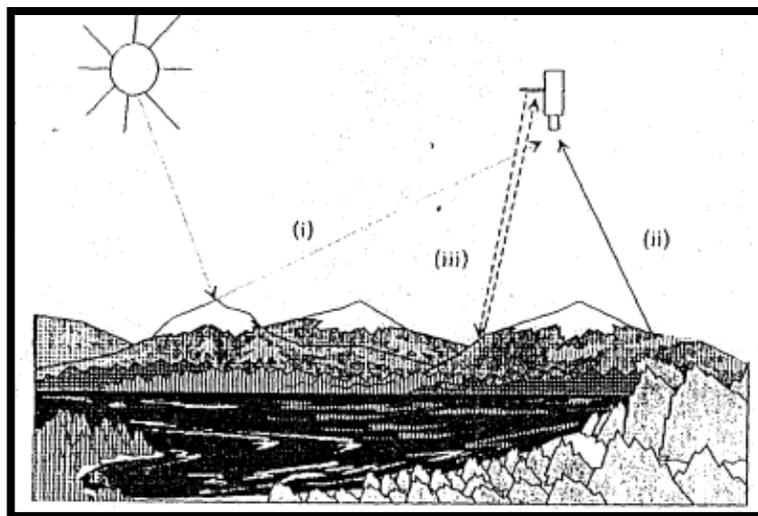


Figura 2. Formas de teledetección.

Fuente: (Chuvieco, 2008)

De manera general, la Teledetección es una técnica que obtiene información útil de un objeto, área o fenómeno, a través del análisis e interpretación de datos de imágenes satelitales (Chuvieco,

2008). Para el análisis de imágenes satelitales se destacan diferentes rangos de precisión, dichos rangos son evaluados por medio de resoluciones, dentro de los sistemas sensores de Teledetección se distinguen cinco resoluciones: resolución espacial, radiométrica, espectral, temporal y angular.

La resolución espacial se considera como la capacidad del sistema para distinguir objetos en función de su tamaño, se puede interpretar como el tamaño de objeto más pequeño que puede ser distinguido en una imagen (Pérez & Muñoz, 2006). Chuvieco (2008) define a la resolución espacial como el concepto de campo de visión instantáneo (IFOV - instantaneous field of view), que se define como la sección angular, medida en radianes, observada en un determinado momento; sin embargo, se acostumbra a utilizar más bien la distancia sobre el terreno que corresponde a ese ángulo, teniendo en cuenta la altura de vuelo y la velocidad de exploración del sensor; esta distancia se considera como pixel (unidad mínima de información de una imagen) (ver figura 3a). Por otro lado, la resolución radiométrica, indica la capacidad del sensor para discriminar niveles o intensidades de radiancia, la información que el sensor capta para transformarla a niveles digitales es necesario un formato binario (números de bits) para codificarse, por ejemplo la resolución radiométrica de 8 bits tienen 256 niveles de radiancia, los datos con una resolución de 12 bits presentan valores de 4.096 niveles de radiancia (ver figura 3b) (Pérez & Muñoz, 2006; Richards, 2013). La resolución espectral, indica el número y ancho de cada banda espectral que puede discriminar el sensor, mientras mayor sea el número de bandas mayor es la resolución espectral (ver figura 3c). La resolución temporal, se relaciona con la periodicidad que posee el sensor para registrar información, es decir, mide el tiempo de paso del satélite sobre la vertical de un punto (Pérez & Muñoz, 2006) (ver figura 3d). La resolución angular, hace referencia a la capacidad del sensor para observar una misma zona desde distintos ángulos (Chuvieco, 2008) (ver figura 3e).

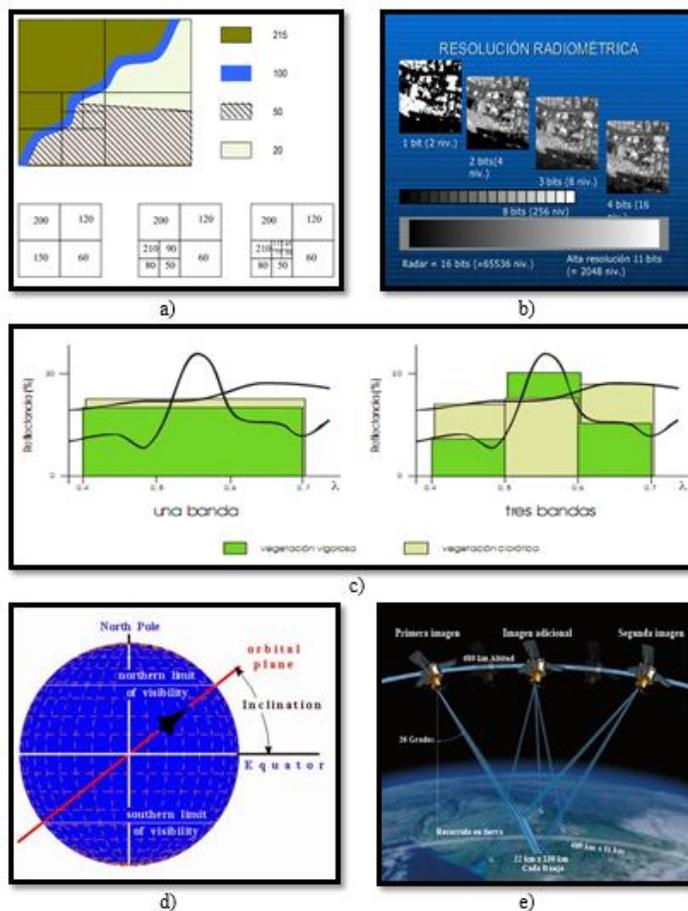


Figura 3. Resoluciones dentro de los sistemas sensores de Teledetección.

Fuente: Varios

Para una mayor comprensión la base de la teledetección es la espectroscopia, que se encarga de estudiar la interacción de la luz y la materia. La radiación electromagnética puede ser emitida o absorbida, en este sentido, el espectro sirve para identificar cualquier sustancia, mediante su longitud de onda, la frecuencia y la intensidad de radiación (Santos, 2018).

De esta manera, Chuvieco (2008) define al **espectro electromagnético** como el conjunto de longitudes de onda distribuidas y divididas en intervalos de frecuencias, que corresponde al flujo saliente de energía (ver figura 4).

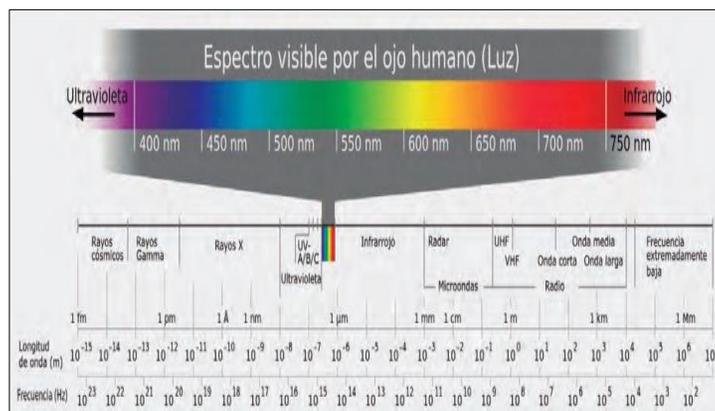


Figura 4. Espectro electromagnético.

Fuente: (Ramirez S. , 2015)

El espectro electromagnético comprende desde la radiación de menor longitud de onda (rayos gamma, rayos x), hasta las de mayor longitud de onda (ondas de radio). En la Tabla 2 se visualiza la división planteada por Ordiales (2007) y Chuvieco (2008), en donde se encuentra la segmentación espectral y sus valores de longitud de onda.

Tabla 2.

División del espectro electromagnético.

Tipo de radiación	Denominación	Longitud de onda (λ)
Radiación indirectamente ionizante	Rayos Gamma	< 10 pm
	Rayos X	10 pm – 10 nm
Luz Ultravioleta	Ultravioleta Extremo (UVC)	10 - 280 nm
	Ultravioleta Medio (UVB)	280 - 315 nm
	Ultravioleta Cercano (UVA)	315 - 400 nm
Luz visible	Luz visible	0,4 - 0,7 μ m
Luz Infrarroja	Infrarrojo Cercano	0,7 μ m - 1,3 μ m
	Infrarrojo Medio	1,3 μ m - 8 μ m
	Infrarrojo Lejano	8 μ m - 14 μ m
Microondas	Microondas	14 μ m - 30 cm
Radio	Ultra alta frecuencia de radio (UHF)	30cm - 1m
	Muy alta frecuencia de radio (VHF)	1m - 10m
	Radio de onda corta	10m - 180m
	Radio de onda media (AM)	180m - 650m
	Radio de onda larga	650m - 10Km
	Radio de onda muy larga	> 10Km

Fuente: (Ordiales, 2007); (Chuvieco, 2008)

Para el análisis del área foliar y la pigmentación de los cultivos, de esta forma se considera la luz o radiación visible y la luz infrarroja del espectro electromagnético. El ojo humano está adaptado para detectar las ondas electromagnéticas de la luz visible, estas longitudes de onda se encuentran entre los 400 nm (violeta) y 700 nm (rojo). La luz visible (vis) puede definirse como “cualquier radiación capaz de actuar sobre la retina del ojo humano y que causa una sensación visual” (Schröder Group, 2017). Esta porción del espectro electromagnético está conformada por tres bandas que corresponden a los colores azul (0,4 a 0,5 μm), rojo (0,6 a 0,7 μm) y verde (0,5 a 0,6 μm) (Núñez, 2013). Mientras tanto la luz o radiación infrarroja (ir) tiene una mayor longitud de onda que la luz visible, consecuentemente tiene una menor frecuencia, su rango oscila entre los 700nm hasta los 1000 micrómetros (García S. , 2010), la clasificación del infrarrojo según Frías (2014) con respecto a su longitud de onda es borde de rojo (700 - 800nm), infrarrojo cercano (800 - 2500nm), infrarrojo medio (2.5 - 50 μm) e infrarrojo lejano (50 - 1000 μm).

Para identificar y discriminar diferentes objetos de la naturaleza se utiliza la **Firma Espectral**, este patrón espectral se “construye” a partir de la señal registrada por los sensores remotos en las diferentes porciones del espectro electromagnético (Karszenbaum & Barraza, 2014).

Meer (2002) señala que la firma espectral de una planta muestra las características del comportamiento de la radiación electromagnética con la estructura de la planta (citado por Araque & Jiménez, 2009). Richards (2013), menciona que la firma espectral de la vegetación es muy compleja (ver figura 5); dentro del espectro visible la pigmentación de las hojas es el principal determinante de la curva. En la vegetación sana la absorción de clorofila se produce en la banda azul y roja, dejando un reflejo verde de importancia en el rango del visible. Este es el motivo por lo que se observan a los pigmentos de las hojas de dicho color (verde). Si la planta posee una

pigmentación diferente, la curva dentro del espectro visible será diferente. Si la vegetación muere, la acción de la clorofila desaparece y la reflectancia se produce especialmente en la banda roja, dando como resultado un tono amarillento en las hojas. En el segmento de la curva del infrarrojo cercano (0,7 y 1,3 μm) se hace referencia a la estructura celular de la planta, en este segmento se facilita la diferenciación entre especies. Dentro del infrarrojo medio se presenta la absorción del agua cerca de las bandas de 1,4, 1,9 y 2,7 μm , la reflectividad de las hojas es inversamente proporcional al contenido de agua.

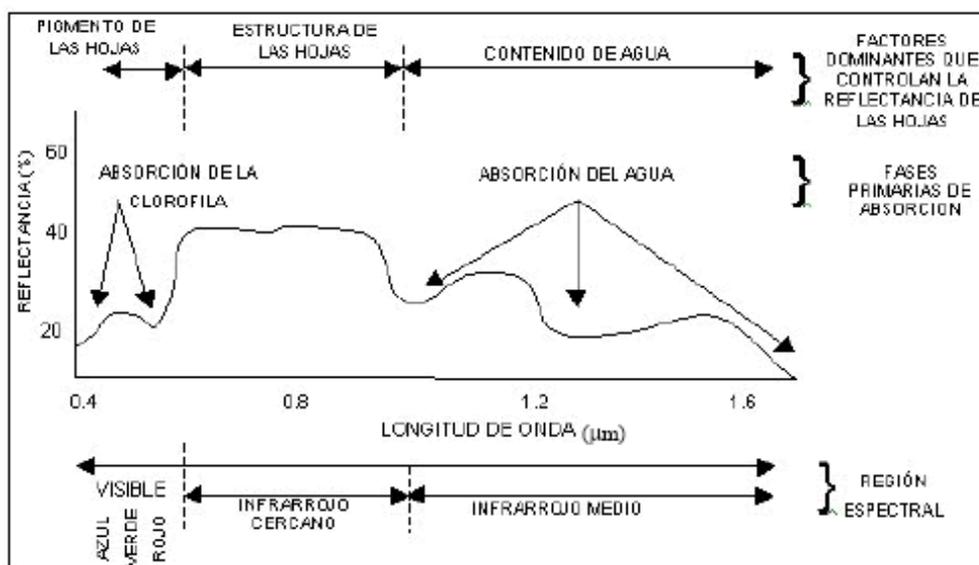


Figura 5. Firma espectral típica de la vegetación.

Fuente: (Gutierrez, Branch, & Botero, 2005)

La energía absorbida de la parte visible del espectro electromagnético es usada para sintetizar los componentes orgánicos que las plantas necesitan para mantenerse, los pigmentos como la clorofila y los carotenos absorben la luz de energía específica, causando transición de electrones entre la estructura molecular del pigmento. La energía resultante de estas transiciones es usada para las reacciones fotoquímicas de la planta (Meer & Jong, 2001). La Tabla 3 muestra los principales pigmentos encontrados en plantas grandes y su absorción máxima según (Meer & Jong, 2001).

Tabla 3.*Pigmentos de las plantas y su absorción máxima.*

Tipo de Pigmento	Características de Absorción Máxima (nm)
Clorofila a	420 (violeta), 490 (azul), 660 (rojo)
Clorofila b	435 (violeta), 464 (azul)
β – Caroteno	425 (violeta), 450 (azul), 480 (azul)
α – Caroteno	420 (violeta), 440 (violeta), 470 (azul)
Xantofila	425 (violeta), 450(azul), 475 (azul)

Fuente: (Meer & Jong, 2001)

Las medidas de reflectancia se emplean para la generación de **Índices de Vegetación (IV)**, que se utilizan para encontrar una correlación con características específicas de un cultivo (Serrano, Fábrega, Quirós, Sánchez-Galán, & Jiménez, 2017); estos índices son medidas cuantitativas, basadas en los valores digitales, que tienden a medir el contenido de clorofila y la biomasa o vigor vegetal. Usualmente el IV es una combinación de las bandas espectrales, siendo el producto de varios valores espectrales que son sumados, divididos, o multiplicados en una forma diseñada para producir un simple valor que indique la cantidad o vigor de vegetación dentro de un píxel. Permittiéndonos estimar y evaluar el estado de salud de la vegetación, en base a la medición de la radiación que las plantas emiten o reflejan (Díaz, 2015; Jhan, Rau, Haala, & Cramer, 2017). Los índices considerados dentro de la investigación son: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Transformed Normalized Difference Vegetation Index (TNDVI), Simple Ratio Red-Edge (SR-RE), Canopy Chlorophyll Index (CCI) y Normalized Difference Red-edge Index (NDRE) (Tabla 4).

Tabla 4.
Diferentes Índices de vegetación.

Índice de Vegetación	Acrónimo	Ecuación	Referencia
Normalized difference vegetation index	NDVI	$(R_{NIR} - R_{RED}) / (R_{NIR} + R_{RED})$ (1)	(Tucker, 1979)
Transformed Normalized Difference Vegetation Index	TNDVI	$[(NIR - R) / (NIR + R) + 0,5]^{1/2}$ (2)	
Simple ratio red-edge	SR-RE	$R_{NIR} / R_{RED-EDGE}$ (3)	(Gitelson & Merzlyak, 1994)
Normalized difference red-edge index	NDRE	$(R_{NIR} - R_{RED-EDGE}) / (R_{NIR} + R_{RED-EDGE})$ (4)	(Barnes et al., 2000)
Canopy Chlorophyll index	CCI	$D(R_{720}) / D(R_{700})$ (5)	(Sims et al., 2006)

**D es la primera derivada de la reflectancia*

El índice NDVI se basa principalmente en la diferencia entre la absorción máxima de la radiación en la región del espectro del Red (Rojo, 620 a 690 nm) y la reflectancia máxima del NIR (infrarrojo cercano, 760 a 900 nm) (Tucker, 1979). Es adimensional, y toma valores entre -1 a 1. Los valores positivos más altos corresponden a vegetación sana; las superficies sin vegetación como el agua, nieve o las nubes generalmente presentan valores negativos; cuando la vegetación está bajo estrés o el área hoja es pequeña, los valores son positivos, pero reducidos (Beck, Atzberger, Høgda, Johansen, & Skidmore, 2006; Basnyat, McConkey, Lafond, Moulin, & Pelcat, 2004). NDVI, es un indicador del estado de salud de la vegetación (Parrish et al., 2018), nos permite evaluar la biomasa del dosel y la cobertura verde de las plantas (Gamon et al., 1995; Goswami, Gamon, Vargas, & Tweedie 2015; Wang, Chen, Tang, Black, & Zhu 2018). Por otro lado, el índice TNDVI se deriva del NDVI, y se utiliza para evitar trabajar con valores negativos (Tucker, 1979).

Los índices SR-RE y NDRE, utilizan longitudes de onda dentro del espectro del NIR y Red Edge. Los índices que utilizan estas bandas tienen una relación marcada con el contenido de clorofila (Eitel et al., 2011; Cao et al., 2015; Sharma, Bu, Denton, & Franzen, 2015).

En el caso del índice CCI, se obtiene mediante la primera derivada de la reflectancia en las longitudes de onda 720 y 700 nm. El CCI está estrechamente relacionado con la posición del pico de la longitud de onda en una curva gaussiana ajustada a la primera derivada de la región del Red edge (Sims et al., 2006).

La **agricultura de precisión** (AP) es la aplicación de técnicas geoespaciales y sensores (sistemas de información geográfica, sensores remotos, sistemas de posicionamiento global) para identificar variaciones en el cultivo, con fin de optimizar recursos para reducir el potencial impacto ambiental negativo y aumentar la rentabilidad (Gebbers & Adamchuk, 2010; Zhang & Kovacs, 2012; Ferrández-Pastor, García-Chamizo, Nieto-Hidalgo, & Mora-Martínez, 2018).

Existen algunas variables que tienen influencia importante en la producción agrícola, como: la variabilidad del rendimiento, la variabilidad del campo, la variabilidad del suelo, la variabilidad del cultivo (densidad de dosel, presencia de estrés, contenido de clorofila, biomasa y calidad del grano), la variabilidad en factores anómalos, y la variabilidad de manejo (Zhang, Wang, & Wang, 2002).

Para gestionar esta variabilidad Zhang et al. (2002), presentan dos enfoques: el enfoque basado en mapas y el enfoque basado en sensores. En el enfoque basado en mapas emplean GPS, Fotogrametría y sensores remotos, para el monitoreo del cultivo.

El **GPS** (por sus siglas en inglés Global Positioning System – Sistema de Posicionamiento Global), es una tecnología que tiene la capacidad de determinar coordenadas geográficas (Latitud y longitud) y registrar la posición de interés de cualquier objeto en la superficie terrestre (Adamchuk, Hummel, Morgan, & Upadhyaya, 2004; Ncube, Mupangwa, & French, 2018). El **método de posicionamiento RTK** utiliza las correcciones diferenciales (DGPS) para determinar la ubicación espacial de los objetos dentro del campo utilizando la tecnología GPS. Este método basado en la cinemática en tiempo real, permite obtener precisiones horizontales de 1 cm. Dentro de las aplicaciones agrícolas se considera lo suficientemente preciso, permitiendo mantener un monitoreo en tiempo real del cultivo, obteniendo beneficios económicos y ambientales (Zhang Q., 2015)

Para la AP algunas de las aplicaciones potenciales del método RTK, consisten en el mapeo de semillas, aplicaciones foliares específicas, sanidad y manejo específico del cultivo y labranza mediante control mecánico (Reeder, 2002). Finalmente, la información de la ubicación de los cultivos puede ser representada mediante mapas, que al ser asociada mediante técnicas de teledetección se pueden obtener datos del color de la planta (verdor), que tienen un enfoque digital y un aspecto tecnológico para el control y monitoreo del cultivo que conlleva una mejor toma de decisión para su manejo (Ehsani, Upadhyaya, & Mattson, 2004).

La **fotogrametría** es la disciplina que se encarga de obtener características geométricas de los objetos que se encuentran dentro de una imagen mediante relaciones matemáticas y la visión estereoscópica del ser humano. Al obtener mediciones dentro de un fotograma y no sobre los objetos, esta técnica es considerada como una medición indirecta (Jauregui, 2012). La fotogrametría digital cuyo proceso empieza con la captura de la imagen dentro de la zona de estudio

y finaliza con la obtención de las coordenadas tridimensionales de dicha zona, estas coordenadas pueden generar sub productos como son planos cartográficos, ortofotos, modelos digitales de elevación entre otros (Quirós, 2014). Para la generación de ortofotos se necesita al menos la toma de dos o más fotogramas en formato digital, según la extensión de la zona de estudio se necesita colocar puntos de control con la finalidad de orientar el trabajo en un sistema de referencia y puntos de apoyo fotogramétrico para asegurar la calidad del producto final (Quirós, 2014).

El proceso fotogramétrico puede sintetizarse en cuatro pasos bien diferenciados. La orientación interna consiste en reconstrucción de la cámara o del haz perspectivo mediante la ayuda de los parámetros internos de la cámara, como la distancia focal y la altura de vuelo. La orientación relativa es la reconstrucción de la posición relativa del haz con respecto a otro, de esta forma se generan puntos homólogos entre las imágenes, que sirven de enlace para la generación del bloque fotogramétrico. Finalmente, la orientación absoluta que consiste en el posicionamiento y escalonado del bloque fotogramétrico, utilizando puntos de control terrestre (Sánchez, 2006).

Dentro del proceso fotogramétrico la aerotriangulación conlleva a reducir el número de puntos de apoyo tomados en campo, de esta forma optimizamos recursos reduciendo el coste de toma de datos. Al tener un par fotogramétrico perfectamente orientado, se puede transferir las coordenadas terreno de puntos al modelo siguiente, para no tener que tomarlos en campo, a esta metodología se la conoce como aerotriangulación por modelos independientes (Quirós, 2014).

En el caso del enfoque basado en sensores, se miden las propiedades del suelo y de la planta, mediante el empleo de sensores en tiempo real (espectroradiómetro, medidor de clorofila, UAV).

Los **UAVs** (por sus siglas en inglés Unmanned Aerial Vehicle – Vehículo Aéreo no Tripulado) se conocen como una aeronave no tripulada que puede ser manipulada por un control remoto o de manera autónoma sobre la base de los planes de vuelo programados. Están diseñados para cumplir diferentes misiones, desde el campo militar, seguridad y defensa a los de agricultura o medio ambiente (Mojica, Cuéllar, & Medina, 2015). Al momento de establecer una clasificación para los UAV podemos diferenciarlos por dos aspectos primordiales, la forma de despegue y su función. En el presente proyecto utilizamos un UAV de despegue vertical de ala rotatoria, la figura 6 presenta la clasificación correspondiente según (Barrientos et al., 2007).

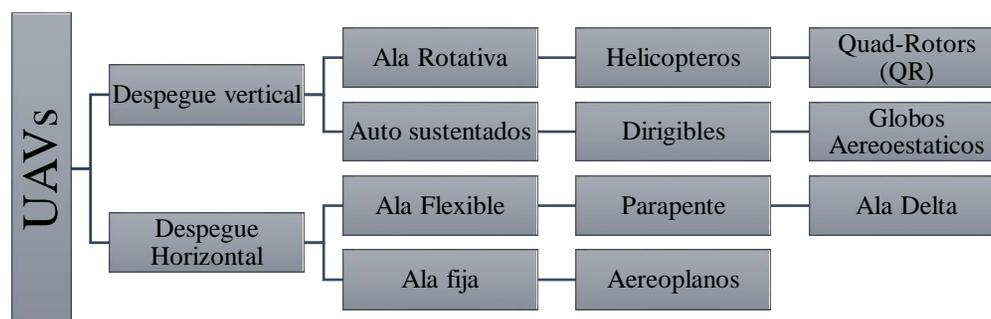


Figura 6. Clasificación de UAVs por despegue.

Fuente: (Barrientos et al., 2007)

En la actualidad, el uso de UAVs, como una herramienta para la AP, facilita la obtención de información en tiempo real del estado del cultivo, con una mayor resolución espacial que los satélites (debido a la menor altura de vuelo), y se puede implementar cámaras con sensores multiespectrales; lo que nos proporciona la obtención de imágenes con una mayor resolución temporal, espacial y espectral (Rango et al., 2006; Xiang & Tian, 2011; Honkavaara et al., 2013).

La incorporación de las nuevas tecnologías (UAV, sensores remotos, GPS) dentro de la agricultura, busca aumentar la rentabilidad en cultivos con gran importancia agronómica, como los

cultivos andinos, con especial énfasis en el cultivo del chocho. Por lo tanto, es indispensable considerar las **condiciones edafoclimáticas** de la zona de estudio. Las condiciones edafoclimáticas hacen referencia a la existencia de diferentes climas y tipos de suelo debido a la presencia de variaciones en la topografía, altura sobre el nivel del mar, vegetación, entre otras. El conocimiento de estas características busca un mejoramiento en los resultados de producción y crecimiento guardando como cualidad primordial la calidad de los productos (Solórzano, 2005; Ramirez, Basurto, & Pérez, 2011).

Estas variables pueden obtenerse mediante datos de información agropecuaria y climatológica, con la ayuda de sistemas de información geográfica, que permitan analizar, localizar y clasificar el área de estudio en zonas homogéneas que guarden condiciones similares. La figura 7 muestra las condiciones edafoclimáticas que tienen mayor relevancia para el desarrollo de proyectos de agricultura de precisión.

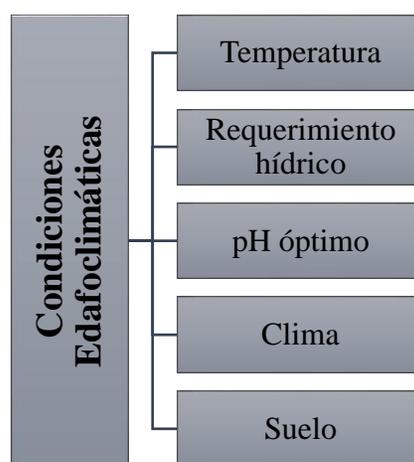


Figura 7. Condiciones Edafoclimáticas.

Fuente: (Arocha J, 2014)

El chocho (*Lupinus mutabilis Sweet*) es una leguminosa andina, que se adapta a diferentes tipos de suelo. La raíz es pivotante y robusta. Estas raíces pueden alcanzar una profundidad de hasta 2 m y el desarrollo se ve influenciado por la fertilización, el abastecimiento de agua, la textura del suelo y de las propiedades físicas y químicas del subsuelo (Caicedo & Peralta, 2001).

Los estados fenológicos del chocho son aquellas que determinan los diferentes estados vegetativos, es decir los cambios físicos y fisiológicos de la planta, desde la siembra hasta la cosecha. Según Gross (1982), citado por Rivadeneira (1999), son las siguientes (ver Tabla 5, ver figura 8):

Tabla 5.

Estados fenológicos del chocho.

	Estado Fenológico	Descripción
1	Emergencia	Cuando los cotiledones emergen del suelo.
2	Cotiledonar	Los cotiledones empiezan a abrirse en forma horizontal a ambos lados, aparecen los primeros folíolos enrollados en el eje central.
3	Desarrollo	Desde el apareamiento de hojas verdaderas hasta la presencia de inflorescencia (2 cm de longitud).
4	Floración	Iniciación de apertura de flores.
5	Reproductivo	Desde el inicio de la floración hasta la maduración completa de la vaina
6	Envainamiento	Formación de vainas (2 cm de longitud)
7	Cosecha	Maduración (grano seco).

Fuente: (Caicedo & Peralta, 2001)

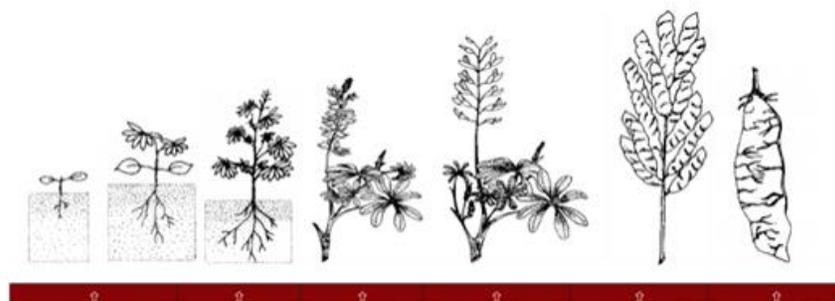


Figura 8. Estados fenológicos del cultivo de chocho.

Fuente: (Yzarra & López, 2012)

La susceptibilidad hacia las enfermedades limita el rendimiento del cultivo, la principal enfermedad que afecta al cultivo del chocho es la Antracnosis (*Colletotrichum spp*) que se transmite a través de la semilla a la planta, esta enfermedad se presenta en las hojas, tallos y vainas (Caicedo & Peralta, 2001).

Para evitar grandes pérdidas en los cultivos existen diversos tratamientos de desinfección de semillas, estos tratamientos son realizados con el fin de reducir la presencia de patógenos que ponen en riesgo el desarrollo fenológico de la planta, afectando directamente en la producción del cultivo (Colimba, 2018).

Existen varios tipos de **tratamientos de desinfección de semilla**, como: la radiación solar, el calor seco y tratamientos químicos (Vitavax).

La radiación solar es un proceso natural hidrotérmico muy eficiente y rentable para los productores (Jarrín, 2014), el proceso abarca una estufa solar donde la semilla presenta cambios físicos, químicos y biológicos asociados con la variación de la temperatura y es considerado como una alternativa al uso de ciertos productos químicos para la agricultura (FHIA, 2007). La aplicación de la estufa solar considera únicamente una larga exposición a la luz solar (Alcubierre, 2015). Según estudios realizados por Terán (2016) considera este tratamiento efectivo para el control de organismos patológicos en períodos suficientes para elevar la temperatura hasta 40 – 60 °C.

El tratamiento por calor seco que según estudios realizados por Falconí y Yáñez, (2016), reduce la presencia de patógenos al ser expuesto durante 8 y 12 horas a una temperatura de 65°C y acelera la emergencia de las plántulas, mientras que, con un tiempo de 24, 48 y 96 horas la infección es

indetectable y la germinación disminuye, finalmente si las semillas son tratadas durante 1,2 y 4 horas la germinación no se ve afectada y el patógeno sigue presente en la semilla.

Para los tratamientos mediante una desinfección, se considera al Vitavax, que es un desinfectante químico resultado de la mezcla de un fungicida sistémico (carboxin) y un fungicida protectante (captan) que controla y previene el desarrollo de enfermedades causadas por hongos que atacan las semillas (granos y material vegetativo) y plántulas (Agro Solutions, 2016). Se recomienda aplicar una dosis de 1 a 2 g kg⁻¹ de semilla al cultivo (Caicedo & Peralta, 2001).

Para la planificación de un experimento, en donde se recaben datos apropiados que puedan analizarse mediante diferentes métodos estadísticos para obtener conclusiones válidas y objetivas, es necesario realizar un **diseño experimental** (Montgomery, 2017). Estos diseños tienen por finalidad determinar si existe una diferencia significativa entre los diferentes tratamientos del experimento (Badii, Castillo, Rodríguez, Wong, & Villalpando, 2007).

Para entender de mejor manera el diseño experimental es necesario definir ciertos términos (Granados, 2003; Badii et al., 2007; Gutiérrez & De la Vara, 2012; Condo & Pazmiño, 2015):

- **Experimento:** procedimiento que permite comprobar una hipótesis.
- **Unidad experimental (UE):** elemento sobre el cual se modificarán distintos factores para registrar su respuesta.
- **Tratamiento (T):** condición específica aplicada a la unidad experimental.
- **Testigo (Control):** Tratamiento estándar se utiliza para comparar con los diversos tratamientos.
- **Repetición (R):** número de veces que aparece un tratamiento.

- **Bloque (B):** conjunto de unidades experimentales.
- **Error aleatorio (ϵ):** variabilidad natural del proceso.

Las diferencias entre los diseños experimentales se establecen en la forma de agrupar o clasificar las unidades experimentales, en la mayoría de experimentos, se agrupan por tratamientos, pero existe la posibilidad de clasificar a las unidades experimentales en bloques, filas, parcelas principales y otras modalidades. Por tal razón, los diseños experimentales se pueden clasificar en: diseños factoriales, diseño completamente aleatorio, diseños de bloques completos e incompletos y diseño de parcelas y bloques divididos, entre otros (Badii et al., 2007), para el presente estudio se utilizó el Diseño completamente aleatorio o al azar (DCA).

El **DCA** es uno de los diseños más sencillos que se utilizan para comparar dos o más tratamientos. Este tipo de diseño presenta varias ventajas como: una flexibilidad completa para el número de tratamientos y repeticiones, una mayor precisión para la estimación el error estándar por unidad experimental y el análisis estadístico resulta más fácil (Badii et al., 2007; Gutiérrez & De la Vara, 2012).

El modelo estadístico lineal del DCA está dado por (5):

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij} \quad (6)$$

$$i = 1, 2, \dots, k \quad j = 1, 2, \dots, n_i$$

Donde Y_{ij} representa la observación j -ésima del i -ésimo tratamiento, μ es la media global o poblacional, τ_i es un parámetro que mide el efecto del tratamiento i y ϵ_{ij} es el error de la medición Y_{ij} . Este modelo indica que en el DCA actúan dos fuentes de variabilidad: los tratamientos y el error aleatorio (Gutiérrez & De la Vara, 2012).

El **análisis de varianza (ADEVA)** es el análisis fundamental para los datos experimentales, tiene la finalidad de separar la variación total en las partes con las que contribuye cada fuente de variación en el experimento. Para el DCA, se separan la variabilidad por los tratamientos y la variabilidad del error. Cuando la variabilidad por los tratamientos es mayor que la del error, se concluye que los tratamientos tienen efecto (ver figura 9).

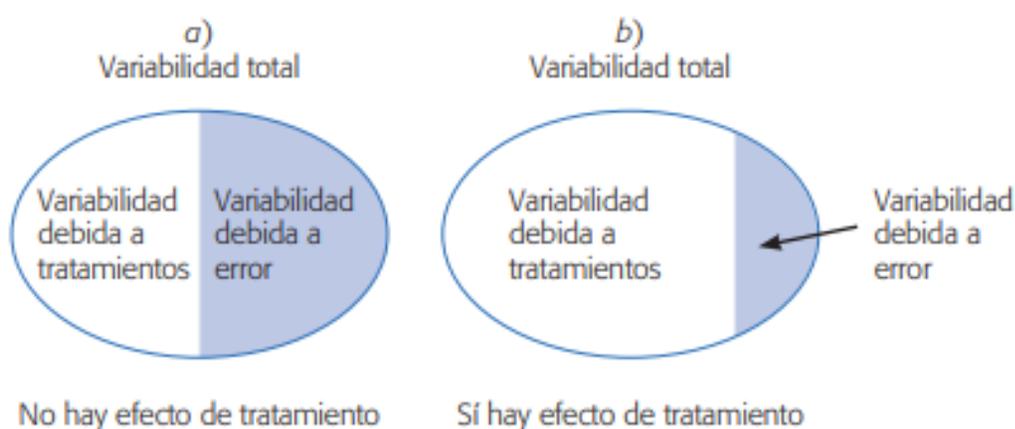


Figura 9. Variación total de los componentes del DCA

Fuente: (Gutiérrez & De la Vara, 2012)

Para tomar la decisión estadística de significancia o no significancia entre medias de tratamientos se determinará una prueba F. En todos los diseños, se define, primero el cálculo de la suma de cuadrados para el total, luego de los tratamientos y del error, y después los grados de libertad, cuadrados medios y valores Fisher (Condo & Pazmiño, 2015).

Por lo tanto, estas expresiones matemáticas se definen por varios autores en la Tabla 6 (Badii et al., 2007; Gutiérrez & De la Vara, 2012; Condo y Pazmiño, 2015):

Tabla 6.
Componentes de la ADEVA para un DCA.

Fuentes de Variación (FV)	Suma de cuadrados (SC)	Grados de libertad (gl)	Cuadrados Medios (CM)	Factor de corrección (F ₀)	ρ-valor
Tratamientos	$SC_{TRAT} = \sum_{i=1}^k n_i (\bar{Y}_i - \bar{Y}_{..})^2$ (7)	$k - 1$	$CM_{TRAT} = \frac{SC_{TRAT}}{gl_{TRAT}}$ (10)	$\frac{FC = CM_{TRAT}}{CM_E}$ (12)	$F > FC$
Error	$SC_E = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2$ (8)	$N - k$	$CM_E = \frac{SC_E}{gl_E}$ (11)		
Total	$SC_{TOTAL} = SC_{TRAT} + SC_E$ (9)	$N - 1$			

* \bar{Y}_i : Media de las observaciones del i -ésimo tratamiento; $\bar{Y}_{..}$: Media global o promedio de todas las observaciones; $N = \sum_{i=1}^k n_i$ observaciones.

Después de aplicar un Análisis de Varianza (ADEVA), y se presentan diferencias significativas; se aplican diferentes pruebas estadísticas. Una de ellas es LSD Fisher, esta prueba utiliza pares de medias, para encontrar diferencias mínimas significativas, dado que analiza dos medias muestrales para considerar que los tratamientos correspondientes son significativamente diferentes. Es un método de comparación múltiple basado en la distribución T, tiene una (potencia importante, por lo que en ocasiones declara significativas aun a pequeñas diferencias medias muestrales).

$$|\bar{Y}_i - \bar{Y}_j| > t_{\frac{\alpha}{2}, N-k} \sqrt{CM_E \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)} = LSD \quad (13)$$

En donde: $|\bar{Y}_i - \bar{Y}_j|$ representa la diferencia absoluta de dos medias muestrales, el valor de $t_{\alpha/2, N-k}$ se lee en las tablas de la distribución T de Student con $N - k$ grados de libertad que corresponden al error, el CME representa el error medio cuadrado obtenido del análisis ADEVA, n_i y n_j son el número de observaciones para los tratamientos i y j , respectivamente.

CAPITULO III

METODOLOGÍA

El proyecto de forma general presentó dos metodologías: experimental, que consiste en el levantamiento de información en campo mediante herramientas de teledetección y nuevas tecnologías dentro de la agricultura; y comparativo, donde se comparó los diferentes índices de vegetación planteados, el contenido de clorofila y la respuesta espectral que presenta el cultivo obtenido de un sensor de lente modificada aerotransportado con los efectos de los tratamientos de desinfección de semillas durante el ciclo vegetativo del cultivo.

En la figura 10 se muestra la metodología general del presente proyecto.

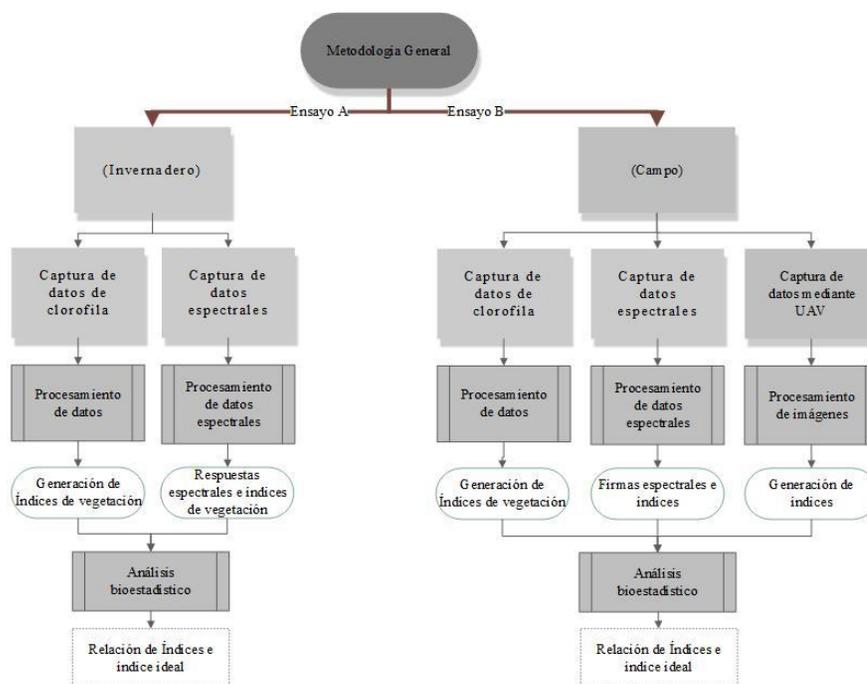


Figura 10. Esquema de la metodología general.

La investigación contempló dos ensayos, el ensayo A, se desarrolló dentro de un invernadero, y el ensayo B, se ejecutó en campo con una extensión aproximada de 150 m² ubicada dentro de la Hacienda el Prado. En ambos ensayos se levantó información radiométrica para la generación de índices de vegetación mediante un espectro radiométrico, se estableció un FOV (Field at View) a utilizar (8°); el contenido de clorofila se obtuvo por el equipo Opti-sciences CCM-200 plus. En el ensayo B, adicionalmente, se empleó un sensor de lente modificada aerotransportado (lente 3.97 mm (NIR red + NIR)) para la generación de índices de vegetación (NDVI). Se procesó bioestadísticamente la información obtenida en ambos ensayos, con la finalidad de analizar el comportamiento espectral de chocho por la aplicación de tratamientos de desinfección de semilla.

Dentro de la parte agronómica (manejo, control y cuidado del cultivo) se utilizó el diseño experimental, en donde se aplicó un DCA con tres repeticiones (R1, R2, R3) para cada tratamiento, dos variedades de chocho por cada ensayo, I-450 Andino y F3 (Ecu 2658 X Ecu 8415), Localidad (Tesis de la señorita Katty Bracho para el ensayo A y tesis de la señorita Mayra Loor para el ensayo B, estudiantes de la Carrera de Ingeniería Agropecuaria ESPE-IASA). Para el desarrollo de la presente investigación se analizó estadísticamente una variedad de chocho I-450 Andino.

3.1 Tamaño de la muestra

El número de observaciones (plantas) por tratamiento se selecciona en base en la variabilidad que se pretende obtener en los datos, se recomienda entre 5 y 30 observaciones por tratamiento (Gutiérrez & De la Vara, 2012). Por lo tanto, para el tamaño de la muestra se seleccionó 10 plantas aleatoriamente por unidad experimental, con un total de 30 plantas por tratamiento, que fueron marcadas para su posterior captura periódicamente.

3.2 Planificación de muestreo

Para la planificación de muestreo, se consideró el ciclo vegetativo del cultivo de chocho, se determinó un periodo de 15 a 20 días para cada muestreo a partir del estado fenológico cotiledonar, contemplando un total de 6 muestreos por ensayo. En la Tabla 7 se detalla los muestreos realizados para los dos ensayos, expresados en dds (días después de la siembra).

Tabla 7.

Planificación de muestreo según el ciclo vegetativo para datos espectrales.

		Muestreo	Estado Fenológico	Ensayo A	Ensayo B
Fecha de Siembra				20 de junio de 2018	5 de junio de 2018
Días después de la siembra (dds)	Primer muestreo	2	Cotiledonar	37	34
	Segundo muestreo	3	Desarrollo	54*	52*
	Tercer muestreo	4	vegetativo	70	69
	Cuarto muestreo	5	Floración	85*	85*
	Quinto muestreo	6	Reproductivo	103	100
	Sexto muestreo	7	Envainamiento	118*	117*
Fin de muestreo				01 de octubre de 2018	15 de octubre de 2018

**Los dds son los muestreos de contenido de clorofila.*

3.3 Materiales y equipos

Se utilizaron los siguientes materiales y equipos para el levantamiento de información y su posterior procesamiento, dentro de los dos ensayos (ver Tabla 8):

Tabla 8.
Materiales y equipos.

No.	Equipo	Descripción
Levantamiento de información		
1	Espectroradiómetro	ASD FieldSpec 4 Hi-Res
2	Medidor de clorofila	Opti-sciences CCM-200 Plus
Continúa =>		
3	UAV	DJI Phantom 4
4	Kernel Filter	Filtro para la Cámara
5	Tarjeta de calibración	MAPIR Calibration Ground Target Package (V1)
6	GPS de precisión	Trimble R8
7	Celular móvil	Iphone 6s
Procesamiento de información		
8	RS ³	Software de análisis y adquisición de datos de detección remota
9	ViewSpec Pro	Software para el post-procesamiento de datos espectrales
10	Trimble Business Center	Software para el procesamiento de datos GNSS de alta precisión
11	Pix4D – Capture	Aplicación IOS para la planificación y captura de imágenes
12	Agisoft PhotoScan	Software independiente para procesamiento fotogramétrico
13	QGIS	Software de código libre de un SIG
14	ArcGIS	Software comercial de SIG
15	InfoStat	Software para análisis estadístico
16	Mapir Camera Control	Aplicación para la calibración de imágenes de UAV

3.4 Ensayo A - Invernadero

El ensayo A se desarrolló en un invernadero con condiciones semi-controladas, el terreno posee características uniformes, una pendiente menor al 3% y un sistema de riego por goteo.

3.4.1 Diseño experimental para el ensayo A

La distribución de las parcelas de estudio (ver figura 11) consta de dos bloques de 12 unidades experimentales (24 unidades en total), cada unidad experimental posee un área aproximadamente de 5 m². Las parcelas sombreadas en la figura 11 corresponden a la variedad estudiada con un total de 12 unidades experimentales.

Bloque 1	Bloque 2
T1 R1	T4 R2
T7 R3	T7 R1
T2 R1	T3 R1
T5 R3	T8 R2
T3 R2	T4 R3
T6 R1	T1 R2
T8 R1	T5 R1
T4 R1	T3 R3
T1 R3	T6 R3
T8 R3	T2 R2
T6 R2	T5 R2
T2 R3	T7 R2

Figura 11. Distribución de las parcelas de estudio para el ensayo A.
Fuente: Autores

Los tratamientos de desinfección de semilla aplicados (ver Tabla 9) se basan en una desinfección por calor seco en los tiempos de 45 y 60 min a 80°C, y una desinfección química.

Tabla 9.

Tratamientos de desinfección de semilla por calor seco.

Tratamiento	Tiempo (minutos)	Descripción	Nomenclatura
T1	45	Calor Seco	45min_CS
T2	60	Calor Seco	60min_CS
T3	Vitavax	Sin exposición	Vitavax
T4	0	Testigo	Testigo

3.4.2 Metodología para la captura general de datos espectrales o radiométricos

3.4.2.1 Captura de datos espectrales o radiométricos

La captura de los datos espectrales se realizó en el software RS3, mediante el espectroradiómetro ASD FieldSpec 4 Hi – Res, este equipo registra información en un rango espectral de 350 a 2500 nm. Se procedió al montaje y calibración del equipo mediante el blanco (ver figura 12).



Figura 12. Calibración y montaje del espectroradiómetro.

En cada unidad experimental se tomaron 10 datos espectrales con 5 repeticiones y un FOV de 8° a una altura promedio (h) de 10 cm sobre el dosel de cada planta (ver Figura 13).

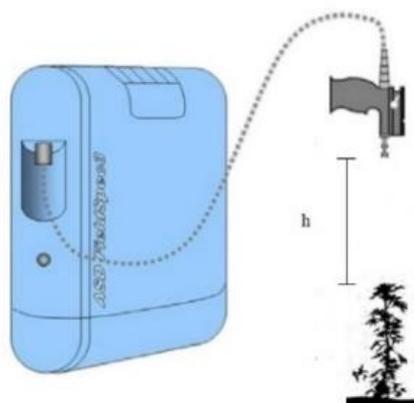


Figura 13. Captura de datos espectrales para cada planta.

3.4.2.2 Procesamiento de datos espectrales o radiométricos

Por defecto, se generan archivos .asd para cada muestra, para el procesamiento de la información se utilizó el software ViewSpec Pro. Se obtuvieron archivos con un rango de valores promedio de reflectancia y su primera derivada por planta en formato .txt, se armaron bases de datos en formato .xlsx de acuerdo a los tratamientos y las repeticiones. Estos archivos contienen en la primera columna la longitud de onda (Wavelength) de 350 a 2500 nm, y en las siguientes columnas el valor correspondiente de reflectancia y su primera derivada (ver figura 14).

The image shows a screenshot of an Excel spreadsheet. The main data area is divided into two sections: 'VALORES DE REFLECTANCIA' and 'DERIVADA DE LA REFLECTANCIA'. The 'VALORES DE REFLECTANCIA' section has columns for Wavelength (A) and multiple reflectance values (B-W). The 'DERIVADA DE LA REFLECTANCIA' section has columns for the first derivative of reflectance (M-W). The spreadsheet contains numerical data for various wavelengths, with values ranging from approximately 0.0000 to 0.1000 for reflectance and -3.20E-05 to 1.52E-04 for the derivative.

Figura 14. Base de datos en formato .xlsx de valores de reflectancia y primera derivada.

3.4.2.3 Generación de Índices de Vegetación

Para la generación de los índices de vegetación se utilizaron las ecuaciones (ver Tabla 4. Capítulo II) con los valores promedio de los rangos Min y Max de las pseudo bandas del sensor multispectral Parrot Sequoia (ver Tabla 10), y para el índice CCI se utilizó el valor de reflectancia en las longitudes de 720 y 700 nm.

Tabla 10.*Pseudo bandas del sensor multispectral Parrot Sequoia.*

Bandas	Tamaño del pixel (m)	Centro de banda (nm)	Ancho de banda (nm)	Min	Max
Verde	10	550	40	530	570
Rojo	10	660	40	640	680
Borde Rojo	10	735	10	730	740
Infrarrojo cercano	10	790	40	770	810

Fuente: (Parrot, 2018)

Posteriormente, se generaron los índices NDVI, TNDVI, SR-RE, CCI y NDRE por cada planta muestreada. Los valores obtenidos se trataron estadísticamente mediante un análisis exploratorio empleando el diagrama de caja para evidenciar valores atípicos (Williamson, Parker, & Kendrick, 1989; Chandrasegar Thirumalai & Balaji, 2017). Finalmente, se obtuvo un valor promedio de índice por cada repetición en los diferentes tratamientos (Anexo 01).

3.4.2.4 Análisis estadístico de los valores de índices de vegetación

Para el análisis estadístico, se utilizó el software InfoStat, en el cual se realizó un Análisis de Varianza (ADEVA), previo a la organización de los datos.

Se plantearon pruebas de hipótesis y para comprobarlas se consideró el estadístico ρ -valor, en donde si este valor ρ es menor o igual a 0,05 (nivel de significancia de 5%) se acepta la hipótesis alternativa y si el valor ρ es mayor a 0,05 se considera que la prueba no tiene significancia estadística y se acepta la hipótesis nula.

$$\begin{cases} H_0 = \rho > 0,05 \\ H_1 = \rho \leq 0,05 \end{cases}$$

Una vez aceptada la hipótesis alternativa, se utilizó una prueba de Fisher LSD al 5%, para comparar las medias y encontrar diferencias significativas para los tratamientos de desinfección de semilla y la caracterización espectral del cultivo por índices de vegetación.

Índices de vegetación para tratamientos de desinfección de semilla.

Para el ADEVA se planteó la siguiente prueba de hipótesis:

H₀: Los índices de vegetación no son eficientes para identificar características asociadas al tratamiento de desinfección de semillas en el cultivo de chocho.

H₁: Los índices de vegetación son eficientes para identificar características asociadas al tratamiento de desinfección de semillas en el cultivo de chocho.

Índices de vegetación para los estados fenológicos del cultivo de chocho

Para el ADEVA se planteó la siguiente prueba de hipótesis:

H₀: Los índices de vegetación no son eficientes para caracterizar espectralmente el cultivo de chocho durante su desarrollo fenológico.

H₁: Los índices de vegetación son eficientes para caracterizar espectralmente el cultivo de chocho durante su desarrollo fenológico.

Los resultados de las respuestas espectrales se presentan en el apartado 4.1.1 en el capítulo IV.

3.4.3 Metodología para la captura general de contenido de clorofila

Para calcular los valores de contenido de clorofila se utilizó el equipo Opti-sciences CCM-200 Plus. Se relacionó el tamaño de la hoja de la planta de chocho con el área efectiva de muestreo del equipo.

Se establecieron tres muestreos para el ensayo A, como se establece en Tabla 7.

3.4.3.1 Captura de datos de contenido de clorofila

Se midió el contenido de clorofila de cada foliolo (si el tamaño del foliolo es mayor al área efectiva de muestreo del equipo) de una hoja por cada planta de chocho (ver figura 15), y se registró la información en una base de datos (ver Anexo 02).



Figura 15. Captura de contenido de clorofila por hoja de chocho.

3.4.3.2 Procesamiento de los datos de contenido de clorofila

Los valores obtenidos se trataron estadísticamente mediante un análisis exploratorio empleando el diagrama de caja para evidenciar valores atípicos (Williamson, Parker, & Kendrick, 1989; Chandrasegar Thirumalai & Balaji, 2017). Finalmente, se obtuvo un valor promedio de índice por cada repetición en los diferentes tratamientos

Los resultados del contenido de clorofila se evidencian en el apartado 4.1.2 del capítulo IV.

3.4.3.3 Análisis estadístico del contenido de clorofila

Para el análisis estadístico del contenido de clorofila se utilizó la metodología detallada en el apartado 3.4.2.4., y se plantearon las siguientes hipótesis.

Contenido de clorofila para tratamientos de desinfección de semilla.

Para el ADEVA se planteó la siguiente prueba de hipótesis:

H₀: Los resultados del equipo de medidor de clorofila no son eficientes para identificar características asociadas al tratamiento de desinfección de semillas en el cultivo de chocho.

H₁: Los resultados del equipo de medidor de clorofila son eficientes para identificar características asociadas al tratamiento de desinfección de semillas en el cultivo de chocho.

Contenido de clorofila para estados fenológicos del cultivo

Para el ADEVA se planteó la siguiente prueba de hipótesis:

H₀: Los resultados del equipo de medidor de clorofila no son eficientes para caracterizar espectralmente el cultivo de chocho durante su desarrollo fenológico.

H₁: Los resultados del equipo de medidor de clorofila son eficientes para caracterizar espectralmente el cultivo de chocho durante su desarrollo fenológico.

3.5 Ensayo B - Campo

Para el ensayo B, se consideró un terreno de características uniformes, con una pendiente menor al 3% y que disponga de riego mediante aspersión.

3.5.1 Diseño experimental para el ensayo B

La distribución de las parcelas de estudio (ver figura 16) consta de tres bloques de 12 unidades experimentales (36 unidades en total), cada unidad experimental posee un área aproximadamente de 4 m². Las parcelas sombreadas en la figura 16 corresponden a la variedad estudiada con un total de 18 unidades experimentales.

Bloque 1 R3	Bloque 2 R2	Bloque 3 R1
T1	T2	T5
T12	T7	T10
T3	T4	T12
T9	T8	T6
T10	T5	T1
T2	T12	T11
T8	T9	T4
T5	T1	T7
T7	T6	T2
T11	T10	T3
T6	T3	T9
T4	T11	T8

Figura 16. Distribución de las parcelas de estudio para el ensayo B.

Fuente: Autores

Los tratamientos de desinfección de semilla aplicados se basan en una desinfección por radiación solar: ambiente y bajo estufa casera en los tiempos de 30 y 45 min, y una desinfección química. Los tratamientos para este estudio fueron estandarizados como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11.*Tratamientos de desinfección de semilla por radiación solar.*

Tratamiento original	Estandarización Tratamiento	Tiempo (minutos)	Descripción	Nomenclatura
T1	T1	30	Estufa	30min_est
T2	T2	45	Estufa	45min_est
T3	T3	30	Ambiente	30min_amb
T4	T4	45	Ambiente	45min_amb
T9	T5	0	Testigo	Testigo
T11	T6	Vitavax	Sin exposición	Vitavax

Dentro del ensayo B, se emplearon tres metodologías: la Metodología para la captura general de datos espectrales o radiométricos, mencionada en el numeral 3.4.2., la Metodología para la captura general de contenido de clorofila que se detalla en el numeral 3.4.3. y adicionalmente se desarrolló la Metodología para la captura general de imágenes aéreas mediante UAV.

Los resultados de la captura de datos espectrales y contenido de clorofila se presentan en los apartados 4.2.1 y 4.2.2, respectivamente.

3.5.2 Metodología para la captura general de imágenes aéreas mediante UAV

3.5.2.1 Planificación de vuelo

Se realizaron 6 vuelos mediante un UAV DJI Phantom 4 con una lente modificada (3.97 mm (NIR red + NIR)), dentro de la zona de estudio correspondiente al ensayo B, a partir del segundo estado fenológico Cotiledonar (ver Tabla 12).

Tabla 12.*Planificación de la captura de imágenes aéreas mediante UAV.*

Vuelo	Estado Fenológico	Días después de la siembra (dds)
Primer vuelo	Cotiledonar	17
Segundo vuelo	Desarrollo	34
Tercer vuelo	vegetativo	52
Cuarto vuelo	Floración	69
Quinto vuelo	Reproductivo	85
Sexto vuelo	Envainamiento	100

3.5.2.2 Parámetros de vuelo

Los parámetros de vuelo proporcionan información para la ejecución del vuelo. Estos parámetros establecen el tiempo de vuelo, los traslapes longitudinal y transversal, la altura de vuelo, tomando en consideración el área total del terreno. Para la obtención de los parámetros de vuelo (ver Tabla 13) se utilizó la aplicación Pix4D Capture.

Tabla 13.*Parámetros de vuelo para el Phantom 4.*

Parámetros de vuelo	Unidad
Tiempo de vuelo	4 min 43 s
Traslapo Longitudinal	86 %
Traslapo Transversal	86 %
Altura de vuelo	30 m
Área total del terreno	58 m x 85 m

3.5.2.3 Puntos de apoyo fotogramétrico

Se establecieron cuatro puntos de control distribuidos uniformemente alrededor del área de estudio (ver figura 17), para generar posteriormente el ortomosaico. Los puntos de control fueron materializados con hitos cilíndricos de hormigón de una altura de 30 cm y un diámetro de 10 cm.



Figura 17. Distribución de los puntos de control en la zona de estudio.

Rastreo GNSS

El rastreo de los puntos de control se realizó el 13 de agosto de 2018, que corresponde al día y semana GPS 225 y 2014, respectivamente. Para el posicionamiento de los puntos se utilizó la red de monitoreo continuo del Ecuador (REGME) utilizando la estación EPEC, que se encuentra en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Para el rastreo GNSS se utilizó la receptora: Trimble R8 (L1/L2), se empleó el método estático con un tiempo de rastreo de 1 hora, con un intervalo de 5 segundos.

Procesamiento de los puntos de apoyo fotogramétrico

Para el procesamiento de los puntos de apoyo fotogramétrico se utilizó el software Trimble Business Center; los puntos de control fueron enlazados al marco de referencia ITRF 2014 y se generaron sus respectivas monografías (ver Anexo 03), las coordenadas y precisiones obtenidas se detallan en la Tabla 14:

Tabla 14.*Coordenadas procesadas de los puntos de apoyo fotogramétrico.*

Punto	Este (m)	Norte (m)	Altura Elipsoidal (m)	Precisión Horizontal (m)	Precisión Vertical (m)
Punto 01	787798,776	9957562,946	2738,270	± 0,020	± 0,055
Punto 02	787776,418	9957540,486	2738,144	± 0,009	± 0,018
Punto 03	787823,229	9957486,143	2740,709	± 0,015	± 0,102
Punto 04	787782,549	9957490,549	2739,757	± 0,007	± 0,043

3.5.2.4 Ejecución del vuelo

Para la ejecución de vuelo, se colocaron las marcas de una superficie de 1 m² en cada punto de apoyo fotogramétrico (ver figura 18).

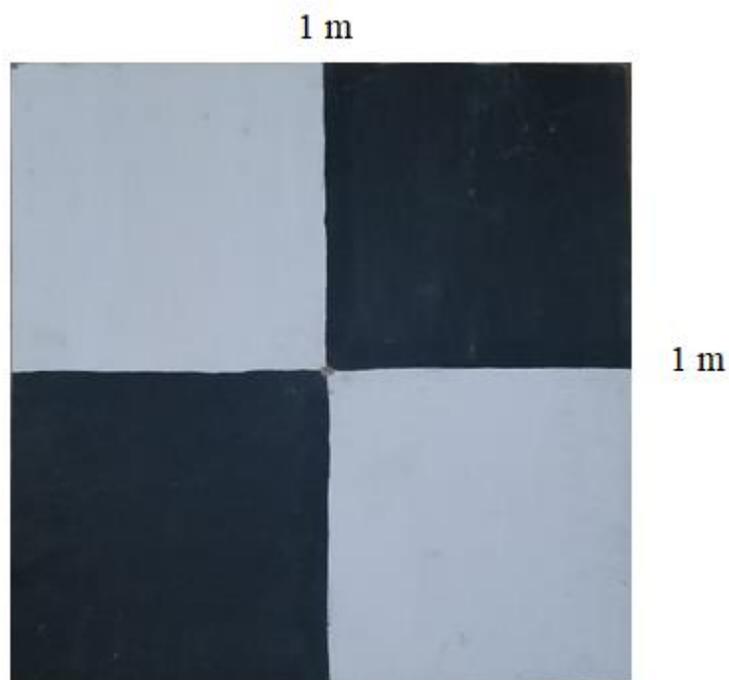


Figura 18. Dimensiones de las marcas para puntos de apoyo fotogramétrico.

Posterior, mediante los parámetros de vuelo obtenidos (ver Tabla 13), se realizó una visualización en la aplicación Pix4D Capture (ver figura 19) que posee una interfaz de imágenes satelitales obtenidas de OpenStreetMap.

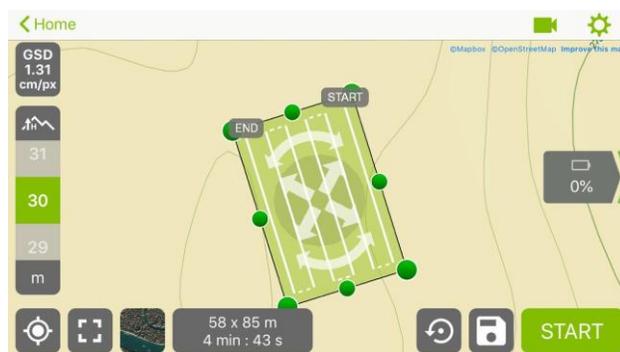


Figura 19. Visualización de vuelo en la aplicación Pix4D Capture.

Finalmente, se procedió a la captura de las imágenes aéreas e imágenes de la tarjeta de calibración MAPIR Calibration Ground Target Package (V1).

3.5.2.5 Descarga de la información

Las imágenes obtenidas se graban en la tarjeta SD de la cámara incorporada en el UAV junto con su archivo IMU, para transferir las imágenes se copió la carpeta generada para su posterior tratamiento software de procesamiento fotogramétrico.

3.5.2.6 Proceso Fotogramétrico

Se empleó el software Agisoft PhotoScan con su versión 1.2.5 para el procesamiento de las imágenes aéreas generadas por el UAV (ver Anexo 04). Se procedió a la georreferenciación de las imágenes, utilizando los puntos de control de la Tabla 14, que permiten obtener una mayor precisión para el ortomosaico a generar. En la figura 20, se presenta de forma general el proceso fotogramétrico.

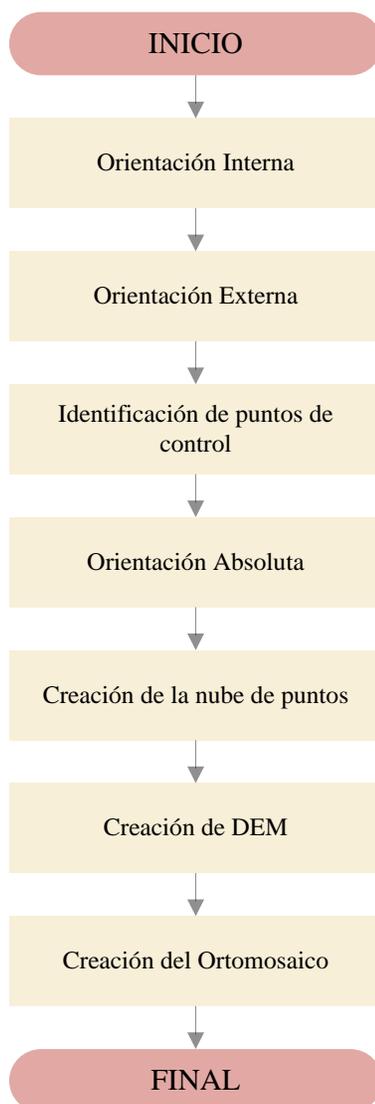


Figura 20. Diagrama de flujo para el proceso fotogramétrico.

Los ortomosaicos generados para los 6 vuelos, se encuentran en el Anexo 05.

3.5.2.7 Generación de Índices de Vegetación para imágenes obtenidas por el UAV

Para encontrar una correlación entre la información generada por el UAV y el muestreo por espectroradiómetro, se calculó el tamaño del pixel que se obtuvieron en ambos procesos (ver Anexo 06).

Se generaron los índices de vegetación $NDVI_E$ (NDVI para los datos por espectrorradiómetro) y índice $NDVI_U$ (NDVI para el UAV con lente modificado). En el caso del $NDVI_E$, se utilizó la metodología detallada en el numeral 3.4.2., con la modificación en los valores de reflectancia en las longitudes de onda del infrarrojo cercano y el rojo, 850 y 660 nm, respectivamente.

Para la generación del $NDVI_U$ se consideraron tres etapas: calibración de los ortomosaicos y cálculo del $NDVI_U$, georreferenciación de las plantas y extracción de valores de $NDVI_U$ por planta.

Calibración de los ortomosaicos y cálculo del $NDVI_U$

Para los ortomosaicos generados, se procedió a la calibración mediante tarjeta de calibración MAPIR Calibration Ground Target Package (V1), en la aplicación Mapir Camera Control (ver figura 21).

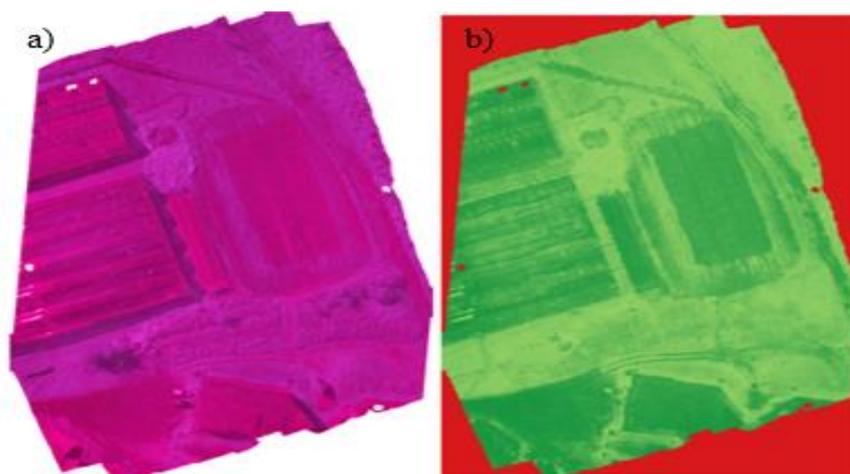


Figura 21. Visualización de los ortomosaicos generados:
a) Ortomosaico sin calibración; b) Ortomosaico calibrado en la aplicación Mapir Camera Control.

A continuación, se procedió al cálculo del NDVI_U, mediante la herramienta “calculadora Ráster” en el software Qgis 2.18.16 (ver figura 22), se utilizó la ecuación para NDVI (detallada en la Tabla 4, en el capítulo II).

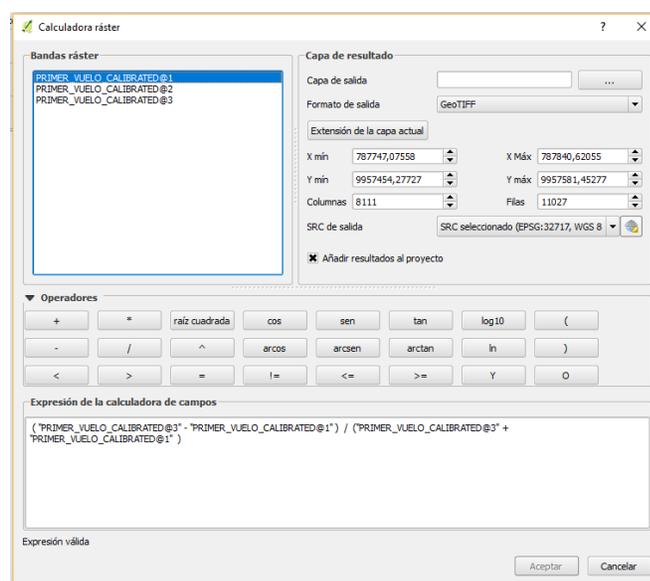


Figura 22. Generación de NDVI_U para los ortomosaicos.

Georreferenciación de las plantas

Para obtener el valor de índice por planta se procedió a la georreferenciación de cada planta y se extrajeron la información del ráster generado en el apartado 3.5.2.7.

Mediante el método RTK se procedió a la georreferenciación de las plantas, para el proceso se utilizó dos GPS de precisión marca Trimble R8. Se tomó como estación base las coordenadas del punto 04 (ver Tabla 14), y la estación móvil calculó el posicionamiento relativo en tiempo real para cada planta (ver figura 23).



Figura 23. (Izq.) Estación base y **(Der.)** móvil para la georreferenciación de las plantas.

Se descargó la información del GPS en formato .txt, se generó una base de datos en formato .xlsx con cinco columnas, en la primera columna se muestra en la el número de planta, y en las siguientes columnas el código de rastreo, las coordenadas Este (m) y Norte (m), tratamiento y repetición (ver Anexo 07). En la figura 24, se muestran las plantas georreferenciadas

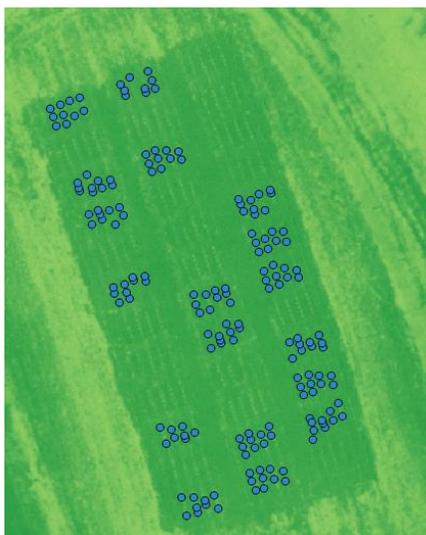


Figura 24. Georreferenciación de plantas.

Extracción de valores de NDVI_U por planta

Para la extracción de los valores de NDVI_U se utilizó la herramienta Extract to Values to Point, en el software ArcGis. Se obtuvo como resultado una tabla con los valores de NDVI_U por cada planta georreferenciada, en los diferentes estados fenológicos (ver figura 25).

	A	B	C	D	E	F	G
	Planta	NOMENCLATURA	ESTE (m)	NORTE (m)	REPETICIÓN	ESTADO FENOLÓGICO	NDVI
1							
2	1	p3	787805,5454	9957514,2689	R1	2	0,177
3	2	p4	787805,1551	9957515,7350	R2	2	0,181
4	3	p5	787806,4170	9957514,4730	R3	2	0,187
5	4	p6	787806,4010	9957514,9050	R1	3	0,194
6	5	p7	787806,1530	9957515,7280	R2	3	0,215
7	6	p8	787807,1380	9957515,1580	R3	3	0,227
8	7	p9	787807,0210	9957515,4510	R1	4	0,252
9	8	p10	787808,0840	9957514,8300	R2	4	0,261
10	9	p11	787807,7133	9957515,8959	R3	4	0,271
11	10	p12	787803,9040	9957519,9960	R1	5	0,247
12	11	p13	787803,4450	9957521,3370	R2	5	0,267
13	12	p14	787804,6245	9957520,4967	R3	5	0,251
14	13	p15	787804,3590	9957521,1730	R1	6	0,258
15	14	p16	787805,5020	9957520,4010	R2	6	0,263
16	15	p17	787805,4310	9957520,7010	R3	6	0,253
17	16	p18	787805,2570	9957521,4270	R1	7	0,268
18	17	p19	787806,2425	9957520,9124	R2	7	0,272
19	18	p20	787800,2010	9957531,2940	R3	7	0,257
20	19	p21	787799,7995	9957532,0405	R1	2	0,178
21	20	p22	787799,7321	9957532,4940	R2	2	0,187
22	21	p23	787800,9910	9957531,6546	R3	2	0,190

Figura 25. Extracción de valores de NDVI_U.

3.5.2.8 Análisis estadístico de los valores de $NDVI_U$

En el análisis estadístico de los valores de $NDVI_U$, se utilizó la metodología descrita en el apartado 3.4.2.4., y se plantearon las siguientes hipótesis.

Índice de vegetación $NDVI_U$ para tratamientos de desinfección de semilla

Para el ADEVA se planteó la siguiente prueba de hipótesis:

H_0 : El índice de vegetación $NDVI_U$ no es eficiente para identificar características asociadas al tratamiento de desinfección de semillas en el cultivo de chocho.

H_1 : El índice de vegetación $NDVI_U$ es eficiente para identificar características asociadas al tratamiento de desinfección de semillas en el cultivo de chocho.

Índices de vegetación para los estados fenológicos del cultivo de chocho

Para el ADEVA se planteó la siguiente prueba de hipótesis:

H_0 : El índice de vegetación $NDVI_U$ no es eficiente para caracterizar espectralmente el cultivo de chocho durante su desarrollo fenológico.

H_1 : El índice de vegetación $NDVI_U$ es eficiente para caracterizar espectralmente el cultivo de chocho durante su desarrollo fenológico.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente capítulo contiene los resultados generados durante el desarrollo del proyecto de investigación. Se obtuvieron análisis espectrales mediante la generación de índices de vegetación NDVI, TNDVI, SR-RE, CCI y NDRE, análisis del contenido de clorofila, y adicionalmente, para el ensayo B, un análisis espectral del cultivo mediante UAV. Finalmente, se demostró el comportamiento y caracterización espectral del chocho (*Lupinus mutabilis sweet*) por los efectos de tratamientos de desinfección de semilla durante su ciclo vegetativo.

4.1 Resultados del ensayo A – Invernadero

4.1.1 Resultados de firmas espectrales para el ensayo A

Dentro del ensayo A – Invernadero, se obtuvieron un total de 683 firmas espectrales, en la Tabla 15, se presenta un registro de datos espectrales multitemporales, asociados a 6 muestreos durante el desarrollo fenológico del cultivo. El primer muestreo contiene 116 firmas espectrales correspondientes al estado de cotiledonar, para el estado fenológico de desarrollo se plantean dos muestreos (116 y 114 firmas), donde existe la pérdida de 2 datos espectrales, consecutivamente los estados fenológicos de floración y reproducción presentan 113 respuestas espectrales y finalmente en el último muestreo (estado fenológico envainamiento) se registran 111 firmas espectrales.

Tabla 15.*Resultados de datos espectrales para el ensayo A.*

Muestreo	Estado Fenológico	Datos espectrales
Primer muestreo	2 Cotiledonar	116
Segundo muestreo	3 Desarrollo	116
Tercer muestreo	4 vegetativo	114
Cuarto muestreo	5 Floración	113
Quinto muestreo	6 Reproductivo	113
Sexto muestreo	7 Envainamiento	111
Total		683

4.1.2 Resultados del contenido de clorofila para el ensayo A

Para la información de clorofila mediante el equipo Opti-sciences CCM-200 Plus, se recolectaron 340 datos de contenido de clorofila en tres estados fenológicos del cultivo (ver Tabla 16). A diferencia del levantamiento de información por espectrorradiómetro, solo se consideraron los estados fenológicos del cultivo de chocho (desarrollo, floración y envainamiento), en los cuales el tamaño del foliolo fue igual o mayor al área de medición del equipo; en áreas de medición grandes se evidencia un mayor promedio espacial, pero las áreas más pequeñas permiten la medición de hojas más estrechas (Parry, Bronquist Jr, & Bugbee, 2014); se obtienen resultados más precisos si el área de medición del equipo de absorbancia es menor (Richardson, Duigan, & Berlyn, 2002).

Tabla 16.*Resultados de datos de contenido de clorofila para el ensayo A.*

Muestreo	Estado Fenológico	Datos de contenido de clorofila
Primer muestreo	3 Desarrollo	116

Continúa =>

Segundo muestreo	5	Floración	113
Tercer muestreo	7	Envainamiento	111
		Total	340

4.1.3 Análisis de Varianza (ADEVA) para ensayo A – Invernadero.

Se realizó el análisis de varianza, para determinar cuál de las hipótesis presentadas en los apartados 3.4.2.4. y 3.4.3.3 se aceptan, en la Tabla 17 se presentan los ρ – valor para los tratamientos y estados fenológicos derivados de los resultados de los índices de vegetación (datos radiométricos) y el contenido de clorofila.

Tabla 17.

ρ – valor para datos radiómetros y contenido de clorofila en el ensayo A.

	Índice	ρ - valor	
		Tratamiento	Estado Fenológico
Radiométricos	NDVI	0,1278	<0,0001*
	TNDVI	0,1187	<0,0001*
	SR-RE	0,3208	<0,0001*
	NDRE	0,3729	<0,0001*
	CCI	0,7890	<0,0001*
Contenido de clorofila		0,0407*	<0,0001*

*Significancia estadística ρ – valor < 0,05

Como se muestra en la Tabla 17, no existe significancia estadística en los índices de vegetación cuando se empleó tratamientos de desinfección de semilla, por ende, se acepta la hipótesis nula: “ H_0 : Los índices de vegetación no son eficientes para identificar características asociadas al tratamiento de desinfección de semillas en el cultivo de chocho”. En el caso de los estados fenológicos, es posible encontrar significancia, y se aceptó la hipótesis alternativa: “ H_1 : Los índices de vegetación son eficientes para caracterizar espectralmente el cultivo de chocho durante su

desarrollo fenológico". Se procedió a realizar una prueba de Fisher LSD al 5% para encontrar diferencias significativas mediante la utilización de índices de vegetación.

En el caso del contenido de clorofila, se encuentra significancia estadística para tratamientos y estados fenológicos, por tal razón, se aceptan las hipótesis alternativas: "*H₁: Los resultados del equipo de medidor de clorofila son eficientes para identificar características asociadas al tratamiento de desinfección de semillas en el cultivo de chocho*"; y "*H₁: Los resultados del equipo de medidor de clorofila son eficientes para caracterizar espectralmente el cultivo de chocho durante su desarrollo fenológico*". A continuación, se utilizó una prueba de Fisher LSD al 5% para comparar las medias y encontrar diferencias significativas para los tratamientos de desinfección de semilla y la caracterización espectral del cultivo por contenido de clorofila.

El análisis de varianza y los resultados de la prueba de Fisher se presentan en el Anexo 08.

4.1.4 Prueba de Fisher

4.1.4.1 Tratamientos de desinfección de semilla por calor seco

En la Tabla 18, se evidencian los valores de contenido de clorofila para los tratamientos; en donde el T4 y T1 ocupan el mismo rango (A), es decir que son estadísticamente iguales; el T3 se encuentra en dos rangos distintos (A-B), y el T2 ocupa el rango (B), siendo este tratamiento el mejor en contenido de clorofila en comparación con el testigo (T4) a lo largo del desarrollo del cultivo, como se muestra en la figura 26. Estadísticamente evidencian diferencias entre tratamientos de desinfección de semilla.

Tabla 18.

Prueba de Fisher de contenido de clorofila por tratamientos para el ensayo A.

Tratamiento	Descripción	Contenido de clorofila	
		Valor medio	Rango
T4	Testigo	63,30	A
T1	45 min Calor seco	65,45	A
T3	Vitavax	66,80	A B
T2	60 min Calor seco	72,34	B

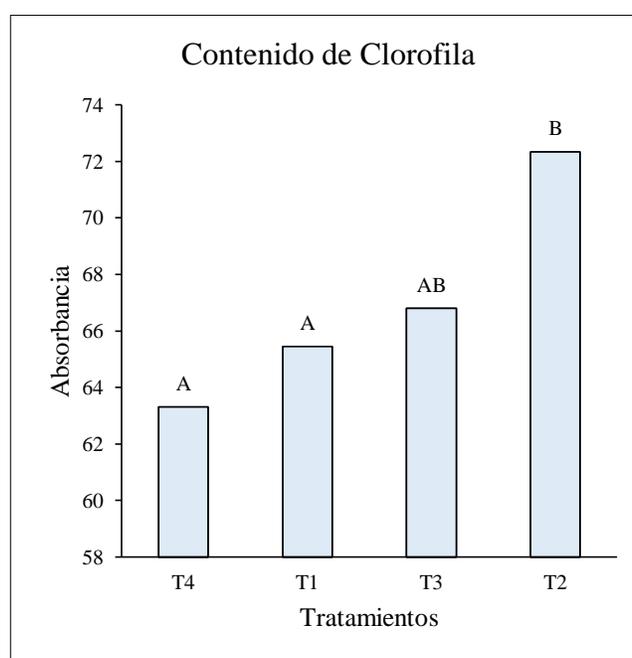


Figura 26. Contenido de clorofila por tratamientos para el ensayo A.

El tratamiento de desinfección de semilla por calor seco con una exposición de 60 min (T2), presenta los valores más altos para el contenido de clorofila por absorbancia, concordando con el trabajo desarrollado por Melde, Wiacek, y Braun (2016), que obtiene en su estudio que el mejor rendimiento de descontaminación de semilla de *Lupinus angustifolius* es por calor seco con una exposición de 60 min a una temperatura de 130 °C. De igual forma, Falconí y Yáñez–Mendizábal (2016), concluye que mediante un tratamiento de desinfección de semilla en *Lupinus mutabilis* por

calor seco a 65 °C por 8 h y 12 h, se reduce en un 85% la transmisión de Antracnosis (*C. acutatum*) desde las semillas a las plántulas en invernadero.

4.1.4.2 Estados fenológicos del cultivo de chocho para el ensayo A

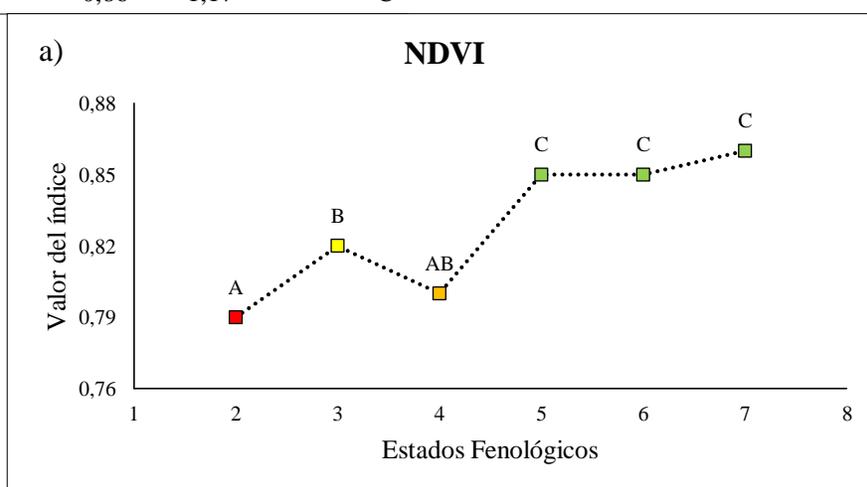
NDVI y TNDVI

En la Tabla 19, se muestran los resultados de la prueba de Fisher para los índices NDVI y TNDVI por estados fenológicos. El índice TNDVI se derivada directamente del NDVI, y se utiliza para evitar trabajar con valores negativos (Tucker, 1979); por tanto se coincide que estos dos índices ocupen los mismos rangos (ver figura 27).

Tabla 19.

Prueba de Fisher para los índices NDVI y TNDVI por estados fenológicos para el ensayo A.

Estado Fenológico	NDVI	TNDVI	Rango
2	0,79	1,13	A
4	0,80	1,14	A B
3	0,82	1,15	B
5	0,85	1,16	C
6	0,85	1,16	C
7	0,86	1,17	C



Continúa =>

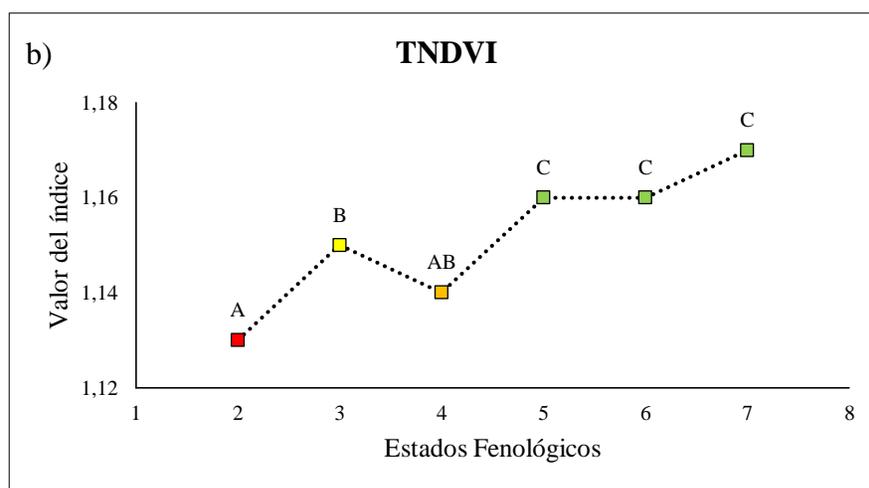


Figura 27. a) Comportamiento de NDVI por estado fenológico para el ensayo A; b) Comportamiento de TNDVI por estado fenológico para el ensayo A.

Para los índices de vegetación NDVI y TNDVI, el primer estado medido, el estado fenológico cotiledonar (2), presenta los valores más bajos de índice, y se va incrementando a medida que se desarrolla el cultivo, excepto en el estado fenológico de desarrollo vegetativo (4); donde decrecen los valores del índice, por presencia de estrés. En ambientes controlados como invernaderos, se generan microclimas, causando una alteración en variables, como el aumento de la temperatura (Tognoni & Alpi 1999; Liu, Ay, Kan, & Lee 2018), este factor influye en el desarrollo de patógenos como la Antracnosis. En el estado fenológico de floración (5) las plantas de chocho son más susceptibles a la infección de este hongo (Falconí, Visser, & van Heusden, 2015), pero al existir un aumento de la temperatura se acelera el desarrollo de la infección (Thomas, Sweetingham, Yang, & Speijers, 2008), concordando con decrecimiento del valor del índice NDVI y TNDVI entre los estados fenológicos 3 y 4.

Luego de tratamientos agronómicos, se recupera el cultivo y se presenta un aumento en el valor del índice a partir del estado fenológico 4; lo que concuerda con el estudio realizado por Lin et al.

(2014), en donde se detectó múltiples estados fenológicos para el cultivo de arroz, y una estrecha relación entre el crecimiento del cultivo y el índice NDVI.

SR-RE

En la Tabla 20, se muestran los resultados de la prueba de Fisher para el índice SR-RE con sus respectivos rangos. El estado fenológico 2 ocupa dos rangos distintos (A-B), lo que nos indica que se puede comportar estadísticamente como (A) o (B). A partir del estado de desarrollo vegetativo (3), se puede diferenciar cada estado fenológico del cultivo. El valor del índice va en aumento conforme al desarrollo del cultivo, como se observa en la figura 28.

Tabla 20.

Prueba de Fisher para el índice SR-RE por estados fenológicos para el ensayo A.

Estado Fenológico	SR-RE	Rango
3	1,17	A
2	1,18	A B
4	1,20	B
5	1,22	C
6	1,24	D
7	1,29	E

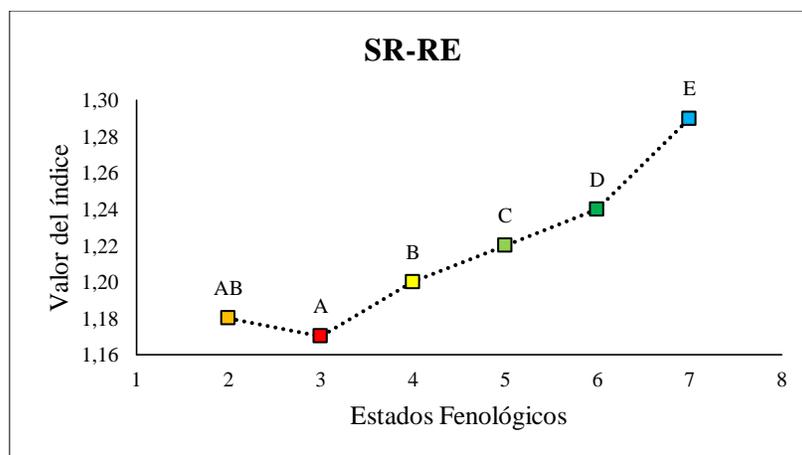


Figura 28. Comportamiento del índice SR-RE por estados fenológicos para el ensayo A.

NDRE

Los valores del NDRE presentes en la Tabla 21, detallan el estado fenológico, el valor medio y el rango asociado luego de aplicar una prueba de Fisher. De esta manera, se muestra que el estado fenológico 2 y 3 comparten el mismo rango (A). Se observa un incremento del valor medio del índice a partir del estado de desarrollo vegetativo (3), y el estado fenológico de envainamiento (7), presenta el mayor valor medio del índice (ver figura 29).

Tabla 21.

Prueba de Fisher para el índice NDRE por estado fenológico para el ensayo A.

Estado Fenológico	Valor medio	Rango
3	0,08	A
2	0,08	A
4	0,09	B
5	0,10	C
6	0,11	D
7	0,13	E

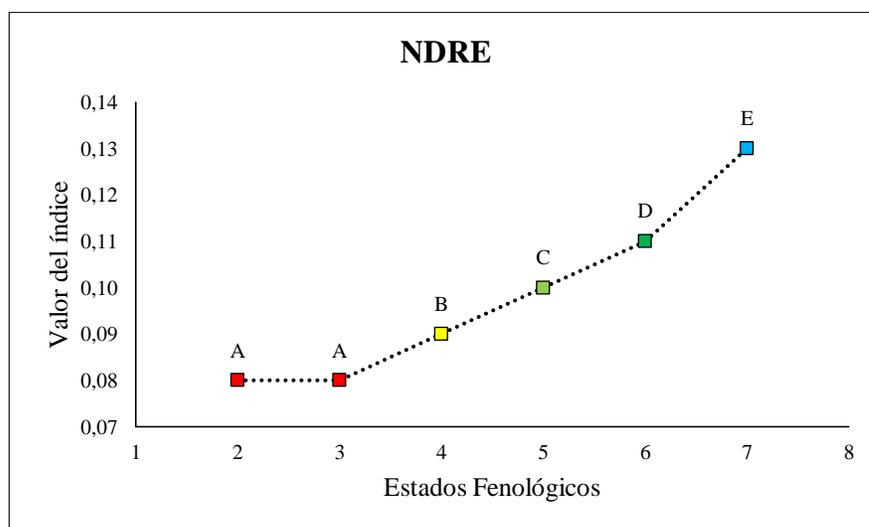


Figura 29. Comportamiento del índice NDRE por estados fenológicos para el ensayo A.

Los valores de los índices SR-RE y NDRE, aumentan en función al crecimiento vegetativo del cultivo. Estos índices utilizan el borde de rojo (red-edge), esta banda está profundamente relacionada con el contenido de clorofila (Xie et al., 2018). Según Reyes , Villegas, Colinas, y Calderón (2000), se evidencia que el contenido de clorofila aumenta en los estados fenológicos de desarrollo y floración, lo que concuerda con los resultados obtenidos para los índices SR-RE y NDRE.

CCI

Para el índice CCI, se evidencia que los estados fenológicos ocupan diferentes rangos (ver Tabla 22), mediante este índice se puede caracterizar espectralmente el cultivo durante su desarrollo. El valor del índice aumenta en función al crecimiento del cultivo. Cada estado fenológico ocupa un rango diferente a excepción de los estados fenológico 6 y 7, que son estadísticamente iguales, es decir que no se puede diferenciar espectralmente el cultivo en esos dos estados (ver figura 30).

Tabla 22.

Prueba de Fisher para el índice CCI por estados fenológicos para el ensayo A.

Estado Fenológico	CCI	Rango
2	1,26	A
3	1,42	B
4	1,63	C
5	1,81	D
6	1,91	E
7	1,97	E

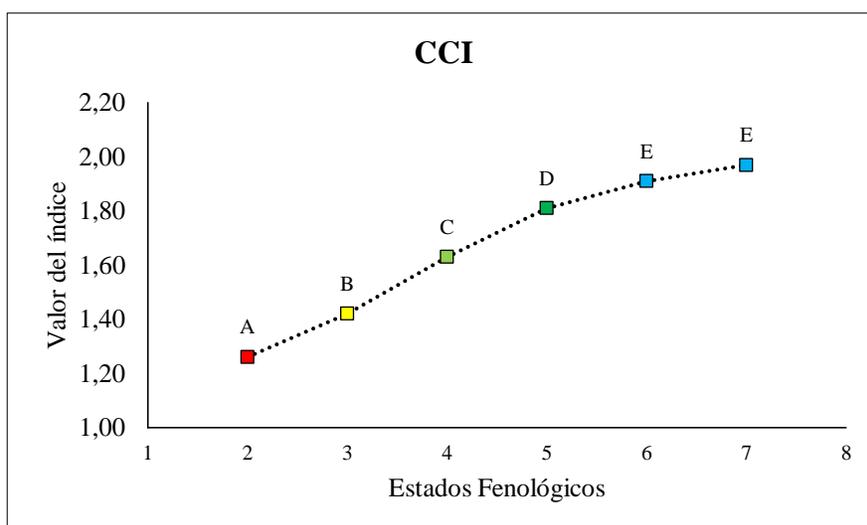


Figura 30. Comportamiento del índice CCI por estados fenológicos para el ensayo A.

Medidor de clorofila

La Tabla 23, muestra los valores de contenido de clorofila, durante los tres estados fenológicos analizados, los valores corresponden a la respuesta de absorbancia del CCI mediante el equipo CCM-200. Cada estado corresponde a un diferente rango como se muestra en la figura 31.

Tabla 23.

Prueba de Fisher para el contenido de clorofila por estado fenológico para el ensayo A.

Estado Fenológico	Contenido de clorofila	
	Valor de índice	Rango
3	56,60	A
5	63,05	B
7	81,27	C

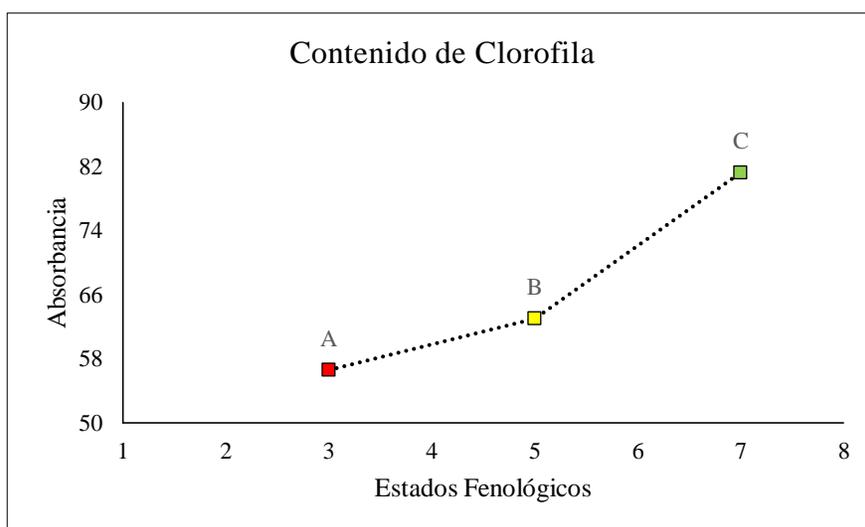


Figura 31. Comportamiento del contenido de clorofila por estados fenológicos para el ensayo A.

El índice CCI y el índice por el medidor de clorofila, presentan estadísticamente un comportamiento similar en los estados fenológicos 3, 5 y 7. La diferencia se establece en los valores que se utilizan para su formación. Por un lado, el índice CCI es generado por valores de reflectancia, y el índice que se obtiene por el medidor de clorofila, se genera mediante valores de absorbancia. Ambos índices miden el contenido de clorofila, por lo tanto mantienen los mismos elementos. Se observa en ambos índices un aumento del contenido de clorofila mientras se desarrolla el cultivo.

4.2 Resultados del ensayo B – Campo

4.2.1 Resultados de firmas espectrales para el ensayo B

Para el ensayo B - Campo, se obtuvo un total de 1,062 firmas espectrales (ver Tabla 24), correspondientes a 6 estados fenológicos del cultivo, se presentan 179 firmas espectrales para el

primer muestreo. Durante el desarrollo del cultivo, se presentó una disminución de datos espectrales, ocasionadas por problemas durante el desarrollo de las plantas.

Tabla 24.

Resultados de datos espectrales para el ensayo B.

Muestreo	Estado Fenológico	Datos espectrales	
Segundo muestreo	2	Cotiledonar	179
Tercer muestreo	3	Desarrollo	179
Cuarto muestreo	4	vegetativo	178
Quinto muestreo	5	Floración	178
Sexto muestreo	6	Reproductivo	174
Séptimo muestreo	7	Envainamiento	174
Total			1,062

4.2.2 Resultados de contenido de clorofila para el ensayo B

Para la información de clorofila mediante el equipo Opti-sciences CCM-200, se recolectaron 531 datos de contenido de clorofila en tres estados fenológicos del cultivo (ver Tabla 25). En el primer muestreo se evidencian 179 datos, en el segundo muestreo (estado fenológico floración) y tercer muestreo (estado fenológico envainamiento) se muestran 178 y 174 datos, respectivamente.

Tabla 25.

Resultados de contenido de clorofila para el ensayo B.

Muestreo	Estado Fenológico	Datos de contenido de clorofila	
Primer muestreo	3	Desarrollo	179
Segundo muestreo	5	Floración	178
Tercer muestreo	7	Envainamiento	174
Total			531

4.2.3 Resultados de NDVI_U y NDVI_E

Se generó un valor de NDVI por planta, en la Tabla 26 se muestran los resultados de NDVI_E y NDVI_U, a partir del segundo estado fenológico (Cotiledonar) hasta el estado fenológico de envainamiento, con un total de 1.062 índices para cada análisis.

Tabla 26.

Resultados de NDVI_E y NDVI_U para el ensayo B.

Estado Fenológico	NDVI _E	NDVI _U
2 Cotiledonar	179	179
3 Desarrollo	179	179
4 vegetativo	178	178
5 Floración	178	178
6 Reproductivo	174	174
7 Envainamiento	174	174
Total	1.062	

4.2.4 Análisis de Varianza (ADEVA) para el ensayo B – Campo

Se realizó el análisis de varianza, para determinar cuál de las hipótesis presentadas en los apartados 3.4.2.4., 3.4.3.3 y 3.5.2.8 se aceptan, en la Tabla 27 se presentan los ρ – valor para los tratamientos y estados fenológicos considerando los resultados de índices de vegetación (datos radiométricos), los resultados de los índices NDVI_E y NDVI_U y el contenido de clorofila.

Tabla 27.

ρ – valor para datos radiómetros, índice para UAV y contenido de clorofila en el ensayo B.

	Índice	ρ - valor	
		Tratamiento	Estado Fenológico
Radiométricos	NDVI	<0,0001*	<0,0001*
	TNDVI	<0,0001*	<0,0001*
	SR-RE	0,0783	<0,0001*

Continúa =>

	NDRE	0,0800	<0,0001*
	CCI	0,0187*	<0,0001*
	NDVI _E	<0,0001*	<0,0001*
UAV	NDVI _U	<0,0001*	<0,0001*
	Contenido de clorofila	0,0874	<0,0001*

*Significancia estadística p – valor < 0,05

Como se evidencia en la Tabla 27, existe significancia estadística en los datos radiométricos para tratamientos de desinfección de semilla, a excepción de los índices SR-RE y NDRE, para estados fenológicos todos los datos radiométricos presentan significancia estadística, en consecuencia, se aceptan las hipótesis alternativas: “ H_1 : Los índices de vegetación son eficientes para identificar características asociadas al tratamiento de desinfección de semillas en el cultivo de chocho”; y “ H_1 : Los índices de vegetación son eficientes para caracterizar espectralmente el cultivo de chocho durante su desarrollo fenológico”. Debido a la existencia de significancias estadísticas, se procedió a utilizar una prueba de Fisher LSD al 5%.

En el caso del índice NDVI_U, se tiene significancia estadística para tratamientos y estados fenológicos, por ende, se aceptan las hipótesis alternativas: “ H_1 : El índice de vegetación NDVI_U es eficiente para identificar características asociadas al tratamiento de desinfección de semillas en el cultivo de chocho”; y “ H_1 : El índice de vegetación NDVI_U es eficiente para caracterizar espectralmente el cultivo de chocho durante su desarrollo fenológico”.

Para el contenido de clorofila, se muestra que no existe significancia estadística para los tratamientos de desinfección de semilla, consecuentemente, se acepta la hipótesis nula: “ H_0 : Los resultados del equipo de medidor de clorofila no son eficientes para identificar características asociadas al tratamiento de desinfección de semillas”. Para los estados fenológicos, existe significancia, y se aceptó la hipótesis alternativa, “ H_1 : Los resultados del equipo de medidor de

clorofila son eficientes para caracterizar espectralmente el cultivo de chocho durante su desarrollo fenológico”. Por tal razón, se realizó una prueba de Fisher LSD al 5%.

El análisis de varianza y los resultados de la prueba de Fisher se presentan en el Anexo 09.

4.2.5 Prueba de Fisher

4.2.5.1 Tratamientos de desinfección de semilla por radiación solar

NDVI, TNDVI y CCI

En la Tabla 28, se muestra un resumen de los resultados de la prueba de Fisher para cada índice de vegetación por tratamientos de desinfección de semilla que ocupan diferentes rangos, considerando los rangos inferiores y superiores en relación al testigo (T5). Para el CCI, el T5 presenta el mayor valor medio, los otros tratamientos T1 y T4 ocupan el mismo rango (B) que el testigo.

Tabla 28.

Prueba de Fisher para índices de vegetación NDVI, TNDVI y CCI por tratamientos en el ensayo B.

Tratamiento	Descripción	Índices de Vegetación					
		NDVI	TNDVI	Rango		CCI	Rango
T2	45min_est	0,78	1,13	A		1,55	A
T5	Testigo	0,82	1,15	B	C	1,69	B
T4	45min_amb	0,84	1,16	C		-	

El NDVI es un índice que nos permite evaluar la biomasa del dosel y la cobertura verde de las plantas (Gamon et al., 1995; Goswami, Gamon, Vargas, & Tweedie 2015; Wang, Chen, Tang, Black, & Zhu 2018). Al existir una diferencia estadística entre tratamientos (ver tabla 28), se evidencia que el T4 con una exposición de 45 min a radiación solar es el mejor tratamiento con un

valor medio de 0,84, en comparación al testigo ($T5=0,82$). Para el TNDVI, se muestra un comportamiento similar al NDVI (Tucker, 1979), con un valor de 1,16 para el T4.

En el caso del índice CCI, no se evidencian tratamientos que estadísticamente sean mejores en relación al testigo, esto coincide con el estudio realizado por Falconí y Yáñez-Mendizábal (2018), en donde señala que el contenido de clorofila en semillas infectadas para la variedad I-450 Andino, no presenta diferencias significativas para tratamientos por radiación solar. Por otro lado, Shetta y Areaf (2009), concluyen que una sobre-exposición por tratamientos de radiación UV-C en semillas de *Acacia ampliceps*, disminuye considerablemente el contenido de clorofila, lo que se evidencia en la tabla 28, donde el CCI para el T2 es estadísticamente menor al testigo (T5).

NDVI_E y NDVI_U

En la Tabla 29, se presenta un resumen de los resultados de la prueba de Fisher para los índices NDVI_E y NDVI_U, que corresponden a valores obtenidos mediante espectroradiómetro y el uso de una plataforma aérea no tripulada (UAV) con una cámara de lente modificada (Kernel Filter), que presenta las bandas rojas (centro de banda 660 nm) y NIR (centro de banda 850 nm). Estudios realizados con la implementación de sensores multiespectrales a bordo de un UAV permiten mapear la variabilidad espectral del cultivo y su rendimiento (Stroppiana et al., 2015). De igual forma, Do, Pham, Raheja, & Bhandari (2018), mencionan la implementación de estos sensores para un monitoreo de la salud, contenido de nitrógeno e identificar estrés hídrico en los cultivos.

Tabla 29.

Prueba de Fisher para índices de vegetación NDVI_U y NDVI_E por tratamientos en el ensayo B.

Tratamiento	Descripción	Índices de Vegetación		
		NDVI _U	NDVI _E	Rango
T2	45 min estufa	0,22	0,79	A

Continúa =>

T5	Testigo	0,24	0,83	B	C
T4	45 min ambiente	0,25	0,84		C

Los índices $NDVI_U$ y $NDVI_E$ muestran el valor más alto de media en el tratamiento (T4) y el tratamiento (T2) presenta el valor más bajo en comparación con el testigo (T5). Esto nos permite determinar características asociadas mediante radiometría a los tratamientos de desinfección de semilla por radiación solar para el cultivo de chocho, concordando con estudios similares donde muestra una relación de NDVI con el rendimiento, varios atributos fisiológicos de los cultivos, condiciones de sequía, calor y estrés biótico (Kumar et al., 2016; Foster, Kakani, & Mosali, 2017).

4.2.5.2 Estados fenológicos del cultivo para el ensayo B

NDVI y TNDVI

Los índices de vegetación NDVI y TNDVI se comportan de similar manera, los estados fenológicos ocupan los mismos rangos (ver Tabla 30). Los valores de los índices aumentan en función al desarrollo vegetativo del cultivo (Lin et al., 2014). Se observa que el valor más bajo del índice, se presenta en el estado fenológico cotiledonar (2), y aumenta a medida que se desarrolla el cultivo. En el estado fenológico de floración (5), se evidencia una disminución en el valor del índice (ver figura 32), esto concuerda con el estudio realizado por Falconí et al. (2015), en donde se detalla que en el estado fenológico de floración los genotipos analizados de Andean lupin son más susceptible a la presencia de patógenos como la Antracnosis, que genera afectaciones a nivel foliar. Los estados fenológicos reproductivo (6) y envainamiento (7), son estadísticamente iguales, es decir que no se pueden diferenciar.

Tabla 30.

Prueba de Fisher para los índices NDVI y TNDVI por estado fenológico para el ensayo B.

Estado fenológico	NDVI	TNDVI	Rango
2	0,75	1,12	A
3	0,80	1,14	B
5	0,81	1,14	B
4	0,85	1,16	C
6	0,85	1,16	C
7	0,86	1,16	C

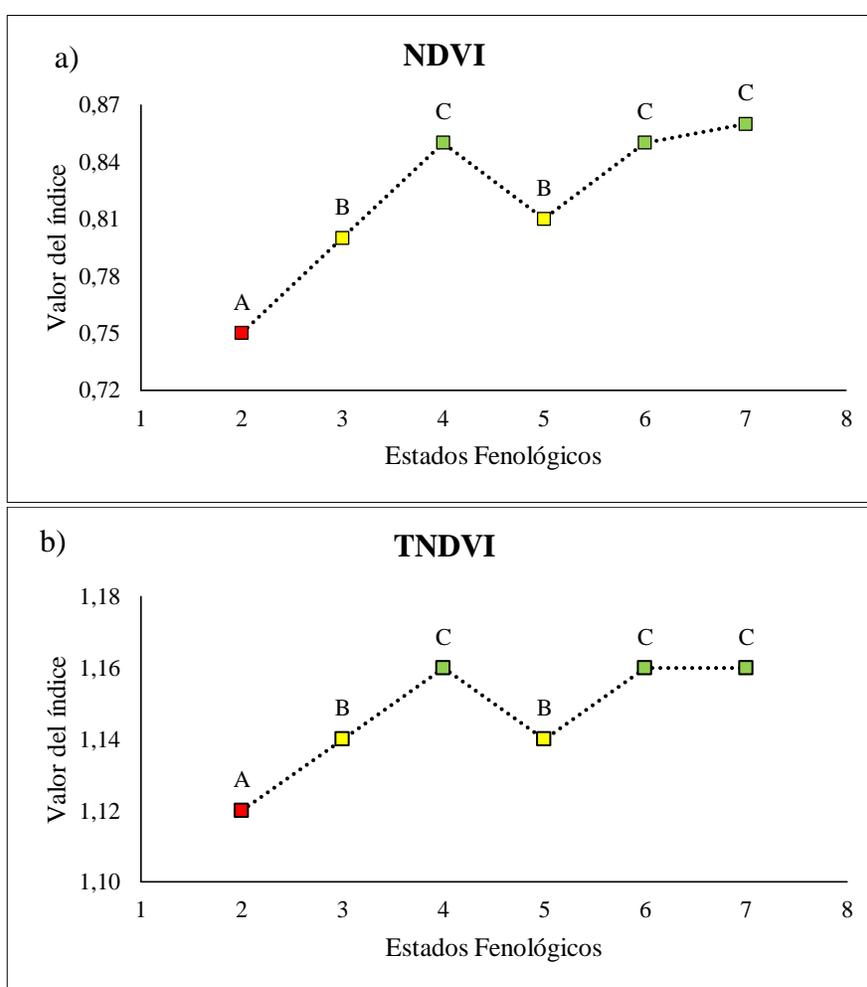


Figura 32. a) Comportamiento del índice NDVI por estados fenológicos para el ensayo; b) Comportamiento del índice TNDVI por estados fenológicos para el ensayo B.

SR-RE

En la Tabla 31, se muestran los resultados de la prueba de Fisher para el índice SR-RE con sus respectivos rangos. El valor del índice aumenta conforme se desarrolla el cultivo (ver figura 33). Cada estado fenológico presenta un diferente rango, a excepción de los estados fenológicos de floración (5) y reproductivo (6), que son estadísticamente iguales.

Tabla 31.

Prueba de Fisher para el índice SR-RE por estado fenológico para el ensayo B.

Estado fenológico	SR-RE	Rango
2	1,16	A
3	1,18	B
4	1,23	C
5	1,25	D
6	1,26	D
7	1,29	E

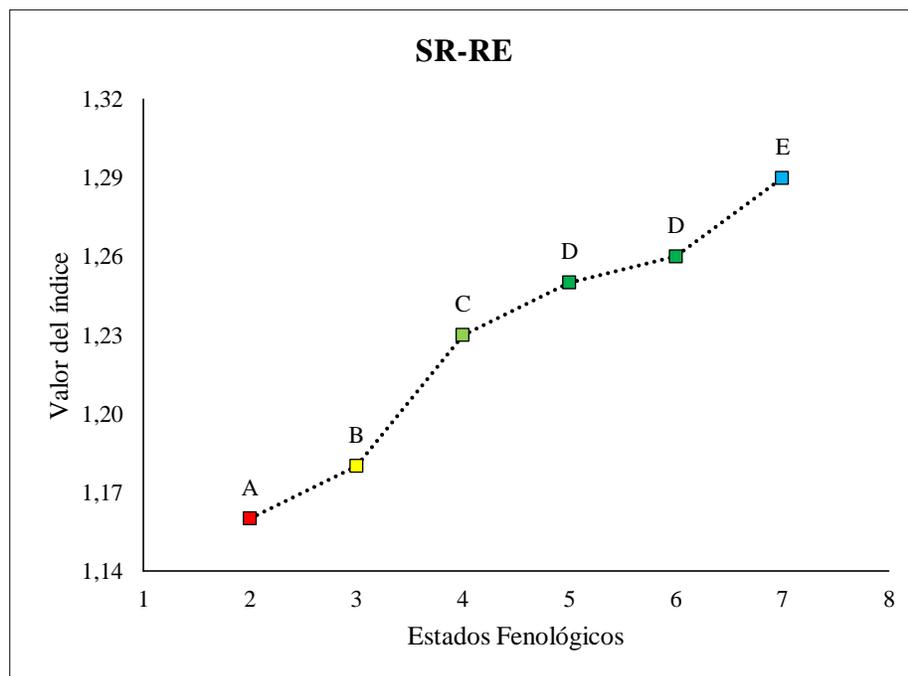


Figura 33. Comportamiento del índice SR-RE por estados fenológicos para el ensayo B.

NDRE

Los valores del NDRE presentes en la Tabla 32, detallan el rango que ocupa cada estado fenológico en función del valor medio del índice luego de aplicar una prueba de Fisher. El valor más bajo del índice corresponde al estado fenológico cotiledonar (2), a medida que se desarrolla el cultivo el valor del índice aumenta progresivamente, hasta el estado fenológico de envainamiento (7), en donde alcanza su valor más alto (ver figura 34).

Tabla 32.

Prueba de Fisher para el índice NDRE por estado fenológico para el ensayo B.

Estado fenológico	NDRE	Rango
2	0,07	A
3	0,08	B
4	0,10	C
5	0,11	D
6	0,11	D
7	0,13	E

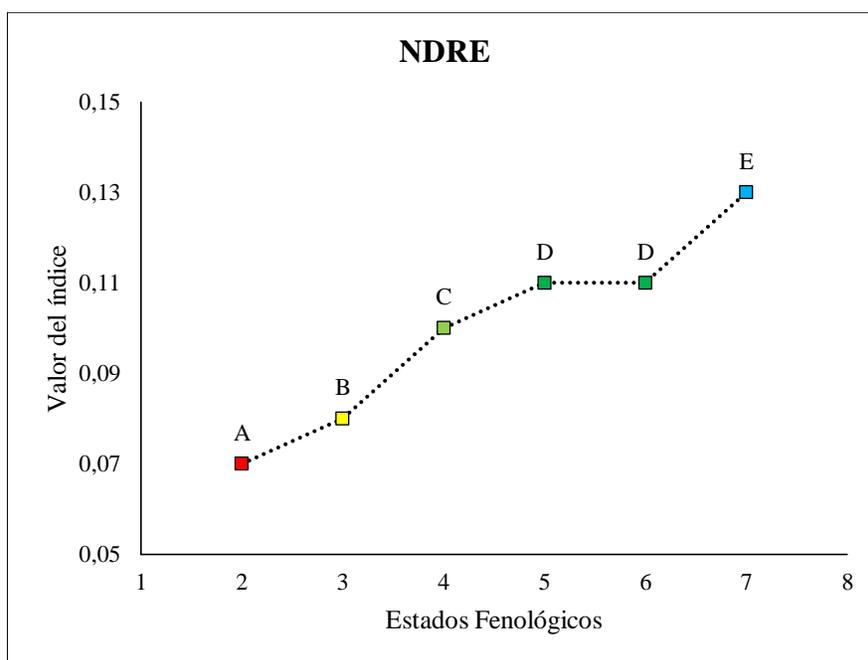


Figura 34. Comportamiento del índice NDRE por estados fenológicos para el ensayo B.

CCI

Para el índice CCI, se evidencia que los estados fenológicos ocupan diferentes rangos (ver Tabla 33). El valor del índice aumenta en función al crecimiento del cultivo hasta el estado fenológico de desarrollo (4), después el valor del índice decrece en el estado fenológico de floración (5), esto se debe a la presencia de estrés por antracnosis (Falconí et al., 2015). La antracnosis causa afecciones a nivel foliar, produce manchas cloróticas (Insuati, 2001), lo que se relaciona con la disminución del contenido de clorofila, y la variación del índice CCI entre los estados 4 y 5 (ver figura 35).

Tabla 33.

Prueba de Fisher para el índice CCI por estado fenológico para el ensayo B.

Estado fenológico	CCI	Rango
2	1,14	A
3	1,44	B
5	1,82	C
7	1,82	C D
6	1,90	D E
4	1,91	E

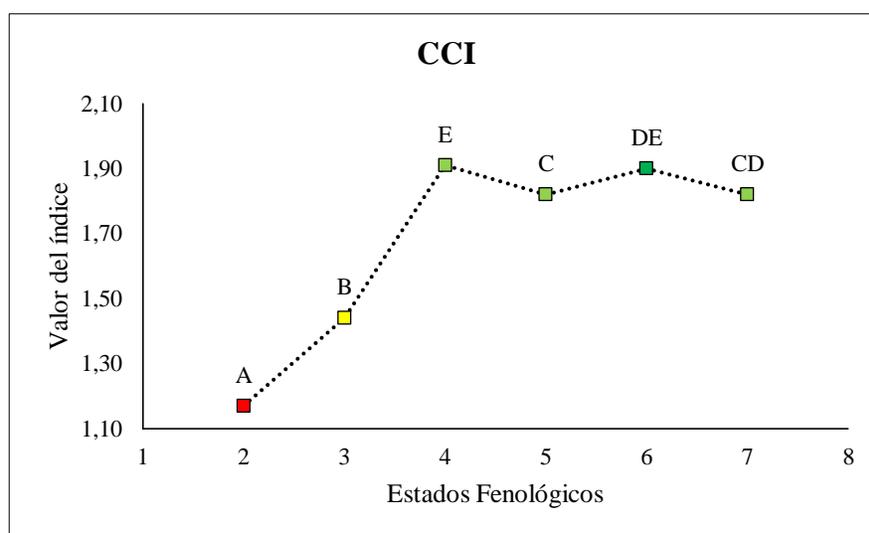


Figura 35. Comportamiento del índice CCI por estados fenológicos para el ensayo B.

Medidor de clorofila

La Tabla 34, muestra los valores de contenido de clorofila, durante los tres estados fenológicos analizados, los valores corresponden a la respuesta de absorbancia del CCI mediante el equipo CCM-200. El estado fenológico desarrollo vegetativo (3) presenta el valor más bajo del índice. En el estado fenológico de floración (5) aumenta el valor del índice y en el estado fenológico de envainamiento (7) el valor del CCI, estadísticamente se mantiene igual que el estado (5), es decir que no se puede distinguir espectralmente el cultivo mediante este índice entre los dos estados mencionados, (5) y (7) (ver figura 36).

Tabla 34.

Prueba de Fisher para el contenido de clorofila por estado fenológico para el ensayo B.

Estado Fenológico	Contenido de clorofila	
	Valor de índice	Rango
3	51,59	A
5	62,38	B
7	66,63	B

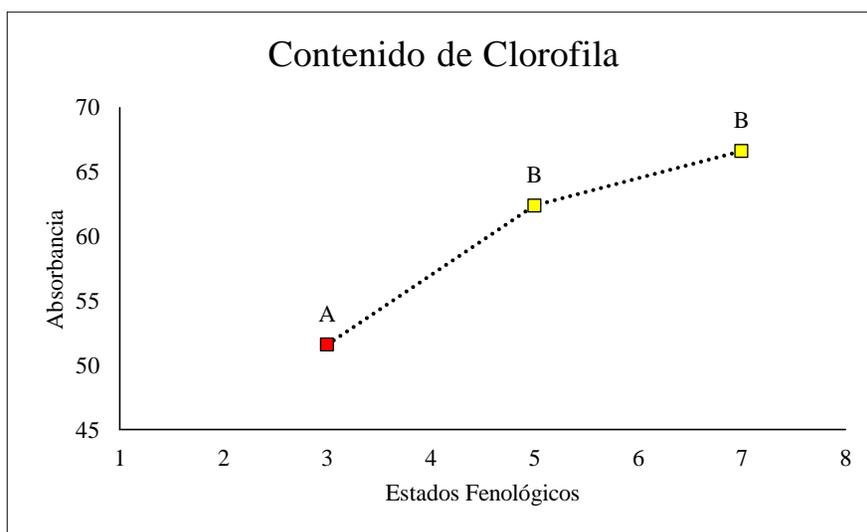


Figura 36. Comportamiento del contenido de clorofila por estados fenológicos para el ensayo B,

Los índices CCI y el índice obtenido mediante el contenido de clorofila, estadísticamente se comportan de similar manera. El contenido de clorofila es menor en el estado fenológico (3), y aumenta en el estado fenológico (5). Posteriormente, no se evidencia un aumento del contenido de clorofila en el estado fenológico (7), lo que se evidencia en las figuras 35 y 36.

NDVI_E y NDVI_U

El índice NDVI_E, muestra el mismo comportamiento estadístico que el NDVI generado por las pseudo bandas del Parrot Sequoia (ver Tabla 35), en donde existe una disminución del valor del índice en el estado fenológico de floración (5), por la presencia de alteraciones en la planta, como estrés a causa de patógenos (Antracnosis) (ver figura 37).

Tabla 35.

Prueba de Fisher para el índice NDVI_E por estado fenológico para el ensayo B.

Estado fenológico	Valor medio	Rango
2	0,76	A
3	0,81	B
5	0,81	B
6	0,85	C
4	0,86	C
7	0,86	C

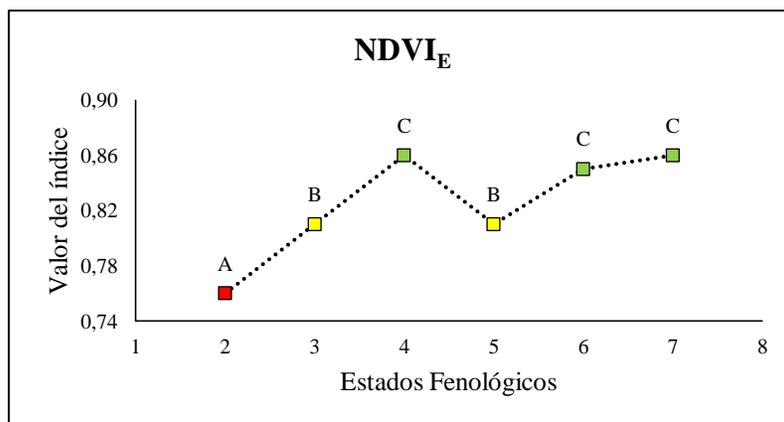


Figura 37. Comportamiento del índice NDVI_E por estados fenológicos para el ensayo B.

Por otro lado, el índice que se obtiene por el UAV con lente modificada $NDVI_U$, muestra un crecimiento progresivo del cultivo (ver figura 38), en donde el valor más bajo del índice, corresponde al primer estado fenológico medido, estado fenológico cotiledonar (2), y el valor más alto, al estado de envainamiento (7) (ver Tabla 36).

Tabla 36.

Prueba de Fisher para el índice $NDVI_U$ por estado fenológico para el ensayo B.

Estado fenológico	Valor medio	Rango
2	0,18	A
3	0,21	B
5	0,26	C
6	0,26	C
4	0,26	C
7	0,27	D

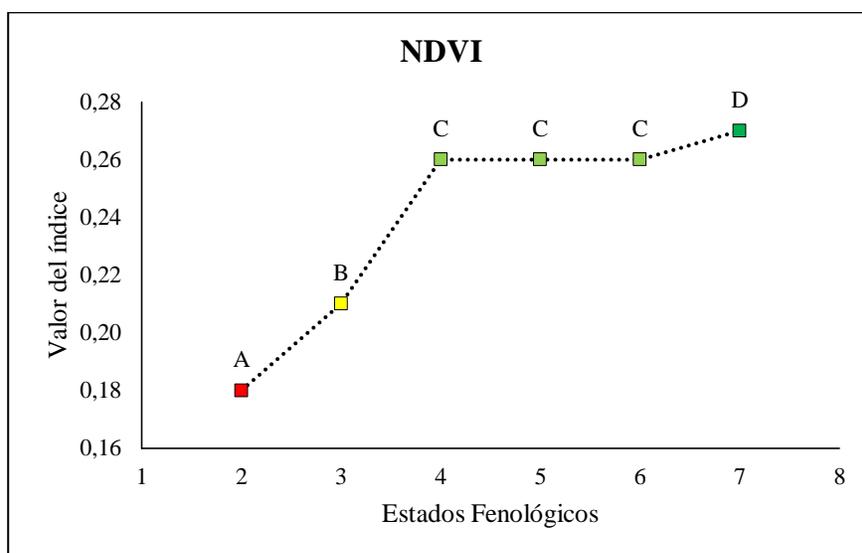


Figura 38. Comportamiento del índice $NDVI_U$ por estados fenológicos para el ensayo B.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se obtuvieron un total de 683 firmas espectrales para el ensayo A y para el ensayo B un total de 1.062 firmas espectrales durante el desarrollo fenológico del cultivo *Lupinus mutabilis Sweet*. Las respuestas espectrales obtenidas en ambos ensayos, corresponden a una respuesta típica de vegetación, con una baja reflectividad en el espectro visible (400 a 700 nm), y en el espectro del infrarrojo cercano (700 a 1300 nm) se presenta una alta reflectividad.
- Para el medidor de clorofila (Opti-sciences CCM-200), se registraron un total de 340 valores de índice CCI de absorbancia para el ensayo A, y en el caso del ensayo B se obtuvieron 531 datos.
- Dentro del ensayo B, se generaron un total de seis ortomosaicos durante el ciclo vegetativo del cultivo, a partir de las imágenes obtenidas por el UAV de lente modificada, con un total de 1.062 valores de NDVI_U.
- Mediante la aplicación de índices de vegetación por reflectancia en invernadero, no se evidencian diferencias significativas para tratamientos de desinfección de semilla mediante calor seco. Por otro lado, mediante el medidor de clorofila es posible distinguir entre tratamientos, en donde el mayor valor medio del CCI por absorbancia (medidor de clorofila), corresponde al tratamiento con una exposición de 60 minutos a calor seco (T2).
- Los índices de vegetación y el medidor de clorofila, nos permiten caracterizar espectralmente el cultivo durante su ciclo vegetativo dentro de invernadero (ensayo A). Los índices NDVI y TNDVI, resultaron ser los indicadores más sensibles a alteraciones en el

desarrollo del cultivo, nos permiten detectar estrés en la planta de chocho por la presencia de patógenos (Antracnosis). En el caso de los índices SR-RE y NDRE, es posible caracterizar espectralmente el cultivo en todos sus estados fenológicos, a excepción del estado fenológico cotiledonar (2). El índice CCI, es un buen indicador para los estados fenológicos del cultivo (2,3,4), y guarda una estrecha relación con el CCI por absorbancia.

- Para el ensayo B se puede concluir que, los índices de reflectancia y el índice por el medidor de clorofila, son eficientes para caracterizar espectralmente el cultivo de chocho durante su desarrollo fenológico. Los índices SR-RE y NDRE, presentan una mayor precisión en la caracterización espectral que los otros índices en los diferentes estados fenológicos. Los índices NDVI, TNDVI y CCI, permiten evidenciar condiciones de estrés en la vegetación por la presencia de Antracnosis, y son eficientes para identificar características asociadas al tratamiento de desinfección de semillas, el mejor tratamiento de desinfección de semilla por radiación solar es el T4 (45 min ambiente).
- Los índices NDVI_U y NDVI_E, son eficientes para identificar características asociadas al tratamiento de desinfección de semillas y permiten caracterizar espectralmente el cultivo de chocho durante su desarrollo fenológico. Se pudo observar que, no es posible identificar condiciones asociadas al estrés del cultivo durante su desarrollo, mediante el índice NDVI_U, esto se debe a la baja resolución espectral de la lente modificada aplicada para la obtención del índice.
- Se recomienda realizar la caracterización espectral del chocho a partir de la aparición de las hojas verdaderas o del segundo estado fenológico (cotiledonar), con el fin obtener un control y monitoreo de la planta en desarrollo, que cumplan con las funciones vegetativas

- Se recomienda realizar una réplica de la presente investigación, con la incorporación de dos genotipos de chocho, con la finalidad de encontrar características o diferencias significativas entre la variación de la respuesta espectral del chocho en dos variedades.
- Es recomendable aplicar diferentes índices de vegetación para realizar un análisis completo del cultivo en relación a las características asociadas con el estrés vegetativo, el estrés hídrico, la cuantificación del área foliar, la pigmentación y la detección de patógenos.
- Se sugiere realizar estudios similares a partir de esta línea de investigación, para continuar evidenciando las potencialidades de las tecnologías geoespaciales dentro de la agricultura, con un enfoque a la optimización de recursos que genere una mejora en la producción.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adamchuk, V. I., Hummel, J. W., Morgan, M. T., & Upadhyaya, S. K. (2004). *On-the-go soil sensors for precision agriculture*. *Computers and electronics in agriculture*, 44(1), 71-91.
- Agro Solutions. (11 de 08 de 2016). *Ecuaquímica*. Recuperado el 9 de 05 de 2018, de Vitavax: https://www.ecuaquimica.com.ec/pdf_agricola/VITAVAX.pdf
- Alcubierre, D. (2015). *Manual para construir una estufa solar. gstriatum*.
- Araque, L., & Jiménez, A. (2009). *Caracterización de firma espectral a partir de sensores remotos para el manejo de sanidad vegetal en el cultivo de palma de aceite*. *Revista Palmas*, 30(3), 63-79.
- Arocha J, A. (11 de 05 de 2014). *Cultivos Cerealeros Venezuela*. Recuperado el 09 de 08 de 2018, de SlideShare: <https://es.slideshare.net/AlfredoJavier1/cultivos-cerealeros-de-venezuela>
- Auynirundronkool, K., Deedomchan, K., Prakobya, A., Jarnkoon, V., Tintarasara, M., & Seechan, M. (2008). *Analysis of Economic Crop Reflectance by Field Spectral Signature: Case Study Sugarcane*. *Journal of plant physiol*, 1-9.
- Badii, M., Castillo, J., Rodríguez, M., Wong, A., & Villalpando, P. (2007). *Diseños experimentales e investigación científica*. *Innovaciones de Negocio*, 4(2), 283-330.
- Barnes, E. M., Clarke, T. R., Richards, S. E., Colaizzi, P. D., Haberland, J., Kostrzewski, M., . . . Moran, M. S. (2000). *Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground based multispectral data*. *Proceedings of the Fifth International Conference on Precision Agriculture*, 1619. Bloomington.

- Barrientos, A., Cerro, J. d., Gutiérrez, P., Martín, R. S., Martínez, A., & Rossi, C. (2007). *Vehículos aéreos no tripulados para uso civil*. Tecnología y aplicaciones. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Basnyat, P., McConkey, B., Lafond, G. P., Moulin, A., & Pelcat, Y. (2004). *Optimal time for remote sensing to relate to crop grain yield on the Canadian prairies*. Canadian Journal of Plant Science, 84(1), 97-103.
- Beck, P. S., Atzberger, C., Høgda, K. A., Johansen, B., & Skidmore, A. K. (2006). *Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI*. Remote sensing of Environment, 100(3), 321-334.
- Caicedo, C., & Peralta, E. (2001). *El cultivo de chocho Lupinus mutabilis Sweet: Fitonutrición, Enfermedades y Plagas, en el Ecuador*. Estación Experimental Santa Catalina - INIAP, Programa Nacional de Leguminosas, Quito - Ecuador.
- Cao, Q., Miao, Y., Feng, G., Gao, X., Li, F., Liu, B., . . . Khosla, R. (2015). *Active canopy sensing of winter wheat nitrogen status: An evaluation of two sensor systems*. Computers and Electronics in Agriculture, 112, 54-67.
- Chandrasegar Thirumalai, V. M., & Balaji, R. (2017). *Data analysis using Box and Whisker plot for Lung Cancer*. IEEE IPACT.
- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección Ambiental, la observación de la Tierra desde el Espacio (Tercera ed.)*. Barcelona, España: Editorial Ariel Ciencias.
- Colimba, J. A. (2018). *Tratamiento de semilla mediante radiación solar y su efecto en la incidencia de antracnosis (Colletotrichum acutatum) en dos etapas fenológicas de chocho de dos*

genotipos locales (Lupinus mutabilis). (Bachelor's thesis, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. IASA I. Carrera de Ingeniería de Ciencias Agropecuarias.).

Condo, L., & Pazmiño, J. (2015). *Diseño Experimental en el desarrollo del conocimiento científico de las ciencias agropecuarias*. Riobamba - Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Danner, M., Locherer, M., Hank, T., & Richter, K. (2015). *Spectral Sampling the ASD FieldSpec 4 – Theory, Measurement, Problems, Interpretation*. EnMap Field Guides Technical Report, GFZ Data Services.

Díaz, J. (2015). *Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión*. Madrid, España.

Do, D., Pham, F., Raheja, A., & Bhandari, S. (2018). *Machine learning techniques for the assessment of citrus plant health using UAV-based digital images*. In Autonomous Air and Ground Sensing Systems for Agricultural Optimization and Phenotyping III (Vol. 10664, p. 1066400). International Society for Optics and Photonics.

Ehsani, M., Upadhyaya, S., & Mattson, M. (2004). *Seed location mapping using RTK GPS*. Transactions of the ASAE, 47(3), 909.

Eitel, J. U., Vierling, L. A., Litvak, M. E., Long, D. S., Schulthess, U., Ager, A. A., . . . Stoscheck, L. (2011). *Broadband, red-edge information from satellites improves early stress detection in a New Mexico conifer woodland*. Remote Sensing of Environment, 12, 3640-3646.

Falconí, C. E., & Yáñez–Mendizábal, V. (2016). *Dry heat treatment of Andean lupin seed to reduce anthracnose infection*. Crop Protection, 89, 178-183.

- Falconí, C. E., & Yáñez-Mendizábal, V. (2018). *Efficacy of UV-C radiation to reduce seedborne anthracnose (Colletotrichum acutatum) from Andean lupin (Lupinus mutabilis)*. *Plant Pathology*, 67(4), 831-838.
- Falconí, C. E., Visser, R. G., & van Heusden, S. (2015). *Influence of plant growth stage on resistance to anthracnose*. *Crop & Pasture Science*, 66(7), 729-734.
- Ferrández-Pastor, F. J., García-Chamizo, J. M., Nieto-Hidalgo, M., & Mora-Martínez, J. (2018). *Precision Agriculture Design Method Using a Distributed Computing Architecture on Internet of Things Context*. *Sensors*, 18(6), 1731.
- FHIA. (2007). *Efecto de la solarización para el control de enfermedades del suelo en semilleros artesanales en el Valle de Comayagua*. Fundación Hondureña de Investigación Agrícola, Programa de Hortalizas.
- Foster, A. J., Kakani, V. G., & Mosali, J. (2017). *Estimation of bioenergy crop yield and N status by hyperspectral canopy reflectance and partial least square regression*. *Precision Agriculture*, 18(2), 192-209.
- Frías, M. A. (2014). *Radiación Infrarroja*. Recuperado el 01 de 08 de 2018, de https://www.academia.edu/10360014/RADIACION_INFRARROJA
- Gamon, J. A., Field, C. B., Goulden, M. L., Griffin, K. L., Hartley, A. E., Joel, G., . . . Valentini, R. (1995). *Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three Californian vegetation types*. *Ecological Applications*, 5(1), 28-41.
- García, E., & Flego, F. (2008). *Agricultura de precisión*. *Revista Ciencia y Tecnología*. Obtenido de http://www.palermo.edu/ingenieria/Ciencia_y_tecnologia/ciencia_y_tecno_8.html.

- García, S. (2010). *Instrumentos de observación*. Recuperado el 01 de 08 de 2018, de <http://webs.um.es/gregomc/IntroduccionAstronomia/Temas/04%20INSTRUMENTOS%20ODE%20OBSERVACION.pdf>
- Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). *Precision agriculture and food security*. *Science*, 327(5967), 828-831.
- Gilabert, M., Gonzalez-Piqueras, J., & García-Haro, J. (1997). *Acerca de los Índices de Vegetación*. Asociación Española de Teledetección.
- Gitelson, A., & Merzlyak, M. (1994). *Spectral Reflectance Changes Associated with Autumn Senescence of Aesculus hippocastanum L. and Acer platanoides L. Leaves. Spectral Features and Relation to Chlorophyll Estimation*. *Journal of Plant Physiology*, 286-292.
- Goswami, S., Gamon, J., Vargas, S., & Tweedie, C. (2015). *Relationships of NDVI, Biomass, and Leaf Area Index (LAI) for six key plant species in Barrow, Alaska*. PeerJ Preprints.
- Granados, D. (2003). *Mejoras en el proceso de laminado, para una empresa del ramo de confitería*. Puebla, México: Universidad de las Américas Puebla.
- Guaytarilla, P., & Falconí, C. (2014). *Selección por arquitectura de la planta y resistencia a la Antracnosis de 7 Genotipos de Chocho (Lupinus mutabilis)*. Sangolquí, Pichincha, Ecuador: Congreso de Ciencia y Tecnología (ISSN: 1390-4663).
- Gutiérrez, H., & De la Vara, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. McGraw-Hill.

- Gutierrez, M., Branch, J., & Botero, V. (2005). *Clasificación no supervisada de coberturas vegetales sobre imágenes digitales de sensores remotos: "LANDSAT – ETM+"*. Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín, 58(1), 2611-2634.
- Honkavaara, E., Saari, H., Kaivosoja, J., Pölonen, I., Hakala, T., Litkey, P., . . . Pesonen, L. (2013). *Processing and assessment of spectrometric, stereoscopic imagery collected using a lightweight UAV spectral camera for precision agriculture*. Remote Sensing, 5(10), 5006-5039.
- Horton, D. (2014). *Investigación Colaborativa de Granos Andinos en Ecuador*. Quito, Ecuador.
- INEC (Instituto Nacional de Estadísticas y Censo). (2002). *III Censo Nacional Agropecuario*.
- Insuati, M. (2001). *Enfermedades foliares*. En: El Cultivo del Chocho *Lupinus mutabilis* Sweet Fitonutricion, enfermedades y Plagas en el Ecuador. Peralta E y Caicedo C. (Editado).
- Jarrín, L. C. (2014). *Reducción de la infección de antracnosis (Colletotrichum acutatum) en semilla de cinco cultivares de chocho (Lupinus mutabilis) por efecto del calor solar*. (Bachelor's thesis, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Carrera de Ingeniería Agropecuaria.).
- Jauregui, L. (2012). *Instituto de Fotogrametría Facultad Ingeniería*. Recuperado el 05 de 08 de 2018, de Introducción a la fotogrametría: <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/iluis/>
- Jhan, J. P., Rau, J. Y., Haala, N., & Cramer, M. (2017). *Investigation of parallax issues for multi-lens multispectral camera band co-registration*. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 42, 157.

- Karszenbaum, H., & Barraza, V. (2014). *Introducción a la Teledetección Cuantitativa*. Buenos Aires: IAFE CONICET.
- Kumar, S., Röder, M. S., Singh, R. P., Kumar, U., Kumar, S., Joshi, A., & Chand, R. (2016). *Mapping of spot blotch disease resistance using NDVI as a substitute to visual observation in wheat (Triticumaestivum L.)*. *Molecular breeding*, 36(7), 95.
- Lin, W., Zhang, F. C., Jing, Y. S., Jiang, X. D., Yang, S. B., & HAN, X. M. (2014). *Multi-Temporal Detection of Rice Phenological Stages Using Canopy Spectrum*. *Rice Science*, 21(2), 108-115.
- Liu, C. H., Ay, C., Kan, J. C., & Lee, M. T. (2018). *The Effect of Radiative Cooling on Reducing the Temperature of Greenhouses*. *Materials*, 11(7), 1166.
- Meer, F., & Jong, S. (2001). *Imaging Spectrometry*. Remote sensing and digital image processing. Kluwe Academic Publishers, 111-197.
- Melde, D., Wiacek, C., & Braun, P. G. (2016). *Physical decontamination of lupin (Lupinus angustifolius) protein isolates, seeds and flakes: Effects on microbiological status and micellar protein yield*. *LWT-Food Science and Technology*, 66, 651-656.
- Mojica, P., Cuéllar, S., & Medina, C. (2015). *Vehículos aéreos no tripulados, Drones y sus sistemas de comunicación*. CIGEPI.
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments (Ninth Edition ed.)*. John Wiley & Sons.

- Murillo, A., Rivera, M., Peralta, E., Mazón, N., & Vargas, F. (2007). *Avances preliminares en el mejoramiento genético del chocho (Lupinus mutabilis Sweet) para resistencia a la antracnosis*. Memorias del XII Congreso Internacional de Cultivos Andinos, (pág. 26). INIAP, Ecuador.
- Ncube, B., Mupangwa, W., & French, A. (2018). *Precision agriculture and food security in Africa*. Cham: Springer.
- Núñez, L. (2013). *Blog Uv. (U. Veracruziana, Ed.)* Recuperado el 03 de 07 de 2018, de Nociones básicas de luz: <https://www.uv.mx/personal/lenunez/files/2013/06/luz.pdf>
- Ordiales, P. R. (2007). *Prontuario de la Radiación Electromagnética*. Recuperado el 01 de 08 de 2018, de El Escéptico (24): http://www.eeza.csic.es/Documentos/Publicaciones/RadiacionElectromagnetica_Esceptico24.pdf
- Ortega, C. (2015). *Respuesta espectral del cultivo de arroz (Oryza sativa L.) en dos fases fenológicas durante el periodo invernal 2014*. Quito, Ecuador.
- Parrish, J., Murdock, T., Overbey, K., Scott, J., Coleman, W., Stuard, R., . . . Steele, W. (2018). *Plant Breeding, Pest Control, and Remote Sensing to Improve Dark Tobacco Production: Study 3: Normalized Difference Vegetative Index (NDVI) in Tobacco as Affected by Nitrogen Fertilizer Rates*.
- Parrot. (23 de 10 de 2018). *Parrot Sequoia*. Obtenido de <https://www.parrot.com/soluciones-business/profesional/parrot-sequoia#disfruta-de-un-sensor-completamente-autonomo>

- Parry, C., Bronquist Jr, J. M., & Bugbee, B. (2014). *In situ measurement of leaf chlorophyll concentration: analysis of the optical/absolute relationship*. *Plant, Cell & Environment*, 37(11), 2508-2520.
- Peralta, E. (2016). *El chocho en Ecuador “estado del arte”*. Quito, Ecuador.
- Pérez, C., & Muñoz, Á. (2006). *Teledetección: nociones y aplicaciones*. Salamanca.
- Quirós, E. (2014). *Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil*.
- Quishpe, J. (2015). *Informe del Índice de Vegetación NDVI - Bellavista*. Recuperado el 17 de mayo de 2018, de <https://goo.gl/leIpNy>.
- Ramirez, J. S., Basurto, M. S., & Pérez, R. L. (2011). *Caracterización Edafoclimática en regiones agrícolas*. México: Synthesis.
- Ramirez, S. (2015). *El Espectro*. *Conversus*(115), 6,7.
- Rango, A., Laliberte, A., Steele, C., Herrick, J. E., Bestelmeyer, B., Schmutge, T., . . . Jenkins, V. (2006). *Using unmanned aerial vehicles for rangelands: current applications and future potentials*. *Environmental Practice*, 159-168.
- Reeder, R. C. (2002). *Maximizing Performance in Conservation Tillage Systems—an Overview*. In 2002 ASAE Annual Meeting (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Reyes , M. I., Villegas, Á., Colinas, M. T., & Calderón, G. (2000). *Peso específico, contenido de proteína y de clorofila en hojas de naranjo y tangerino*. *Agrociencia*, 34(1).

- Richards, J. A. (2013). *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction (Vol. 5)*. Canberra, Australia: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Richardson, A. D., Duigan, S. P., & Berlyn, G. P. (2002). *An evaluation of noninvasive methods to estimate foliar chlorophyll content*. *New Phytologist*, 153(1), 185-194.
- Rivadeneira, J. (1999). *Determinación de los niveles óptimos de fertilización Química en el cultivo de chocho (Lupinus mutabilis Sweet), en tres localidades de la Sierra ecuatoriana*. Quito - Ecuador: Terranova Editores, Ltda.
- Rueda-Ayala, V., Kunapuli, S., & Maiguashca, J. (2015). *Development of yield prediction models in the maize crop using spectral data for precision agriculture applications*. Ecuador es calidad: *Revista Científica Ecuatoriana*, 16.
- Sánchez, J. A. (2006). *Introducción a la fotogrametría*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid - E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos.
- Santos, A. C. (14 de 07 de 2018). *Espectro electromagnético y espectro visible. Propiedades de la luz*. Obtenido de La luz: https://www.academia.edu/27531243/LA_LUZ?auto=download
- Schröder Group. (2017). *Luz visible*. Recuperado el 01 de 08 de 2018, de www.schreder.com/es-uy/centro-formacion/esencial-alumbrado/visible-light
- Serrano, J., Fábrega, J., Quirós, E., Sánchez-Galán, J., & Jiménez, J. U. (2017). *Análisis prospectivo de la detección hiperespectral de cultivos de arroz (Oryza sativa L.)*. *KnE Engineering*, 69-79.

- Sharma, L. K., Bu, H., Denton, A., & Franzen, D. W. (2015). *Active-optical sensors using red NDVI compared to red edge NDVI for prediction of corn grain yield in North Dakota, USA*. *Sensors*, 15(11), 27832-27853.
- Shetta, N. D., & Areaf, I. M. (2009). *Impact of ultraviolet-C radiation on seed germination and chlorophyll concentration of some woody trees grown in Saudi Arabia*. *Journal of Agriculture and Environmental Sciences*, 8, 1-20.
- Sims, D. A., Luo, H., Hastings, S., Oechel, W. C., Rahman, A. F., & Gamon, J. A. (2006). *Parallel adjustments in vegetation greenness and ecosystem CO₂ exchange in response to drought in a Southern California chaparral ecosystem*. *Remote Sensing of Environment*, 103(3), 289-303.
- Solórzano, R. (2005). *Condiciones Edafo-Climáticas, Morfología y Propagación de las Plantas*. Anzoátegui: INCE.
- Stroppiana, D., Migliazzi, M., Chiarabini, V., Crema, A., Musanti, M., Franchino, C., & Villa, P. (2015). *Rice yield estimation using multispectral data from UAV: A preliminary experiment in northern Italy*. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2015 IEEE International*, 4664-4667.
- Terán, W. (2016). *Pretratamiento de semillas con radiación solar y su efecto en la incidencia de antracnosis (Colletotrichum acutatum) en dos etapas fenológicas de chocho (Lupinus mutabilis)*. Tesis, Universidad de las Fuerzas - Armadas, Departamento de Ciencias de la Vida y de la Agricultura. Sangolquí, Ecuador.

- Thomas, G. J., Sweetingham, M., Yang, H. A., & Speijers, J. (2008). *Effect of temperature on growth of Colletotrichum lupini and on anthracnose*. Australasian Plant Pathology.
- Tognoni, F., & Alpi, A. (1999). *Cultivo en invernadero*. Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa.
- Tucker, C. J. (1979). *Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation*. Remote sensing of Environment, 8(2), 127-150.
- Wang, C., Chen, J., Tang, Y., Black, T. A., & Zhu, K. (2018). *A Novel Method for Removing Snow Melting-Induced Fluctuation in GIMMS NDVI3g Data for Vegetation Phenology Monitoring: A Case Study in Deciduous Forests of North America*. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 11(3), 800-807.
- Williamson, D. F., Parker, R. A., & Kendrick, J. S. (1989). *The box plot: a simple visual method to interpret data*. Annals of internal medicine, 110(11), 916-921.
- Xiang, H., & Tian, L. (2011). *Development of a low-cost agricultural remote sensing system based on an autonomous unmanned aerial vehicle (UAV)*. Biosystems engineering, 108(2), 174-190.
- Xie, Q., Dash, J., Huang, W., Peng, D., Qin, Q., Mortimer, H., . . . Ye, H. (2018). *Vegetation indices combining the red and red-edge spectral information for leaf area index retrieval*. IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing, 11(5), 1482-1493.
- Yzarra, W., & López, F. (2012). *Fases fenológicas del Tarwi*. En Manual de observaciones fenológicas (pág. 61). Lima:.

Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). *The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review*. *Precision agriculture*, 13(6), 693-712.

Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2002). *Precision agriculture—a worldwide overview*. *Computers and electronics in agriculture*, 36(2-3), 113-132.

Zhang, Q. (2015). *Precision agriculture technology for crop farming*. CRC Press.