



Pontificia Universidad Católica del Ecuador

Sede Ibarra

ESCUELA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS Y AMBIENTALES

INFORME FINAL DEL PROYECTO

TEMA:

Detección del área de invasión del helecho haza *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn mediante el uso de drones por técnicas de fotometría y propuesta de prevención y corrección en los sectores delimitados con maleza en la zona de Intag “Las Delicias”.

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE

INGENIERO AGROPECUARIO

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Gestión Sostenible y aprovechamiento de los recursos naturales

GRUPO DE INVESTIGACIÓN:

AGROINNOVA

AUTOR: ANDRÉS SEBASTIÁN BÁEZ GÓMEZ

ASESOR: MGS. DIEGO MEJIA ROMO

Ibarra, diciembre de 2023

Mgs. Diego Mejía

ASESOR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final de investigación, el mismo que se ajusta a las normas vigente en la Escuela de Ciencias Agrícolas y Ambientales (ECAA), de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra (PUCESI); en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

f):  _____

Mgs. DIEGO MEJÍA


C.C.: 1001912961

PAGINA DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL


El jurado examinador, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra (PUCESI):

f):  _____

Mgs. DIEGO MEJÍA
C.C.: 1001912961


f):.....

Maritza Mier Quiroz
C.C:

X 
f):.....

CAYAMBE TERAN JHENNY MARLENE
C.C: 1721122370

ACTA DE CESIÓN DE DERECHOS

Yo, ANDRÉS SEBASTIÁN BÁEZ GÓMEZ, declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 165 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, que manifiesta textualmente: “Se reconoce facultad de los autores y demás titulares de derecho de disponer de sus derechos o autorizar de sus obras o prestaciones, a título gratuito u oneroso, según las condiciones que determinen. Esta facultad podrá ejercerse mediante licencias libres, abiertas y otros modelos alternativos de licenciamiento o la renuncia”.

Ibarra, diciembre de 2023



f): _____

ANDRÉS SEBASTIÁN BÁEZ GÓMEZ

C.C.: 1004064810

AUTORÍA

Yo, ANDRÉS SEBASTIÁN BÁEZ GÓMEZ, portador de la cédula de ciudadanía N° 1004064810, declaro que la presente investigación es de total responsabilidad del autor, y eximo expresamente a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra de posibles reclamos o acciones legales.

f):



Andrés Sebastián Báez Gómez

C.C.:100406481-0

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo: ANDRÉS SEBASTIÁN BÁEZ GÓMEZ, con CC: 1004064810, autor del trabajo de grado intitulado: Detección de área de invasión del helecho haza *Pteridium alquilinum* (L.) Kuhn mediante el uso de drones por técnicas de fotometría y propuesta de prevención y corrección en los sectores delimitados con maleza en la zona de Intag “LAS DELICIAS”., previo a la obtención del título profesional de “Ingeniero Agropecuario” en la Escuela de Ciencias Agrícolas y Ambientales.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tiene la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede- Ibarra, de conformidad con el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de graduación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra a difundir a través de sitio web de la Biblioteca de la PUCESI el referido trabajo de graduación, respetando las políticas de propiedad intelectual de Universidad.

Ibarra, diciembre de 2023



f): _____

Andrés Sebastián Báez Gómez

C.C.:100406481-0

**DECLARACIÓN DE COMPORTAMIENTO ÉTICO EN LA ELABORACIÓN,
DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE TRABAJOS DE TITULACIÓN**

Por medio de la presente declaro conocer y aplicar en la elaboración, desarrollo y evaluación del Proyecto de titulación: Detección de área de invasión del helecho haza *Pteridium aquilinum* (L.) *Kuhn* mediante el uso de drones por técnicas de fotometría y propuesta de prevención y corrección en los sectores delimitados con maleza en la zona de Intag “Las Delicias”, lo propuesto en el Código de Ética de la Investigación y el Aprendizaje de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, aprobado por el Consejo Superior de la PUCE con fecha 11 de mayo de 2021.

Para constancia firma:



f): _____

Andrés Sebastián Báez Gómez

Estudiante que ejecuta el Trabajo de Titulación

C.C/Pasaporte: 100406481-0

Carrera: Ingeniería Agropecuaria

DEDICATORIA

Todo el esfuerzo por el cual he conseguido llegar a la meta se los debo principalmente a mi madre Nubia Edith Gómez Villamagua quien me ha apoyado incondicionalmente frente a los altibajos y a mi abuelita Teresa Villamagua Ochoa quien me ha enseñado los valores claves para poder llegar a ser la persona quien soy.

Por otra parte, quiero dedicar el trabajo a todos mis familiares quienes aportaron su granito de arena para hacer posible esta hazaña, sea moral o complementaria, que nunca fue demás. Debo decir que me siento en deuda, con ustedes ya que me considero gratificado por la ayuda brindada, sin ustedes nada de esto fuese posible.

Y no menos importante a mis amigos, quienes en el camino me enseñaron a que las adversidades solo están quienes en realidad importan más allá de pertenecer a un linaje o considerarse familia, quiero generalizar a todos ellos ya que me faltan palabras para agradecer, sabiendo que nunca se puede esperar nada a cambio solo con ser confidentes y muchas veces grandes guardianes.

Andrés Sebastián Báez Gómez

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a quien considero Dios, a quien me infirió la misión de ser lo que quiero ser y estar donde debo estar, ser más que luz ser un camino de sabiduría que los pone para evolucionar como personas.

Agradezco a mi madre Nubia Edith Gómez Villamagua, quien siempre estuvo desde el inicio hasta el final de mis estudios presente sea moral, económica y complementaria para superar la meta.

Agradezco a mis abuelitas Teresa Villamagua Ochoa y Hermelita Hermosa Galindo quienes fueron mis segundas madres,

INDICE

DEDICATORIA	viii
AGRADECIMIENTOS	ix
INDICE	x
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
ÍNDICE DE ANEXOS	xv
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
CAPITULO I	3
INTRODUCCIÓN	3
CAPITULO II	5
OBJETIVOS	5
2.1. Objetivos	5
2.1.1. Objetivo General:	5
2.1.2. Objetivos Específicos:	5
CAPÍTULO III	6
ESTADO DEL ARTE	6
3.1. Agricultura de Precisión	6
3.2. Aplicaciones en Agricultura de Precisión	7
3.2.1. Georreferenciación en Agricultura de Precisión	8
3.3. Uso de Vehículos no Tripulados “Drones” en Agricultura de Precisión	8
3.4. Operaciones del Vehículo no Tripulado “Dron”	8
3.4.1. Aplicaciones del Vehículo no Tripulado “Dron” en Campo	8
3.4.2. Sensores Multiespectrales en Vehículo no Tripulado “Dron”	9
3.4.3. Técnica de Fotometría: Imágenes Espaciales (Índice de Vegetación)	11
3.4.4. Firma Espectral	12

3.5.	Espectro Electromagnético	12
3.6.	Procesamiento de Imágenes por Software	13
3.6.1.	Procesamiento y Análisis por Software “Agisoft Metashape”	13
3.6.2.	Procesamiento y Análisis por Software “ArcGIS 10.7”	13
3.7.	<i>Pteridium Aquilinum</i> (L.) Kuhn	13
3.7.1.	Clasificación Taxonómica	14
3.7.2.	Impacto en la Agricultura	15
3.7.3.	Impacto Social	15
3.7.4.	Impacto Económico	15
3.8.	Técnicas para controlar la presencia del helecho <i>Pteridium aquilinum</i> (L.) Kuhn	16
3.9.	Estudios en agricultura de precisión	17
CAPÍTULO IV		20
MATERIALES Y METODOS		20
4.1.	Materiales	20
4.2.	Métodos	20
4.2.1.	Ubicación del Área de Estudio.....	20
4.3.	Manejo del experimento.....	22
4.3.1.	Delimitación del Área de Estudio	22
4.3.2.	Planificación y Sobrevuelo del Área.....	22
4.3.3.	Toma de Fotografías	23
4.3.4.	Procesamiento de Imágenes (Orto mosaico u Orto foto)	24
4.3.5.	Detección de Zonas de Invasión Mediante “Clasificación no Supervisada” en ArcGIS 10.7	27
4.3.6.	Procesamiento de Imagen Ráster a Polígono en ArcGIS 10.7	27
4.3.7.	Cálculo de Polígonos en Base de su Clasificación.....	28
4.3.8.	Elaboración de Imagen NDVI.....	29
4.3.9.	Cartografía de la Zona de Invasión Geo Procesada.	30
4.3.10	NDVI: Una Herramienta Clave para el Análisis Espacial	31

CAPITULO V	32
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
5.1. Resultados.....	32
5.1.1. Área total de Incidencia de <i>Pteridium aquilinum</i> (L.) Kuhn.....	32
5.1.2. Análisis Espacial NDVI.....	34
5.2. Propuesta de Intervención.....	35
5.3. Comparación de Costos de Intervención entre Métodos Convencionales vs Agricultura de Precisión.....	36
CAPITULO VI.....	41
CONCLUSIONES	41
CAPITULO VII	42
RECOMENDACIONES	42
CAPÍTULO VIII.....	43
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
ANEXOS	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación taxonómica de *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn..... 14

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 El espectro electromagnético.	12
Figura 2 Ilustración taxonómica de <i>Pteridium aquilinum</i> (L.) Kuhn	14
Figura 3 Imagen referencial del lote de estudio la finca “San Martín”	20
Figura 4 Imagen referencial in-situ en la finca “San Martín” de <i>Pteridium aquilinum</i> (L.) Kuhn.....	21
Figura 5 Cartografía referencial de la zona de estudio en la finca “San Martín”	22
Figura 6 Sobrevuelo in situ con equipo “Mavic DJI 2” - finca “San Martín”	23
Figura 7 Imágenes referenciales capturadas con cámara “Sequoia”	24
Figura 8 Modelo de mosaico: Área de invasión de <i>Pteridium aquilinum</i> (L.) Kuhn.	25
Figura 9 Orto mosaico TOTAL (RGB): Área de invasión de <i>Pteridium aquilinum</i> (L.) Kuhn.	25
Figura 10	26
Figura 11 Orto mosaico TOTAL (RED): Área de invasión de <i>Pteridium aquilinum</i> (L.) Kuhn.....	26
Figura 12 “Clasificación no Supervisada”: Área de invasión de <i>Pteridium aquilinum</i> (L.) Kuhn.....	27
Figura 13 Procedimiento de transformación de ráster a polígono.....	28
Figura 14 Procedimiento de cálculo de área(s) del polígono.	29
Figura 15 Orto mosaico (NDVI-preliminar): Área de invasión de <i>Pteridium aquilinum</i> (L.) Kuhn....	30
Figura 16 Cartografía referencial: Área de invasión (Método: Supervisión no ponderada), finca “San Martín”.....	32
Figura 17 Cartografía referencial: Área de invasión (Método: NDVI), finca “San Martín”.....	34

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Pruebas de muestreo con dron convencional, finca “San Martín”.....	51
Anexo 2 Muestreo definitivo con equipo dron DJI Mavik Pro, finca “San Martín”.....	52
Anexo 3 Muestreo definitivo con equipo dron DJI Mavic 2 con cámara sequoia, finca.....	52
Anexo 4 Capacitación de insumos para control de malezas, empresa “CEREALES DEL NORTE” ..	53
Anexo 5 Capacitación de manejo de equipo agrícola DJI AGRAS T30, empresa “TETCH MALL” ..	53
Anexo 6 Pruebas de irrigación.	54
Anexo 7 Capacitación de manejo de “Drones agrícolas”, empresa “TETCH MALL”	54
Anexo 8 Costos del material de intervención de <i>Pteridium aquilinum</i> (L.) Kuhn.	55
Anexo 9 Distribución geográfica de <i>Pteridium aquilinum</i> (L.) Kuhn.....	56

RESUMEN

La agricultura actual enfrenta varios desafíos, por ejemplo, la creciente proliferación de especies invasoras en los cultivos. Estas pueden mermar cosechas enteras, afectando negativamente la producción y aumentando la necesidad de pesticidas químicos. Además, la agricultura continúa desperdiciando una cantidad considerable de recursos, como agua y productos agrícolas. *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn, es una especie invasora que plantea desafíos significativos en la agricultura. Este no solo se propaga de manera agresiva, sino que también posee propiedades alelopáticas, es decir sustancias químicas que inhiben el crecimiento de otros vegetales cercanos disminuyendo su productividad, como el *Rye grass*, que lucha por sobrevivir en su presencia. El control de esta maleza invasora se convierte en una tarea ardua y costosa para los agricultores, que a menudo necesitan recurrir a una variedad de productos químicos y estrategias para intentar mantenerla a raya. La agricultura de precisión emerge como un recurso esencial para abordar desafíos como la presencia invasiva de especies como *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn. En este contexto, los drones desempeñan un papel destacado al ofrecer servicios de fumigación y teledetección mediante avanzadas técnicas de fotometría. Estos pueden aplicar herbicidas y otros productos fitosanitarios de manera altamente selectiva y precisa, minimizando así la exposición de los cultivos circundantes y reduciendo la necesidad de utilizar químicos en exceso. Además, la teledetección aérea con drones posibilita la detección temprana de problemas en el cultivo. Llevando a cabo un análisis comparativo entre la agricultura de precisión y la agricultura convencional, con el objetivo de evaluar su rendimiento y precisión, corroborando con la literatura actual sobre el tema. Los resultados teóricos obtenidos hasta el momento apuntan claramente hacia la superioridad de las técnicas de agricultura de precisión. La clave de este logro radica en la aplicación de la técnica de fotometría del Índice de Vegetación por Diferencia Normalizada o (NDVI), que ha permitido determinar con precisión el área invadida por el helecho. Según los datos recopilados en la investigación, hemos observado una reducción significativa del 57,51% en los insumos requeridos en comparación con lo que sería necesario en la agricultura convencional.

Palabras clave: Dron; agricultura de precisión; agricultura sostenible; fotometría; *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn

ABSTRACT

Today's agriculture faces several challenges, for example, the increasing proliferation of invasive species in crops. These can deplete entire crops, negatively affecting production and increasing the need for chemical pesticides. In addition, agriculture continues to waste a considerable amount of resources, such as water and agricultural products. *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn is an invasive species that poses significant challenges in agriculture. Not only does it spread aggressively, but it also possesses allelopathic properties, chemical substances that inhibit the growth of other nearby plants and decrease their productivity, such as *Rye grass*, which struggles to survive in its presence. Controlling this invasive weed becomes an arduous and costly task for farmers, who often need to resort to a variety of chemicals and strategies to try to keep it at bay. Precision agriculture emerges as an essential resource to address challenges such as the invasive presence of species like *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn. In this context, drones play a prominent role in providing spraying and remote sensing services using advanced photometric techniques. They can apply herbicides and other crop protection products in a highly selective and precise manner, thus minimizing the exposure of surrounding crops and reducing the need for excessive chemical use. In addition, aerial remote sensing with drones enables early detection of crop problems. A comparative analysis between precision agriculture and conventional agriculture was carried out in order to evaluate their performance and precision, corroborating with the current literature on the subject. The theoretical results obtained so far clearly point to the superiority of precision farming techniques. The key to this achievement lies in the application of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) photometry technique, which has made it possible to accurately determine the area invaded by the fern. According to the data collected in the research, we have observed a significant reduction of 57.51% in the inputs required compared to what would be necessary in conventional agriculture.

Key words: Drone; precision farming; sustainable agriculture; photometry; *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

La detección del área de invasión de *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn descubierta por Thomas Kuhn, es de gran importancia debido a la amplia distribución y capacidad de esta especie para colonizar nuevos hábitats. Es considerada una especie invasora en muchos países, y en Ecuador, se ha encontrado en áreas de bosques húmedos montanos y páramos, incluyendo la zona de Intag "Las Delicias". El uso de drones en la detección de áreas invadidas por *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn ha demostrado ser una herramienta eficaz y eficiente en la identificación de esta especie invasora y de otras (Garg et al. 2021, p. 14). La técnica de fotometría, que implica la medición de la cantidad y calidad de la luz reflejada por la vegetación, ha sido utilizada en estudios anteriores para la detección de *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn (Guzmán & Rodríguez, 2020, p.19). La propuesta de prevención y corrección en los sectores delimitados con maleza en la zona de Intag "Las Delicias" implica la implementación de medidas preventivas, como la eliminación de la maleza y la reforestación con especies nativas, así como la aplicación de medidas correctivas, como la poda y el uso de herbicidas selectivos.

Según el estudio de Guzmán & Rodríguez (2020, p. 30), la detección de áreas invadidas por *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn utilizando drones y la técnica de fotometría resultó en una precisión de más del 90%. Esta técnica también se ha utilizado con éxito en la detección de otras especies invasoras, como el bambú gigante (*Dendrocalamus giganteus*) en India (Garg et al. 2021, p. 6); y la lechuga china (*Lactuca sativa var. angustana.*) en España (Muñoz et al. 2020, p. 3). En términos de medidas preventivas, la eliminación de la maleza y la reforestación con especies nativas ha sido recomendada por varios autores como una estrategia efectiva para controlar la expansión de *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn (Lui et al. 2019, p. 854). Además, la reforestación con especies nativas puede contribuir a la recuperación de la biodiversidad en las áreas invadidas (Deng et al. 2018, p. 33). La poda y el uso de herbicidas selectivos también se han utilizado medidas correctivas para controlar la expansión de *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn. Según un estudio realizado por Zhao et al. (2020, p 32), la aplicación de un herbicida selectivo (triclopyr) resultó en una reducción significativa de la biomasa del helecho. La poda también ha sido recomendada como una medida para controlar la expansión de esta especie invasora en áreas

boscosas (Lui et al. 2019, p. 862). La detección y control temprano de esta es crucial para evitar su expansión y minimizar su impacto en los ecosistemas. Según un estudio realizado por González et al. (2019, p.3), la implementación de medidas de control temprano puede resultar en una reducción significativa en la expansión de especies invasoras.

La invasión de *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn en Cotacachi, Imbabura, es un desafío que amenaza la producción agrícola y la salud del ganado. Esta maleza invasiva ha reducido drásticamente la disponibilidad de *Rye grass*. Además, su propagación descontrolada afecta negativamente a la productividad general (Cueva, 2015, p.5). Para abordar este problema, es crucial un manejo integral. La gestión de materiales y el menor impacto en áreas afectadas son fundamentales. Esto no solo vela la producción agrícola y la salud del ganado, siendo la segunda causa de intervención necesaria al sector agrícola, la ingesta del helecho genera en animales varias afecciones; casos de hematuria y tumores en el sistema digestivo, son unas de las varias preocupaciones que aquejan a los ganaderos ante *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn (Loayza, 2015, p. 3)

La identificación de *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn, pone a prueba el empleo de la tecnología en vanguardia, métodos que actualizan las técnicas ya establecidas en la agricultura, como la fumigación, detección de maleza y enfermedades. Los drones, empleados para supervisar cultivos y detectar malezas, presentan notables ventajas gracias a su capacidad para adquirir imágenes multiespectrales con gran precisión (Olvera et al. 2019, p.7). Los drones se establecen como una herramienta viable y valiosa debido a su eficiencia tanto en términos de tiempo como de precisión (Pino, 2019, p 3). La avanzada tecnología de drones posibilita la detección temprana y precisa de las áreas afectadas por *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn. Esto desempeña un papel esencial en la prevención de su propagación y en la reducción de su impacto en los cultivos y en el entorno ecológico local. Además, estos equipos pueden simplificar otras labores relacionadas, como la planificación de medidas preventivas y correctivas, contribuyendo así a una gestión más efectiva de esta maleza invasiva (Moltoni et al. 2019, p 2).

CAPITULO II

OBJETIVOS

2.1.Objetivos

2.1.1. *Objetivo General:*

- Determinar el área de invasión del helecho haza *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn mediante el uso de dron por técnicas de fotometría.

2.1.2. *Objetivos Específicos:*

- Identificar el área de invasión de *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn, con el uso de imágenes RGB y multiespectrales.
- Diseñar una cartografía de la distribución espacial de *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn y cultivo de pasto con el software ArcGIS 10.7
- Proponer medidas de control con los resultados obtenidos del análisis de las imágenes para optimizar el uso de recursos, comparando los costos de intervención para controlar la incidencia de *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn.

CAPÍTULO III

ESTADO DEL ARTE

La viabilidad de este estudio deriva la importancia de clasificar por medio de una firma espectral las variedades de plantas existentes en el terreno, tomando como ejemplo: Según Rodríguez (2019) “Clasificar fragmentos de las imágenes provenientes del dron en dos grupos: imágenes con mala hierba e imágenes con cultivo de cereal sano.” Donde tomando de premisa ese argumento las firmas espectrales ayudaran a la clasificación de las especies y al área que invade el cultivo de producción, en primera instancia realizar la cartográfica del sitio usando imágenes de alta resolución, uso del sensor para detección de patrones de energía reflejadas como lo menciona Bordón (2018, p. 22), la información recolectada son ondas electromagnéticas propagadas que ayudan a la clasificación (Brito & López, 2018), esto se aplicará diversas técnicas como: operaciones de binarización, detección de bordes, operación de cierre, disminución de ruido, etiquetado de regiones, cálculo del área de la maleza” con el fin de precisar el trabajo. (Leo, 2015; Villacís, 2017).

Para ello lo que se quiere lograr es detectar las firmas espectrales del cultivo de *Rye grass* y también del helecho *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn para determinar el área de invasión y que medidas deberemos tomar.

3.1. Agricultura de Precisión

Refiere a agricultura de precisión a la aplicación de insumos correctos, en el momento adecuado y en el sitio exacto. Generalmente se asocian con el uso de la tecnología, y esta se aplica para la obtención de información esencial de manejo de suelos y cultivos que se encuentran en un lote. De otra manera la agricultura de precisión (AP) involucro a los sistemas de posicionamiento global (GPS), y de otras tecnologías que se asocian para la obtención de datos, estas permiten obtener información de manera precisa de igual manera satisface las exigencias de la agricultura moderna como el manejo óptimo de extensiones, teniendo una ventaja en el análisis de los resultados de forma detallada. El uso de las tecnologías de la agricultura de precisión (AP), ayuda a la mejora de márgenes, a través del aumento representativo de rendimiento, cantidad o calidad; así mismo en la reducción de insumos o ambos de forma simultánea (Flego, 2008).

3.2. Aplicaciones en Agricultura de Precisión

Según el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, IICA (2016) "La ciencia y tecnología deberán combinarse para ser parte de la transformación que necesita la agricultura, la conjunción entre el razonamiento científico y la unión de tecnologías y la innovación nos presentan existente una agricultura más conforme a los desafíos que enfrentamos: la de exactitud". De igual manera que este conjunto de técnicas sea desarrollado para optimizar el uso de los insumos agrícolas (semillas, agroquímicos y fertilizantes) acorde a la viabilidad espacial y temporal de la producción agrícola. Las tecnologías aplicables como menciona Kogut (2020) en la (AP) son:

- **Tecnología de tasa variable (VRT):** Se denominan a las tecnologías o los procedimientos que posibilitan al agricultor mantener el control de la proporción de insumos aplicables con exactitud. Esta tecnología de la (AP) usa programas informáticos especializados en el área, controladores, además un sistema de posicionamiento universal diferencial (DGPS). Prácticamente existen 3 enfoques para la (VRT): manual, con base en mapas o datos de sensores.
- **Muestreo de suelo con GPS:** Son procedimientos que incluyen la tecnología GPS dentro de la (AP) para reconocer los niveles de nutrientes, valores de pH y otros parámetros del muestreo de suelo de diferentes regiones, para la toma de decisiones rentables. Estos datos recogidos del muestreo se utilizan para el cálculo de la tasa variable para la optimización de la siembra y fertilización.
- **Aplicaciones informáticas:** Se apoyan en los GIS, la (AP) puede acoplar aplicaciones que desarrollen planes precisos de explotación agrícola, mapas de campo, investigación de cultivos, mapas de rendimiento y para conceptualizar con exactitud la porción crítica de insumos que tienen que aplicarse en los campos. Entre los beneficios está la probabilidad de generar una estrategia de explotación agrícola que respete el medio ambiente, lo cual ayuda a minimizar los costes e incrementar el rendimiento. Por otro lado, estas aplicaciones dan datos de costo limitado que no tienen la posibilidad de aplicarse a resoluciones de agricultura de gran exactitud gracias a la inviabilidad de integrar los datos conseguidos en otros sistemas auxiliares.
- **Tecnología de observación remota:** La teledetección y la AP posibilitan que se combinasen para centrarse en los factores que puede estresar un cultivo en un momento

crítico o evaluar con exactitud la proporción de humedad en el suelo. Dichos datos se obtienen desde drones y satélites.

3.2.1. Georreferenciación en Agricultura de Precisión

La georreferenciación consiste en el conjunto de procedimientos que se necesita para el posicionamiento espacial de un sitio, mediante la localización geográfica exacta que es definido por un sistema de coordenadas, de esta manera se logra localizar el predio mediante un sistema de información geográfica (GIS) referenciando cada punto espacial en un mapa de manera precisa. El desarrollo de estos mapas referenciales permite dotar de información invaluable para realizar un levantamiento de: linderos, vías de acceso, sistemas de riego y zonas afectadas con problemas de enfermedades o malezas. Muchas de las aplicaciones que tienen estas tecnologías en campo, son valiosas para el agricultor, ya que estas permiten y posibilitan planear y realizar varias acciones con resultados más precisos y confiables (Frattini, 2019).

3.3. Uso de Vehículos no Tripulados “Drones” en Agricultura de Precisión

La integración de tecnologías para el desarrollo de la actividad agraria es una realidad, sin embargo, existen varias opciones al momento de desarrollar una actividad en campo, esto principalmente se enfoca en 2 tipos de trabajo, tanto como el uso en grandes extensiones y predios de menor tamaño (Frattini, 2019).

La versatilidad del uso del dron ha permitido obtener avances significativos en el campo, algo que la georreferenciación terrestre no lograba, Estos permiten el uso de técnicas como la fotometría multiespectral e hiperespectral para el análisis de un cultivo, obteniendo información como: Deficiencia de nutrientes, problemas en riego, problemas de plagas, etapas de crecimiento. Etc. Además estas técnicas permiten generar índices de vegetación, las mismas que conocen la salud de las plantas (NDVI), estado de compactación de suelos, contabilizar el número de plagas por hectárea y establecer modelos de riego eficientes con cámaras térmicas (Frattini, 2019).

3.4. Operaciones del Vehículo no Tripulado “Dron”

3.4.1. Aplicaciones del Vehículo no Tripulado “Dron” en Campo

- **Agricultura:** El uso de instrumentos tecnológicos que acompañan a los vehículos no tripulados ha permitido realizar modelos tridimensionales de predios, usarlos para

planificación y monitoreo de cultivos en producción, gestiones de fertilización y riego, detección y control de plagas-enfermedades, deficiencias nutricionales, avances en los cultivos, cosechas selectivas, modelos de riego y drenaje, o cambios en los cultivos que son imperceptibles para el ojo humano. Parte de los instrumentos usados en los drones son los sensores o cámaras infrarrojas, las cuales permiten el desarrollo de un sinnúmero de aplicaciones como las ya mencionadas anteriormente.

- **Forestal:** Permite la observación y conteo de un sinnúmero de especies arbóreas, medición y conteo de árboles, monitoreo de bosques, planificación forestal, caracterización de uso de tierras, identificación de especies, estrés hídrico, estado fitosanitario, entre otros.
- **Desastres naturales:** Uso para la obtención de datos de zonas damnificadas por desastres naturales como: terremotos, tsunamis. etc. Estos pueden acceder fácilmente a zonas inaccesibles, permitiendo el monitoreo y evaluando el daño, sin poner en riesgo, así mismo permite elaborar mapas a partir de la información recolectada de las zonas de riesgo, rutas de suministro y ubicación de estructuras damnificadas.
- **Vida silvestre:** Logra identificar la ubicación de un animal, con el fin de monitorear el comportamiento, su distribución, su hábitat, población y uso de recursos.
- **Recursos hidrográficos:** Monitoreo de corredores de los ríos, estimar una extensión de crecida de un río, morfología de ríos, erosión de riberas.
- **Geología:** Ofrece una gran variedad de ventajas, gracias a la accesibilidad del dron y las tecnologías que incorporan, permitiendo el cálculo de superficie terrestre, afloramientos, parámetros de superficies, formas del terreno, obtención de ortofotografías y modelos topográficos de alta resolución y precisión que permiten conocer los procesos geológicos. (Bonilla et al. 2020).

3.4.2. Sensores Multiespectrales en Vehículo no Tripulado “Dron”

Existe una gran variedad de sensores que pueden ser usados en los vuelos de un dron para la adquisición de datos, entre estos destacan 2 tipos de sensores: Denominados como “activos”, como los LIDAR; RADAR; radio detección y los denominados pasivos, aquellos que incluyen cámaras RGB, de infrarrojo cercano (NIR), térmicas y combinaciones entre multiespectrales e hiperspectrales.

- **Sensores RGB:** los sensores de luz visible permiten captar imágenes perceptibles por el ojo humano, además de que los sensores RGB (Red, Green, Blue) usados en drones son capaces de capturar imágenes en alta resolución. Según, el sensor RGB se usa para hacer tareas de inspección visual, modelos de altura del lote y conteo de plantas.
- **Sensores infrarrojos:** La (IR) o radiación infrarroja se emite mediante una fuente de calor y se propaga de forma idéntica a la luz. El espectro infrarrojo cubre longitudes de onda más grandes al Tecnología en Marcha, espectro de luz visible que engloba de 400 a 800 nm. Ejemplificando el infrarrojo cercano, NIR, entre 780 nm a 2500 nm e infrarrojo lejano, FIR, entre 15 μm a 1000 μm . Las fronteras entre lo visible y el NIR, en un extremo, y entre el FIR y las microondas no son exactas y permanecen abiertas a diferentes interpretaciones. Según la zona espectral del NIR representa donde se crea la reflectancia de la planta, siendo de esta forma fundamental para la exploración de la vegetación en las aplicaciones agroforestales, debido a que una vez que una planta está sana y en constante incremento la producción de energía desde la fotosíntesis reflejará más la zona del NIR.
- **El infrarrojo cercano (NIR):** Usados para identificar características de los suelos de manera remota como, estudios de humedad y estrés por deficiencia de nutrientes. Además, es viable aprender características más complicadas como el sector superficial específica, el contenido de carbono orgánico y la hidrofobicidad.
- **Sensores multiespectrales - hiperspectrales:** Los sensores multiespectrales son capaces de dividir el espectro electromagnético en cantidades o escasas bandas espectrales (baja resolución espectral), los sensores hiperspectrales puede registrar centenares de bandas contiguas en distintas magnitudes del espectro electromagnético (alta resolución espectral), permitiendo de esta forma obtener más grande grado de detalle en la curva del comportamiento espectral de gran proporción de coberturas o recursos de la extensión de la tierra para conseguir con más exactitud su identificación. En el sector de los recursos naturales el procesamiento de imágenes hiperspectrales posibilita estimar la degradación y salinidad de los suelos, hacer estudios de patrones espectrales de coberturas y especies vegetales asociados a características fisiológicas y estructurales de las plantas, así como componentes del medio ambiente, fenológicos y antropogénicos. Asimismo, permiten obtener mediciones de follaje y cobertura, de parte de radiación fotosintéticamente activa, trabajo de modelos de radiación del dosel vegetal y el cálculo de índices de vegetación;

permitieron el desarrollo de índices de características fisiológicas vegetales como vigor, senescencia y estado hídrico, así como la identificación de tipos específicos de coberturas y especies vegetales, plagas y patologías, y zonas propensas a incendios que no son probables mediante imágenes multispectrales.

- **Sensores LIDAR (Light Detection and Ranging):** Es un sistema el cual mide la distancia del sensor a un punto en el predio, desde el tiempo que tarda el relámpago de luz en conseguir el suelo y retornar al sensor en el VANT, el cual cuenta con la capacidad para obtener una serie de puntos de vista del lote y sus coordenadas. En el campo forestal, los sensores LIDAR tienen la posibilidad de usar en superficies de plantaciones para estimar el volumen de madera y el diámetro del tronco y, además, es viable aprender la estratificación vertical de la vegetación y la biomasa.
- **Sensores especializados:** ya que la tecnología de los drones es cada vez más accesible, se han realizado estudios en diferentes zonas donde fue viable integrar sensores especializados. usaron sensores especiales para la detección de gases contaminantes en la atmósfera, mientras tanto que además colocaron a bordo sensores especializados para identificar gases presentes a lo largo de una actividad eruptiva. Además, se ha informado la utilización de artefactos especializados para la toma de datos meteorológicos a bordo de drones. (Bonilla et al. 2020, p.4).

3.4.3. *Técnica de Fotometría: Imágenes Espaciales (Índice de Vegetación)*

- **Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada o (NDVI):** Estima la salud de las plantas con base a la luz del infrarrojo cercano (NIR) reflejada
- **Índice de clorofila de borde rojo o (ReCI):** detecta la clorofila y, por consiguiente, la función de fotosíntesis
- **Diferencia Normalizada del Borde Rojo o (NDRE):** además detecta la clorofila, sin embargo, es eficaz en los periodos media y tardía
- **Índice de Vegetación Ajustado al Suelo Modificado o (MSAVI):** controla las primeras fases del desarrollo de las plantas para supervisar las condiciones de los cultivos
- **Índice de Humedad de Diferencia Normalizada o (NDMI):** explica el grado de estrés hídrico del cultivo.

Según Kogut (2020) estos son las técnicas de fotometría de índice de vegetación.

Firma Espectral

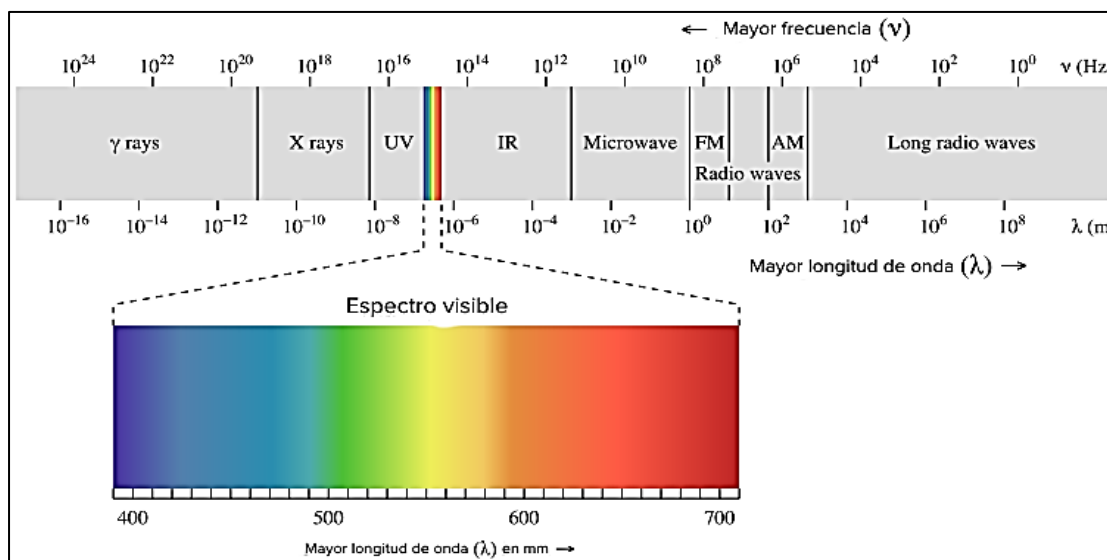
Hacen referencia a un perfil específico de radiación de objetos reflectantes en la superficie terrestre, los valores obtenidos son determinados en función la temperatura, textura e inclusive del tipo de objeto que se muestrea. Gracias al mapeo realizado por los drones, podemos distinguir objetos por medio de firmas espectrales, con dicha información se puede elaborar mapas de análisis como “usos de suelos o de elementos en suelos” (Matellanes, 2017, p. 20).

3.5. Espectro Electromagnético

Son el conjunto de “longitudes de onda” perceptibles de todas las radiaciones electromagnéticas, estas se pueden clasificar y ordenar de acuerdo con la longitud de su onda como de su frecuencia, detalladas como: rayos gama, rayos X, rayos UV, luz visible, radiación infrarroja (IR) y ondas electromagnéticas. (Khan, 2016).

Figura 1

El espectro electromagnético.



Nota: Tomado de Khan (2016).

3.6. Procesamiento de Imágenes por Software

3.6.1. *Procesamiento y Análisis por Software “Agisoft Metashape”*

Según Aurífero Informática (2021) el programa Agisoft Metashape se define como un producto de software autónomo que permite el procesamiento fotogramétrico de contenido fotográfico digital y así mismo genera datos espaciales en 3D para el uso en aplicaciones SIG. Dentro del paquete de herramientas del programa contamos con: Triangulación fotométrica, creación de nube de puntos densa, modelos de elevación digital, exportación de orto mosaicos georreferenciados, medidas de distancias, medidas aéreas, medidas de volumen, puntos de control en tierra, levantamiento topográfico, personalización del flujo de trabajo, Procesamiento multispectral, modelado 3D y 4D, armado de panorama en 360 grados y red de procesamiento.

3.6.2. *Procesamiento y Análisis por Software “ArcGIS 10.7”*

Según Instituto de Investigación de Ciencias Ambientales o por sus siglas en inglés ESRI (2021) el programa ArcGIS es un conjunto de herramientas interactivas que permite al usuario desarrollar un sinnúmero de proyectos mediante aplicaciones dentro del paquete del programa. Atribuyendo a la posibilidad de poder georreferenciar imágenes, análisis de imagen, análisis de espacio, análisis geoestadístico y modelado 3D. Esto permite una clasificación de imágenes, clasificaciones de píxeles u objetos segmentados segmentándolos de forma automática o paramétricas, entre otras aplicaciones de análisis de superficies.

3.7. *Pteridium Aquilinum (L.) Kuhn*

También denominado mayoritariamente como “helecho águila”, es una especie que se originan en los territorios de Europa, América y Asia oriental, quien habita en zonas desde los 0 a 2900 m.s.n.m. dependiendo del sitio de distribución; frecuentan suelos profundos y bien drenados hasta zonas arenosas o suelos ligeramente silíceos. (Naturalis, 2021).

Es un helecho perenne y con un rizoma subterráneo muy bien desarrollado de al menos 1 metro de profundidad, con un follaje vistoso y grande de hasta 2 metros, siendo una especie cuatripinada. Esta se reproduce mediante esporas y rizoma. (Olguín, 2017, p. 19)

3.7.1. Clasificación Taxonómica

Tabla 1

Clasificación taxonómica de Pteridium aquilinum (L.) Kuhn

CLASIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
Reino:	Plantae.
Filo:	Tracheophyta
División:	Pteridophyta
Clase:	Pteridopsida
Subclase:	Polypodiidae
Orden:	Pteridales
Suborden:	Dennstaedtiineae
Familia:	Dennstaedtiaceae
Género:	<i>Pteridium</i>
Especie:	<i>aquilinum</i>
Nombre Científico:	<i>Pteridium aquilinum (L.) Kuhn</i>
Nombre común:	Helecho águila, helecho hembra, helecho espada amarilla, ocopetate, chipe, yogo, haza. etc.

Nota: Adaptado de *Pteridium aquilinum* var. *Aquilinum* por iNaturalis, 2021, (<https://ecuador.inaturalist.org/taxa/338100-Pteridium-aquilinum-aquilinum>)

Figura 2

Ilustración taxonómica de Pteridium aquilinum (L.) Kuhn



Nota: Tomado de (Naturalis, 2021)

Esta especie contiene varias biotoxinas como el PTA o ptaquilósido siendo una de las principales, presente en helechos del género *Pteridium*, puede causar problemas graves en la ganadería, como hematuria enzoótica en el ganado y contaminar la leche, afectando a los consumidores. Además, esta biotoxina debilita el sistema inmunológico de los bovinos, lo que puede facilitar infecciones como el virus del papiloma. También se ha relacionado con ceguera en ovejas y el desarrollo de cáncer de esófago y gástrico en seres humanos que viven en áreas donde crecen estos helechos. (Rodríguez & Chacón , 2023, p. 4)

3.7.2. *Impacto en la Agricultura*

- **Impacto en la vegetación:** Los taninos, sesquiterpenos, polifenoles y flavonoides suelen considerarse como posibles alelo-químicos del género *Pteridium*. Esto hace que este helecho no solo invada el espacio de otras especies, sino que también agotan nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo, potasio y luz necesaria para el crecimiento. A diferencia de otras plantas, los helechos no necesitan restringir su población en presencia de otros ejemplares, lo que puede tener un impacto en el ecosistema.
- **Impacto en los rumiantes:** Al consumir estos especímenes con la presencia de ptaquilósido o PTA causa intoxicación en el ganado bovino, presentando principalmente sintomatología como hematuria (sangre en la orina), fiebre y tumoraciones en vejiga (Ramos et al. 2012, p. 3).

3.7.3. *Impacto Social*

Según Rodríguez & Chacón (2023) el ptaquilósido o PTA, presente en helechos, representa una amenaza para la salud humana y animal. Puede inducir al cáncer al reducir la viabilidad celular y promover la apoptosis en células gástricas. Además, las esporas inhaladas pueden causar daño genético en diversas células, incluyendo las gastrointestinales. (p. 8)

3.7.4. *Impacto Económico*

Al afectar tanto animales, plantas y seres humanos por igual estima un alto impacto económico. Tal como lo mencionado por Mira, et al. (2021), aun que se sabe las consecuencias que la especie trae consigo, como pérdida de área o cobertura vegetal, muerte de animales (bovinos, ovinos y

caprinos) y a su vez la intoxicación y/o muerte de un ser humano, también trae pérdidas económicas por las antes mencionadas. (p. 2)

3.8. Técnicas para controlar la presencia del helecho *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn

Según la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CARC, 2020) establece que *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn, es considerada como una de las especies vegetales invasoras más exitosas del mundo, donde ya se han realizado diversos estudios para establecer medidas de control para el manejo del helecho, al ser una especie altamente agresiva y diferentes respuestas al estrés sometido. Para ello se plantean diversas técnicas: Control químico, mecánico, biológico e integrado. Donde deben tener un seguimiento y monitoreo adecuado. Para lo que establece que, el control cultural con mayor efectividad es atreves de la sombra, ya que es más difícil desenterrar los rizomas del suelo.

Control mecánico:

- Según la información recopilada de Echeverri (2018), “en el caso del control de especies invasoras, es necesario una intervención para una restauración pasiva de la vegetación mediante la sucesión natural del área degradada, en el caso del helecho *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn, el control más efectivo radica en el corte de 2 – 3 veces al año, sin embargo, se estima que se gastan millones de dólares en esfuerzos por controlar a estas especies, no obstante, muchas veces son poco efectivos.” (p. 19)

De tal manera que según Borges (2017) en su nota técnica afirma que, el control por macheteo obtuvo que los daños post - implementación fueron a los 30 días del 66,1% del daño porcentual foliar, a los 60 días decrece hasta los 37,3% y a los 90 días los 24,2%. (p. 5)

- Por otra parte, como menciona Polanco (2007) si la extensión del terreno es de grandes dimensiones, se propone el uso del tractorado, de tal forma que actúe de forma uniforme en todo el terreno, como el uso de arado/labrado como un recurso óptimo.

Control químico:

- Según Borges et al. (2017) en su estudio informa que realizó pruebas en un espacio total de 720 m², con una división de 4 unidades experimentales de 180 m² y subdivididas en 3 subparcelas de 60 m², con el fin de contemplar la efectividad de los siguientes productos:

(1.) Metsulfuron – metil: 10 g/ha, (2.) Glifosato: 4 L/ha, (3.) Metsulfuron – metil + glifosato: 10 g/ha + 4 L/ha, (4.) Picloram + 2,4-D amina: 1.5 L/ha. De los siguientes se supo la efectividad en un intervalo de tiempo de 30/60/90 días que Metsulfuron – metil tuvo un daño porcentual del 76,3 %, mientras la combinación de Metsulfuron – metil + glifosato tuvo un daño porcentual del 81,4%. De manera individual el glifosato tuvo un daño porcentual del 61,9% obteniendo el tercer lugar en torno a su efectividad con respecto al daño total producido en las frondes. Por otra parte, el Picloram + 2,4D amina con total de daño foliar que varía entre el 57,6 y 68 % prometiendo un rango aceptable, donde además actúa netamente en *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn y no compromete a los pastizales, esto debido a que es un herbicida de hojas anchas. (p. 5)

Control mixto (químico + mecánico):

- Según Borges et al. (2017) concluye que, el producto Metsulfuron-metil presenta una alta efectividad para controlar el helecho, así mismo este promete no comprometer a las gramíneas forrajeras presentes en el terreno, por lo que luego de su uso, se uniformiza a través del macheteo como control complementario para regular conjunto las poblaciones de *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn. Esto garantiza a largo plazo reducir el número de aplicaciones manuales. (p. 5)

3.9. Estudios en agricultura de precisión

Este proyecto se basó en una sólida revisión bibliográfica que abarcó una amplia gama de temas pertinentes a la investigación en cuestión, titulada “*Detección del área de invasión del helecho hazza *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn mediante el uso de drones por técnicas de fotometría y propuesta de prevención y corrección en los sectores delimitados con maleza en la zona de Intag “Las Delicias”*”.

Uso de drones y procesamiento de imágenes como alternativa para erradicar maleza.

El enfoque y premisa de esta investigación se centra en encontrar una alternativa eficaz para eliminar las malezas en los campos de cultivo de arroz. Se basa en el análisis de

imágenes capturadas por drones, estas se procesan y obtienen información del lugar exacto para intervenir, esto ofrece una ventaja significativa en términos de eficiencia y rapidez al identificar con precisión las malezas y facilitar su erradicación en la agricultura (Aldana, 2020).

Uso de drones para combatir y vigilar cultivos

Las políticas de la Unión Europea recomiendan restringir el uso de herbicidas a áreas específicas en campos de cultivo identificadas mediante satélites, pero esto plantea limitaciones en términos de resolución y practicidad. Para abordar este desafío, se financiaron equipos de drones con fondos europeos para estudiar cultivos como girasoles, maíz y olivos, entre otros. Estos drones resultaron ser más eficientes que los métodos anteriores. Los datos recopilados se clasificaron en función del grado de infestación de malezas, con un impresionante 86% de precisión en los estudios. El proyecto TOAS, responsable de este estudio, busca reducir los costos agrícolas en un rango del 15% al 35% y disminuir el uso de fitosanitarios en un 20% al 30% (CORDIS, 2016)

Uso de la IA (inteligencia artificial) en el manejo integrado de malezas

Se presentó como una idea entre los años 90 y 2000 que se tome en cuenta la forma implementar un método de detección que permitiese un muestreo integro para la detección de malezas, sin embargo, esto represento un desafío, no hasta el año 2016 comenzó a solventarse, dando modelos de IA mucho más eficientes, no solo en su precisión, sino en su implementación, coste y manufactura. Con esto un conjunto de desarrolladores en comunidad ayudaron construir lo que hoy en día se usa y quizás en un futuro se pueda mejorar. Entre ellos barras de localización de malezas, robots de navegación autónoma y drones para el muestreo de malezas. Pese que los modelos ya establecidos conjunto a la tecnología presente, aun puede llegar a ser más eficiente y precisa, pudiendo llevar a un reconocimiento de malezas temprano, esta misma trabaja en conjunto la IA e investigadores que permiten integrar una información precisa (León et al. 2020).

Optimización financiera mediante el uso de drones en cultivos extensivos de arroz.

El uso de alternativas como el uso de nuevas tecnologías y métodos de implementación al área agropecuaria, permite no solo que la producción avance y prospere, sino que esta misma reduzca el impacto ecológico, económico y temporal. El lineamiento del uso de fumigación por drones prevalece principalmente por el ajuste tanto de insumos, tiempo y precisión correlacionándolos con métodos ya establecidos en la industria, como avioneta o irrigación manual. Es importante resaltar que los resultados del experimento demuestran de manera satisfactoria que la utilización de drones en la fumigación de cultivos no solo es más eficiente en tiempo, sino que también ofrece un ahorro significativo en insumos y tiene un impacto ambiental menor, al comparar la fumigación con avionetas y drones en una extensión de 12,2 ha, se logró un ahorro del 4,67% y del 17,57%, respectivamente, en comparación con la fumigación manual. Estos hallazgos destacan que los drones son una alternativa más rentable, especialmente en cultivos extensivos. (Maldonado & Reyes, 2023)

Drones de fumigación en plantaciones bananeras en la provincia del Guayas en servicio.

Como menciona Barrera y Vallejo (2018) consideran los impactos negativos al medio ambiente y al humano, a su vez satisfaciendo las exigencias al sector agrícola, emerge la idea de proporcionar este tipo de servicios a productores en general, incluyendo aquellos quienes tienen 10 ha o menos, con el fin de reducir el impacto a la salud de estos agricultores, sea por exposición de estos productos directa o indirectamente. Llevando a cabo un negocio que provea de esta técnica en particular, generar una asesoría integral, gestionar los residuos de malezas, agroquímicos y reducir el impacto socioambiental. Mediante un modelo integral de negocio que propone un extra hacia los productores cuya producción es menor a las 10 ha ofreciéndoles a los mismos el servicio a un valor menor al propuesto en el mercado, de 10 dólares a tan solo 16 dólares, 4 dólares por debajo del promedio que se oferta en la actualidad en la zona, junto a una asesoría y diagnóstico al predio.

CAPÍTULO IV

MATERIALES Y METODOS

4.1. Materiales

Físicos:

- Cámara fotográfica
- Postes referenciales
- Dron Mavik DJI 2 (Equipado con cámara RGB y Multiespectral)
- Ordenador

Programas de análisis

- ArcGIS 10.7
- Agisoft Metashape - trial 2.0.2 – licencia gratuita de 30 días

4.2. Métodos

4.2.1. Ubicación del Área de Estudio

La investigación se ejecutó en la zona de “Las Delicias” ubicada en la parroquia “Plaza Gutiérrez”, del cantón “Cotacachi”, provincia Imbabura del Ecuador. Ubicada geográficamente en las coordenadas $0^{\circ}21'37.2''N$ $78^{\circ}26'48.2''W$ o (latitud: 0.3604275 y longitud: -78.4479028) con una altitud de 2540 msnm.

Figura 3

Imagen referencial del lote de estudio la finca “San Martín”



Nota: Imagen referencial del lote de estudio, con características irregulares que no permiten el paso de maquinaria como tractores y/o instrumentos como un aguilón por tener una pendiente pronunciada que imposibilita el paso.

4.2.2. Identificación de *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn

Una vez delimitada el área de estudio, se emprendió una investigación exhaustiva para identificar la especie invasora conocida localmente como helecho haza o macho. Esta búsqueda detallada proporcionó la descripción precisa de este helecho, basada en la información recopilada. De acuerdo con los datos de Naturalis (2021), esta especie se encuentra distribuida en todos los continentes, excepto en la Antártida. Su característica más destacada radica en las hojas cuatripinadas, y se destaca por su alta invasividad y notable tolerancia al estrés, como señalan Rodríguez & Chacón (2023), debido a sus propiedades alelopáticas y características inherentes al género. Además, gracias a la información proporcionada por Naturalis (2021) sobre su distribución geográfica, se sabe que esta especie se extiende por todo el Ecuador.

Figura 4

Imagen referencial in-situ en la finca “San Martín” de Pteridium aquilinum (L.) Kuhn



Sarauz (2021) añade información valiosa al revelar que la distribución de esta especie abarca desde el norte de la provincia de Imbabura hasta el sur de Pichincha. Esto resalta la importancia de ciertas especies utilizadas en el conocimiento ancestral. Además, se confirma que esta especie se encuentra en altitudes que oscilan entre los 2540 y 2900 metros sobre el nivel del mar (Naturalis, 2021).

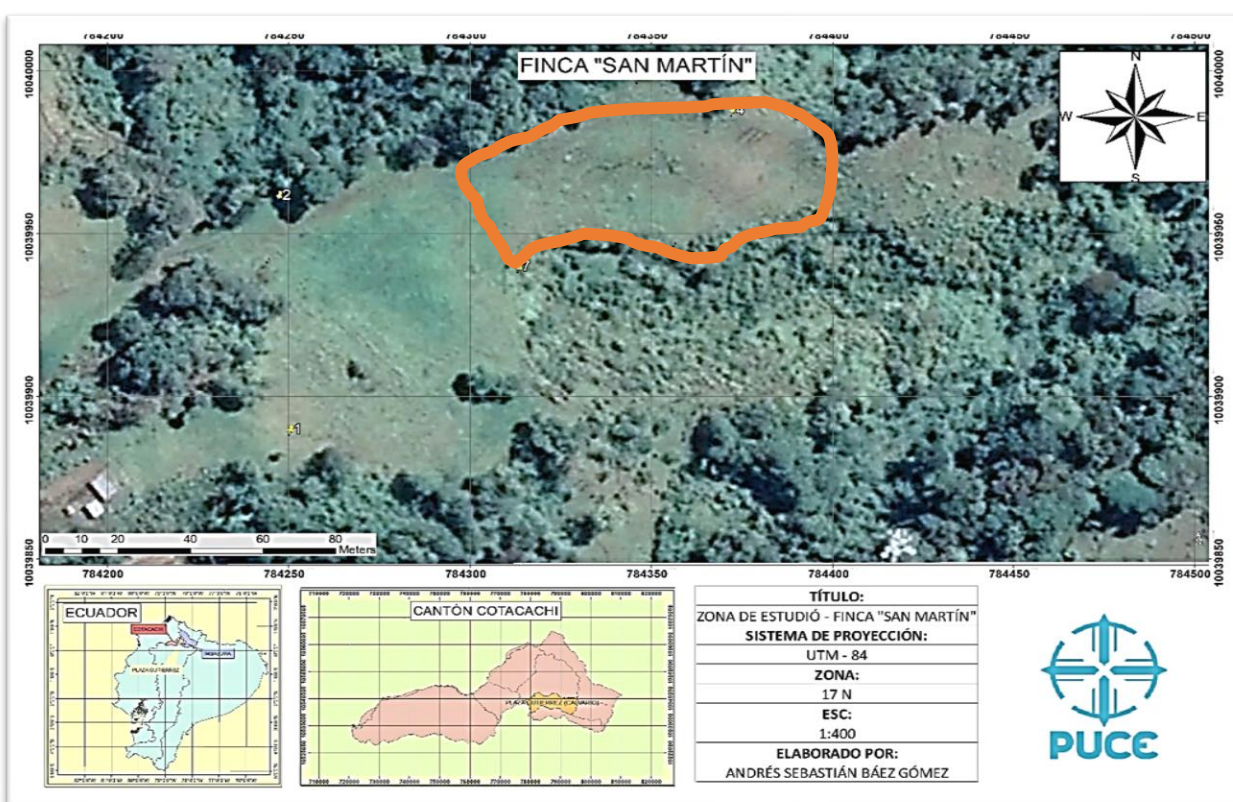
4.3. Manejo del experimento

4.3.1. Delimitación del Área de Estudio

Se seleccionó el área de estudio de una topografía irregular de 0,346 ha, el cual presenta alta incidencia de *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn en un sembrío de *Rye grass* perenne, el cual representa un peligro para los animales (bovinos) de la zona de producción si se llegase a consumir, y a su vez incide en la competencia de espacio y alimento del pasto sembrado.

Figura 5

Cartografía referencial de la zona de estudio en la finca “San Martín”



Nota: Una vez delimitada la zona de estudio se estableció coordenadas para la planeación del recorrido con el equipo dron, para llevar a cabo el sobrevuelo de la zona. Google Earth (2023)

4.3.2. Planificación y Sobrevuelo del Área

Mediante el software del equipo “Mavic DJI 2” se estableció las coordenadas en formato KML del programa Google Earth, esto nos permite la planificación previa del vuelo mediante la georreferencia, donde se tomó en cuenta las condiciones climáticas del día, (contando

principalmente con una buena cantidad de luz y libre de posible lluvia o neblina), subsecuente se procedió a la calibración de la distancia de vuelo debido a la cantidad de obstáculos que representaba un peligro para el equipo.

Figura 6

Sobrevuelo in situ con equipo “Mavic DJI 2” - finca “San Martín”



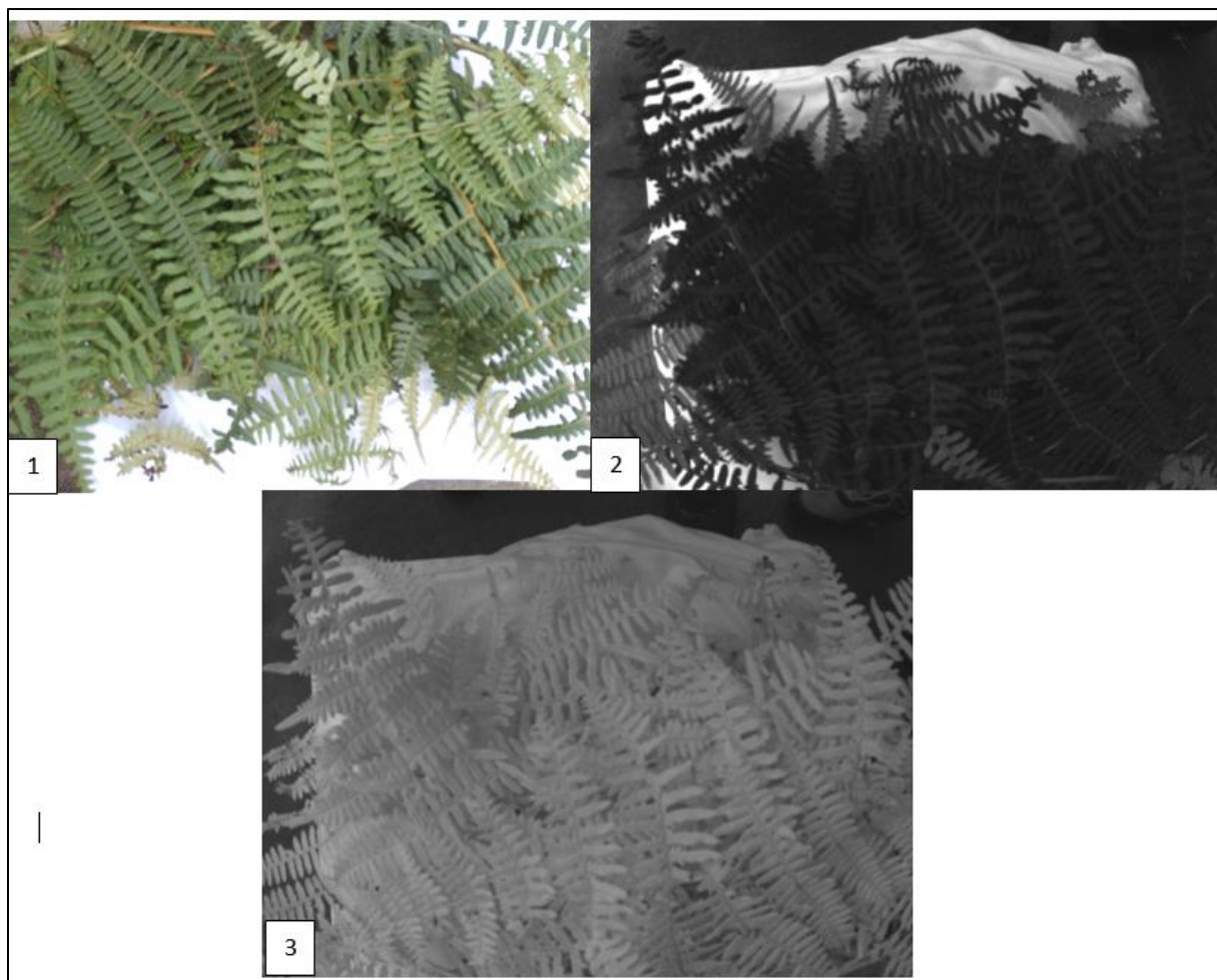
4.3.3. Toma de Fotografías

Una vez calibrado el equipo, se puso en marcha el sobrevuelo definitivo de la zona de estudio, con un total de 378 fotografías referenciadas de la zona a distintas alturas, con el fin de que la calidad del mapa de estudio sea lo más preciso y nítido para el siguiente procedimiento.

Contando a su vez el acople de la cámara multiespectral, la cual toma de forma simultánea las fotografías ya referenciadas al igual que la cámara RGB del equipo, tomando un total de 421 fotografías en 5 bandas en total (GREN, NIR, RED, REG Y RGB), de las cuales se ocuparán para el procedimiento las imágenes del espectro NIR y RED.

Figura 7

Imágenes referenciales capturadas con cámara “Sequoia”



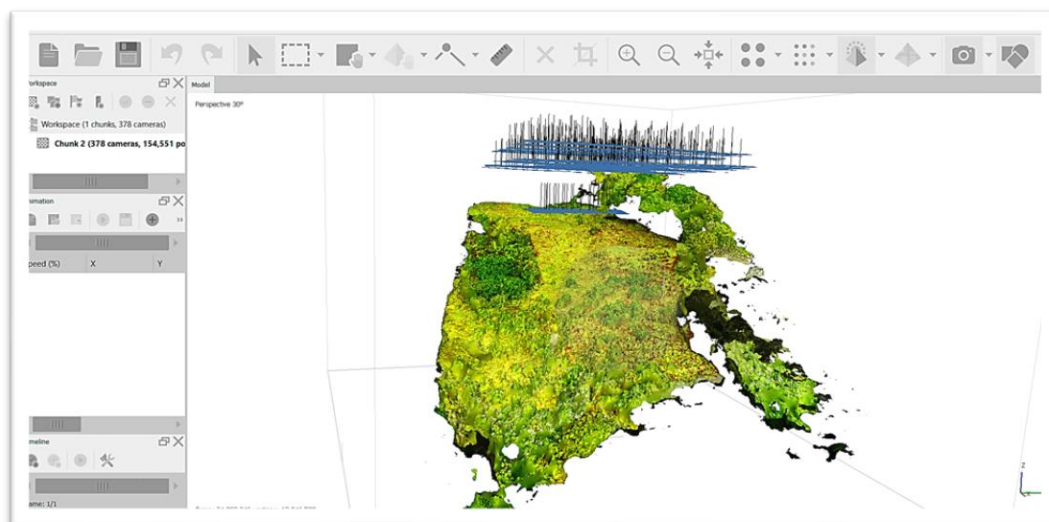
Nota: (1) Imagen RGB, (2) Imagen RED, (3) Imagen NIR. Elaboración propia

4.3.4. Procesamiento de Imágenes (Orto mosaico u Orto foto)

Mediante el uso del programa “Agisoft Metashape TRIAL- 2.0.2” se procesó el total de 378 fotos RGB para la obtención de la unión de todas las imágenes captadas, con el fin de conseguir un retrato general del terreno mediante la fusión de las fotografías (Lo que se denomina un orto mosaico u orto foto) generándose en formato TIF.

Figura 8

Modelo de mosaico: Área de invasión de Pteridium aquilinum (L.) Kuhn.



De igual forma, se procesaron las fotografías con las distintas bandas multispectrales, las cuales “Agisoft Metashape TRIAL” las clasifiqué por bandas, de las cuales se obtuvo los respectivos orto mosaicos, de las cuales fueron necesarios usar las ortofotos con bandas NIR y RED.

Figura 9

Orto mosaico TOTAL (RGB): Área de invasión de Pteridium aquilinum (L.) Kuhn.

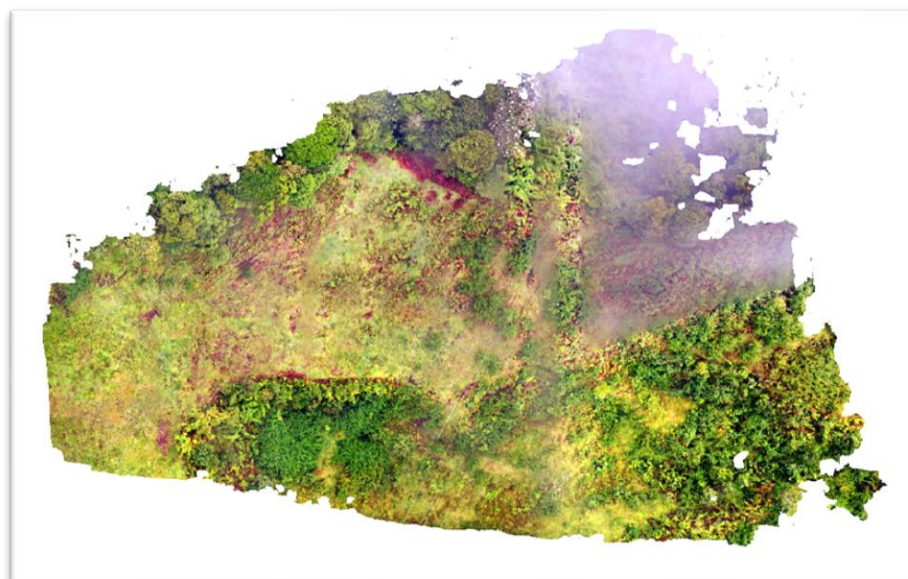
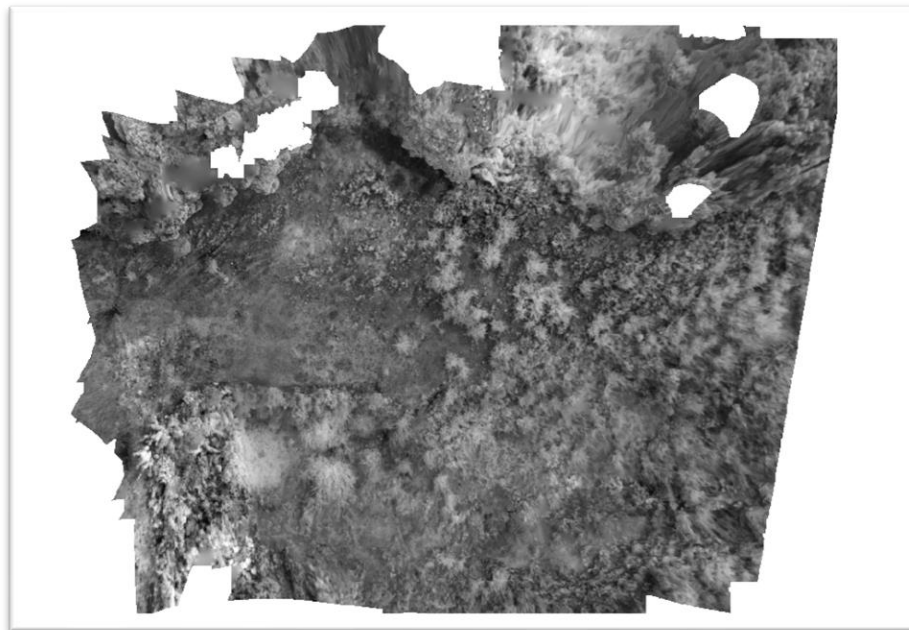
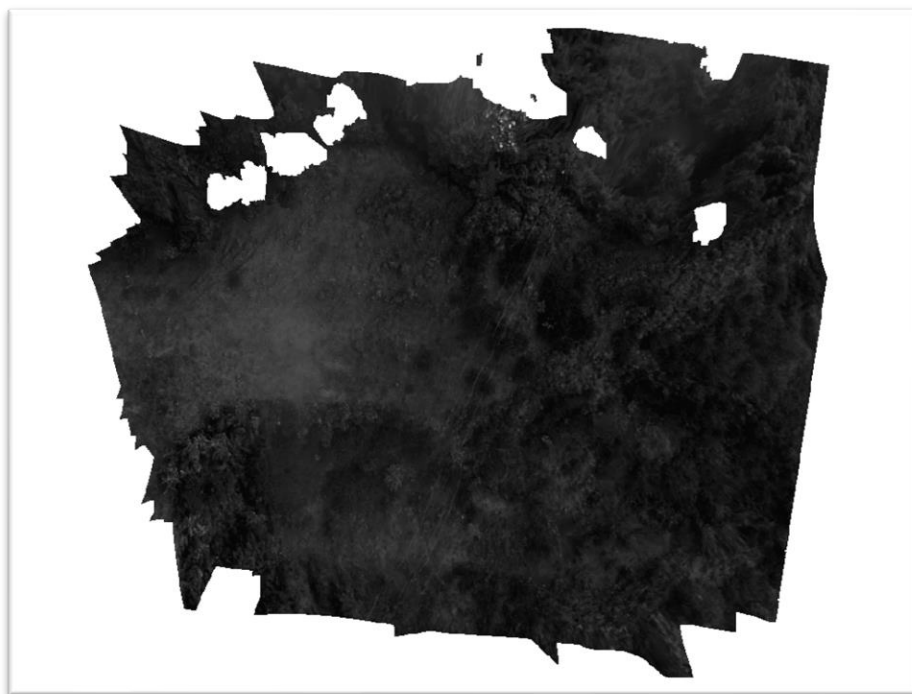


Figura 10

Orto mosaico TOTAL (NIR): Área de invasión de Pteridium aquilinum (L.) Kuhn

**Figura 11**

Orto mosaico TOTAL (RED): Área de invasión de Pteridium aquilinum (L.) Kuhn

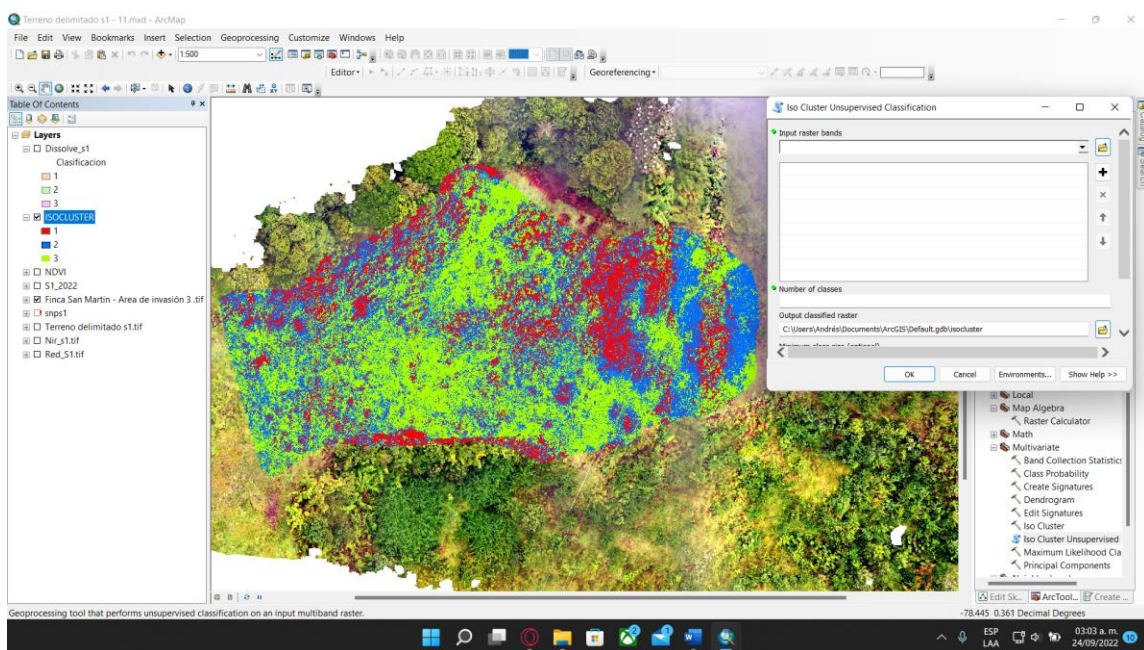


4.3.5. *Detección de Zonas de Invasión Mediante “Clasificación no Supervisada” en ArcGIS 10.7*

Se elaboró un área delimitada precisa de la zona de estudio, para lo cual se usó un recorte del orto mosaico, allí mediante las herramientas de ArcGIS 10.7 se estableció la zona UTM en el espacio con el sistema métrico internacional de unidades; Es aquí donde comenzó el proceso denominado “Clasificación no Supervisada” donde según el foro de ESRI (2022) establece que es una herramienta la cual combina las funciones de “Clúster ISO” y “Clasificación de máxima verosimilitud”, donde se genera un ráster clasificado con un archivo de firma.

Figura 12

“Clasificación no Supervisada”: Área de invasión de *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn



Una vez terminado, el resultado es una imagen clasificada por bandas de colores, representando una característica establecida por el algoritmo del programa, para lo cual se establecieron 3 clases de estos 3 clústeres desarrollados por dicha herramienta, los cuales son: área de *Rye grass*, área de *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn y área de otros especímenes.

4.3.6. *Procesamiento de Imagen Ráster a Polígono en ArcGIS 10.7*

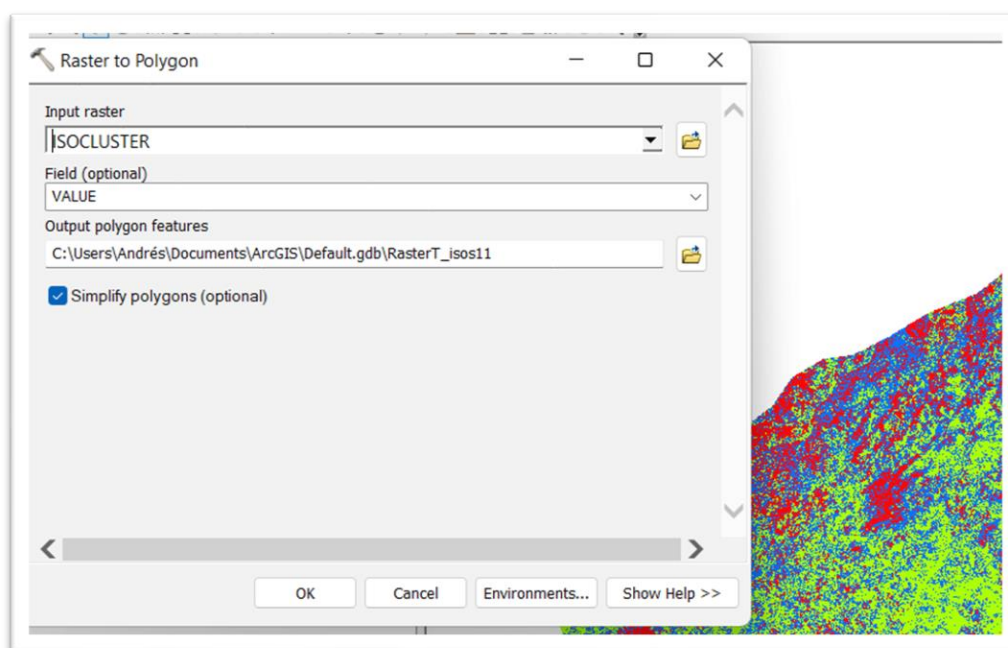
Una vez se obtuvo la imagen categorizada por la técnica de “Clasificación no Supervisada”, se realizó la vectorización de la imagen hacia polígonos cuya principal característica es que sea medible, mediante el uso de la herramienta “Ráster a Polígono” donde según el foro de ESRI

(2022) indica que se usa para convertir un data-set ráster en entidades de polígono, donde puede tener cualquier tamaño dentro de la celda y debe tener un data-set válido.

Lo que quiere decir que cada píxel transformado tendrá una magnitud que depende de la georreferencia y tamaño de cada clasificación que se obtuvo anteriormente. Luego se usó la herramienta “Dissolver” donde según el foro de ESRI (2022), explica que sirve para la agregación de entidades basadas en ciertos atributos específicos, esto puede ayudar a resumir o describir atributos en campos más simples. Donde al final se obtuvo la información resumida en solo 3 campos unificados de todos los polígonos de cada clase.

Figura 13

Procedimiento de transformación de ráster a polígono.

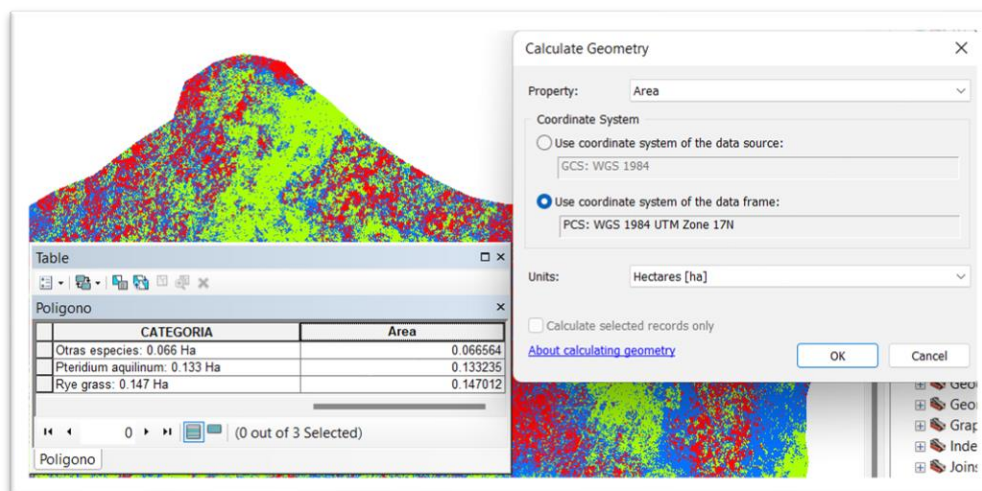


4.3.7. Cálculo de Polígonos en Base de su Clasificación.

Mediante la información obtenida por los 2 procesos anteriores: “Clasificación no Supervisada” y “Procesamiento de Imagen ráster a polígono”; se obtuvo un total de 3 campos para los cálculos correspondientes a sus magnitudes, donde cada polígono se encuentra categorizado a un atributo en específico, los cuales son: *Rye grass*, *Pteridium aquilinum* (L.) *Kuhn* y otros especímenes. Aquí se usó la información de la tabla de atributos del shape para el cálculo en hectáreas, mediante la calculadora geométrica del ArcGIS 10.7.

Figura 14

Procedimiento de cálculo de área(s) del polígono.



4.3.8. *Elaboración de Imagen NDVI*

Para corroborar la información obtenida con la base de datos de la “Clasificación no Supervisada”, se realizó el cálculo de NDVI de la zona de estudio, donde diferencia mediante la actividad fotosintética de las plantas, en este caso se usará para diferenciar las zonas de invasión con las zonas de *Rye grass*, ya que las mismas presentan una actividad diferencial que corrobora con el área obtenida de los procesos anteriores.

Según el Instituto de Investigación de Sistemas Ambientales o en inglés ESRI (2022) el índice diferencial de vegetación normalizado o NDVI, permite generar una imagen que muestra el verdor, también conocida como una biomasa relativa, aprovechando el contraste de características de 2 bandas de un data-set multiespectral, que es la absorción de pigmento en clorofila (Banda Roja) y la reflectividad del material de plantas en una banda infrarroja cercana (NIR). Mediante la formula:

$$NDVI = \frac{(NIR - BANDA ROJA)}{(NIR + BANDA ROJA)}$$

Para el proceso se requirió 2 imágenes que representen imágenes con las bandas que se desee obtener, usando las ortofotos con las bandas NIR + RED de la zona, se logró obtener la

clasificación por NDVI del área de estudio. Usando la herramienta de “Calculadora de ráster” con el siguiente comando.

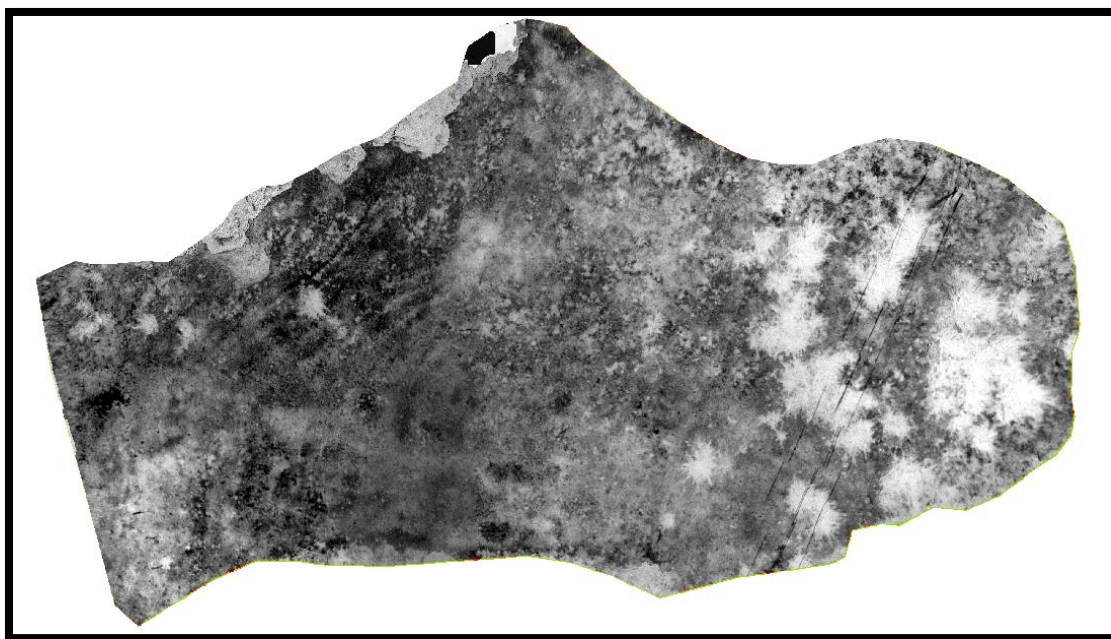
$$\text{NDVI} = \text{Float} (\text{Band } 5 - \text{Band } 4) / \text{Float} (\text{Band } 5 + \text{Band } 4)$$

4.3.9. Cartografía de la Zona de Invasión Geo Procesada.

Se realizaron las cartografías correspondientes del área de invasión e índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI), con sus respectivos campos de estudio de interés.

Figura 15

Orto mosaico (NDVI-preliminar): Área de invasión de Pteridium aquilinum (L.) Kuhn.



La realización de una cartografía precisa y detallada de la distribución espacial de especies vegetales es un proceso fundamental en la gestión y conservación de ecosistemas. De esta manera, se llevó a cabo un análisis exhaustivo del espacio utilizando el Índice Diferencial de Vegetación Normalizada o (NDVI) como una herramienta esencial para la identificación y evaluación de la vegetación en un área específica.

4.3.10. NDVI: Una Herramienta Clave para el Análisis Espacial

El NDVI es un indicador que utiliza la información de las bandas del infrarrojo cercano y el rojo en imágenes satelitales para cuantificar la densidad de la vegetación en una región determinada. Este índice proporciona una representación numérica de la salud y densidad de la vegetación, permitiendo la detección de cambios significativos en la cobertura vegetal a lo largo del tiempo.

Detalles del Análisis

El análisis del NDVI en la zona de estudio arrojó tres resultados cruciales que representan la distribución espacial de especies vegetales clave. Estos resultados se centran en las siguientes especies:

- **Rye grass:** Se identificó de forma definida *Rye grass* en ciertas áreas de la región, lo que sugiere una presencia significativa de esta especie en esos puntos específicos. Esta información es fundamental para la gestión de pastizales y la toma de decisiones en la agricultura y la ganadería.
- ***Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn:** El análisis del NDVI también reveló la presencia del Helecho macho en varias zonas de la zona de estudio. Esto es de interés particular debido a la capacidad invasiva de esta especie y su impacto en los ecosistemas locales.
- **Otras Especies Vegetales:** Además de *Rye grass* y *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn, se identificaron varias otras especies vegetales en la zona de estudio. Estas especies pueden variar desde árboles hasta arbustos y plantas herbáceas. La cartografía detallada permitió una identificación precisa de estas especies, lo que será esencial para futuros proyectos de conservación y restauración.

Previsualización de los Resultados

Nuestros hallazgos se reflejarán de forma implícita en mapas detallados que mostrarán la distribución de las especies vegetales, destacando áreas con mayor presencia de *Rye grass*, *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn y otras. Estos mapas serán fáciles de interpretar y útiles para futuras acciones de conservación. En resumen, el análisis espacial de especies vegetales mediante NDVI y cartografía es esencial en la investigación y gestión de ecosistemas, con importantes implicaciones para la toma de decisiones y la planificación futura en la región de estudio.

CAPITULO V

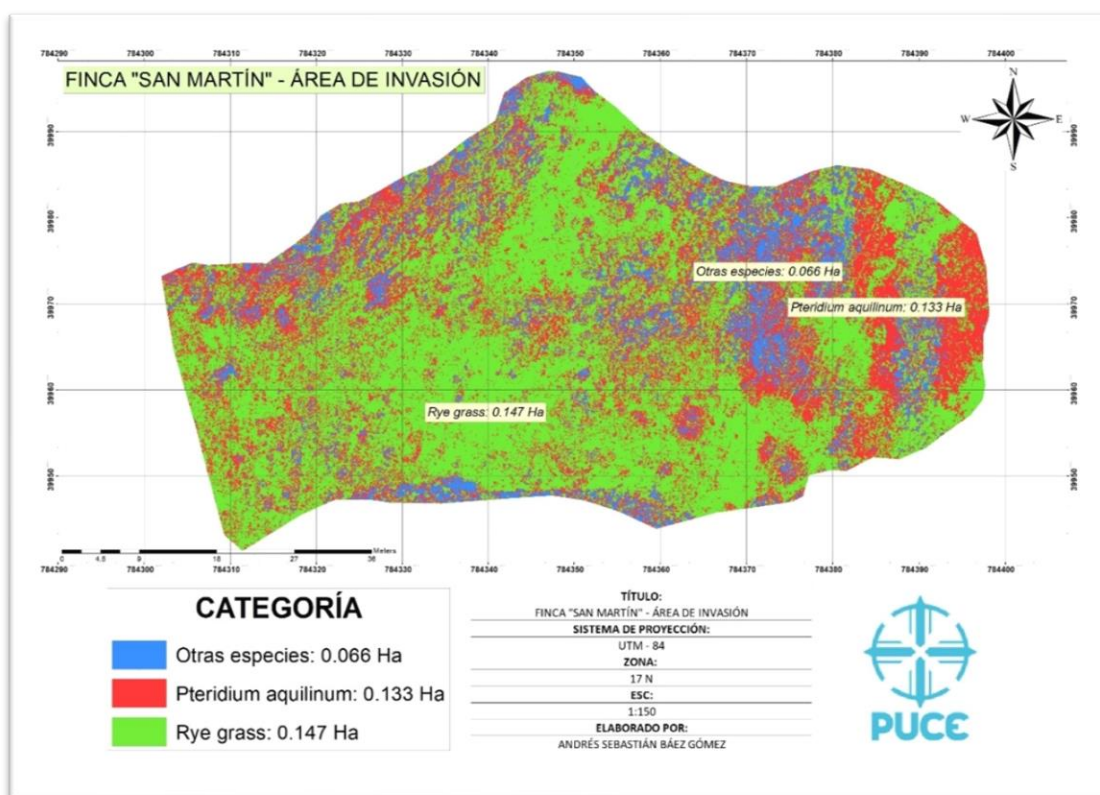
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Resultados

5.1.1. Área total de Incidencia de *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn

Figura 16

Cartografía referencial: Área de invasión (Método: Supervisión no ponderada), finca “San Martín”



Nota: La Figura 16 muestra el área de invasión de *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn, mediante la técnica de “Supervisión no ponderada” detalla las 3 zonas distintivas la cuales fueron delimitadas por el algoritmo del software “ArcGIS 10.7”. Estas son: Área azul: otras especies con 0.066 ha. Área roja: *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn con 0.133 ha. Área verde: *Rye grass* con 0.147 ha. Por lo que se aprecia en porcentaje *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn representa un 38.43% del terreno, 0.147 ha de *Rye grass* perenne equivalente al 42.48% y 0.066 ha son pertenecientes a otro tipo de especies equivalente al 19.07%, y restante.

Dentro del análisis espacial y las herramientas proporcionadas por ARCGIS 10.7; la interpretación propia de la técnica como menciona ESRI (2022) que indica la clasificación de máxima verosimilitud, genera una firma la cual se interpreta en un dataset como una herramienta propia para el control de parámetros de clasificación, así mismo como crea un archivo de firmas que se pueden usar para una clasificación futura, valiéndose de los algoritmos de agrupamientos que intentan construirlos.

En contexto del análisis podemos reforzar el propio análisis para un control de malezas como plantea Montenegro y Parada (2015) la principal ventaja que presenta la clasificación no supervisada – ISO cluster puede usarse para aprender y clasificar cultivos y malezas si así se desea, el autor afirma también que esta técnica puede refinarse conjunto con técnicas que asimilen la información dentro de una base de datos, describiendo los bloques generados, obteniendo un análisis de resultado con mayor precisión, puesto que la técnica aprende de los algoritmos, es clave destacar las condiciones en el cual se someterá el muestreo. (p. 35)

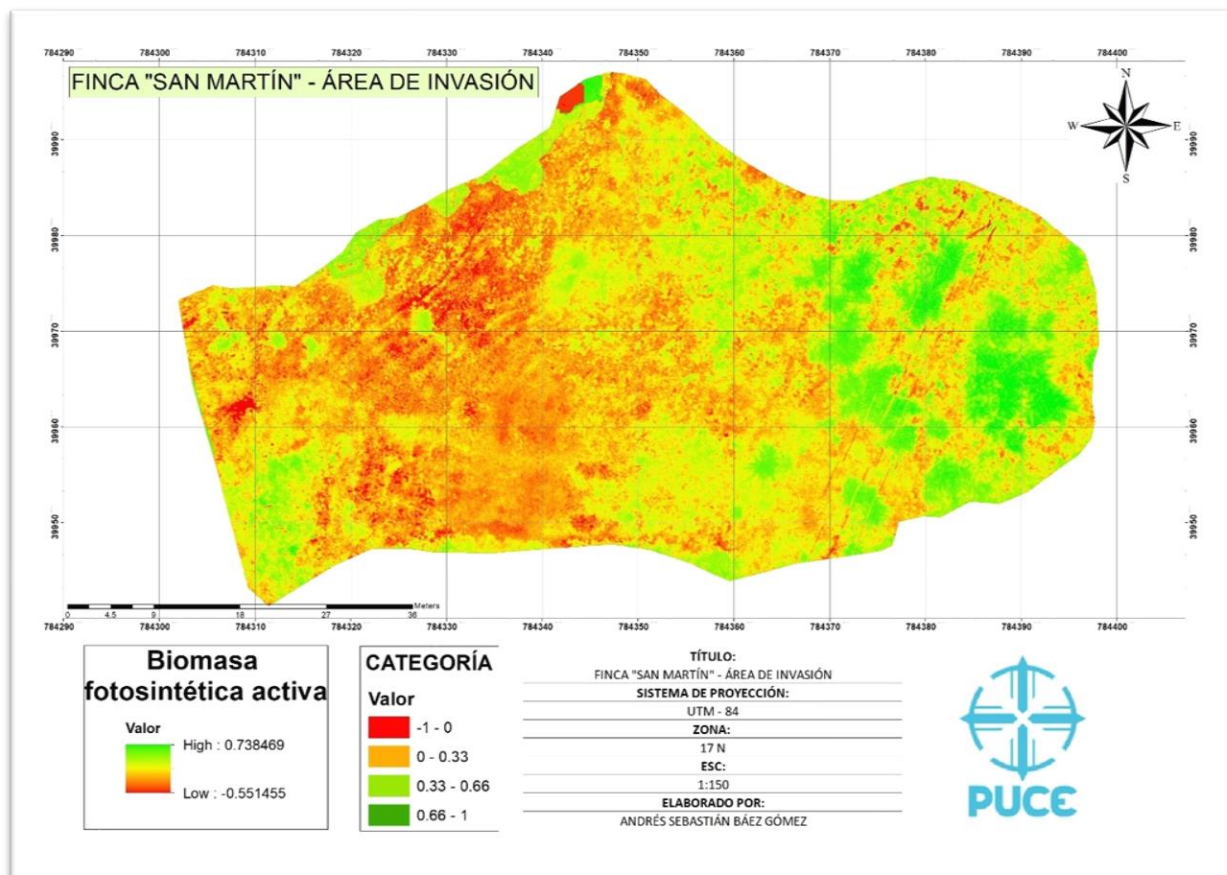
En contraste a los datos obtenidos, los modelos o planteamientos por modelos de inteligencia artificial las cuales usan una combinación de metodologías para varios tipos de maleza y cultivos, en este caso particular destaca el hecho que su muestreo fue de 3 parámetros frente a los planteados como mínimo de ESRI (2022) que son 2 mínimos y máximo 20. Según León et al. (2022) estas pueden tener una capacidad de predicción de un mínimo 80% y con un máximo de 96%.

De igual forma la manera de crear un plan de prevención, manejo y control de *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn como menciona Franco, et al. (2019) enfoca actividades tales como la distribución espacial de la especie y el potencial invasivo que tiene en un territorio delimitado, identificar los puntos de dispersión de la especie, evaluar distintos métodos para erradicar el helecho, son las principales enfoques destinados a la investigación de *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn. (p. 32)

5.1.2. Análisis Espacial NDVI

Figura 17

Cartografía referencial: Área de invasión (Método: NDVI), finca "San Martín".



Nota: El Índice Diferencial de Vegetación Normalizada (NDVI) es una técnica ampliamente utilizada para evaluar la salud y la densidad de la vegetación en un área determinada.

Las categorías representan en función de la cantidad de luz reflejada en las bandas de infrarrojo cercano (NIR) y rojo (RED) en imágenes satelitales o de drones. Los valores de NDVI se expresan en una escala que oscila entre -1 y 1.

- **Valores Negativos (-1 a 0):** Esta área, representada en tonos de rojo en el mapa, indica una "zona con vegetación escasa" o incluso la "ausencia de vegetación". En el contexto de *Pteridium aquilinum*, esta área puede estar dominada por esta especie debido a su propiedad alelopática, que inhibe el crecimiento de otras plantas (ESRI, 2022).

- **Valores Positivos (0 a 0.66):** Esta área se muestra en tonos intermedios y podría ser donde la presencia de *Pteridium aquilinum* está aumentando o donde otras especies vegetales coexisten en condiciones menos favorables. La vegetación en esta zona puede estar en transición debido a la influencia del helecho teniendo una explicación debido al ser un área no tratada y abandonada contrastando con los datos que menciona Gaona (2009) que esta especie suele tomar lugar en abundancia cuando no existe competencia sea por algún fenómeno natural o causado, siendo el primero puesto que el terreno no ha sido tratado con anterioridad y se lo abandonó.
- **Valores Altos (0.66 a 1):** En esta área, representada en verde oscuro en el mapa, se encuentra una "zona con vegetación saludable". Aquí, la vegetación prospera y está en un estado óptimo. Estas áreas pueden ser resistentes a la dominancia de *Pteridium aquilinum* debido a la presencia de especies como arbustos, árboles u otros vegetales que tienen una mayor tolerancia a las propiedades alelopáticas del helecho (Álvarez et al. 2006)

5.2. Propuesta de Intervención

Si tomamos en cuenta que el total de ha o m² en las cuales se encuentra presente *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn con relación al terreno restante, poco más de la tercera parte la cual estará destinada a un posible tratamiento para su erradicación, sin embargo, para ello debemos tener en cuenta los costos de aplicación y la efectividad de estos, tomando en cuenta que los productos se adquirirán en base a dosis por ha para 1 año en periodos de 6 meses.

En base a lo propuesto por Borges et al. (2017) se menciona que el tratamiento en combinación de Metsulfuron – metil + glifosato tuvo un daño porcentual del 81,4% en el periodo de 6 meses, mayor a la de los demás tratamientos, esto sumado a que para uniformizar el área de invasión propone el uso del macheteo como control mecánico complementario al ya propuesto, con el fin de reducir el número de aplicaciones.

En el caso de Metsulfuron – metil de nombre comercial “Sulfón” es un herbicida sistémico de carácter post emergente, el cual es selectivo para maleza de tipo hoja ancha, este se absorbe mediante las raíces y el follaje hasta lograr transportarse en el ápice de estas (ADAMA, 2021).

Mientras el Glifosato de nombre comercial “Glisolat” se considera como un herbicida de alto espectro, sistémico de carácter post emergente, el cual tiene a ser de absorción foliar e inhibe los procesos de producción de aminoácidos necesarios para la síntesis de proteínas (Del Monte, 2019).

Sabiendo que se quiere preservar en gran medida los pastos de la zona, el tipo de aplicación tendrá un carácter de selección manual, que garantice que no afecte en gran medida al pasto de la zona, a esto sumado el uso de VANT´S o drones los cuales permitirán una mejor irrigación del producto y de manera precisa en el caso hipotético si se desea controlar a *Pteridium aquilinum* (L.) *Kuhn*, tal y como menciona Murillo (2019) esto tiene una ventaja de un menor impacto ambiental debido al carácter de aplicación.

5.3. Comparación de Costos de Intervención entre Métodos Convencionales vs Agricultura de Precisión.

Cuando se consideran los costos de intervención en agricultura de precisión, como el uso de drones para mapeo y fumigación, se observa una reducción significativa en el gasto de insumos. En comparación con las técnicas tradicionales, como el uso de aguilonos, se puede notar un uso excesivo de agua en estas últimas. Por ejemplo, en el caso de los drones de fumigación, se utilizan solo 20 litros versus los 200 litros utilizados en el aguilón, lo que representa una eficiencia de consumo de agua y concentración de ingredientes activos del 90% mayor (Murillo, 2019).

Además, el uso de drones con fines de teledetección contribuye aún más a la reducción de costos cuando se combinan ambas técnicas. Esto se debe a que, al contar con información precisa sobre la ubicación de la invasión, es posible dirigir la irrigación específicamente hacia las áreas afectadas. Por ejemplo, en un proyecto donde se identificaron 0,346 hectáreas de terreno, de las cuales 0,133 hectáreas están invadidas por *Pteridium aquilinum* (L.) *Kuhn* y 0,066 hectáreas por otras especies (Figura 16), el área total de maleza asciende a 0.199 hectáreas. Tal como lo menciona Murillo (2019), si un dron puede irrigar a razón de 20 litros por hectárea, aplicando esta técnica se obtendría el siguiente resultado.

- **Primer caso (control químico total de especies ajenas a *Rye grass*):**

$$\frac{1ha}{0,346 ha} * \frac{20 L}{X} = 6,92 L$$

Estos 6.92 L se irrigaría en toda la zona de estudio, sin embargo, tomamos en cuenta que tenemos georreferenciado el terreno y estos equipos funcionan bajo coordenadas, las cuales pueden precisar de mejor manera las zonas a las cuales deseamos acceder, para ello tenemos:

$$\frac{0,346 ha}{0,199 ha} * \frac{6,92 L}{X} = 3,98 L$$

Estos 3,98 L son el total de producto que se necesita para las zonas de invasión, si tomamos en cuenta la eficiencia y reducción de material irrigado en el experimento contamos con:

$$\frac{6,92L}{3,98L} * \frac{100\%}{X} = 57,51(\% \text{ total irrigado}) - 100 (\% \text{ ahorro}) = 42,49\%$$

Esto nos quiere decir que tenemos un ahorro considerable de insumos por ha de un total de 42.49 % si llevamos a cabo estas 2 técnicas de agricultura de precisión.

Criterio técnico: Tomando de base la evaluación de Borges et al. (2017) a criterio de la efectividad, si utilizamos (Metsulfuron – metil + glifosato) erradicando el 81,4% a 90 días de plazo, usaríamos las siguientes cantidades:

Metsulfuron – metil: 10 g/ha

$$\frac{10 \text{ galones}}{X} * \frac{1ha}{0,199 ha} = 1,99 \text{ galón}$$

O en el caso de usar polvo humectante-Sulfon (Anexo 8) obtendríamos:

$$\frac{15 \text{ gramos}}{X} * \frac{1ha}{0,199 ha} = 2,98 \text{ gramos} \times 2 \text{ (aplicaciones en el año)} = 5,97 \text{ gramos}$$

Glifosato: 4 L/ha

$$\frac{4 \text{ litros}}{X} * \frac{1ha}{0,199 ha} = 0,79 \text{ litros} \times 2 \text{ (aplicaciones en el año)} = 1,59 \text{ litros}$$

- **Segundo caso (control químico de *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn exceptuando *Rye grass* y otras especies):**

Si se prefiere una aproximación más conservadora, se consideraría únicamente el área ocupada por *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn, que abarca 0,133 hectáreas (Figura 16). Esto representa un poco más de un tercio del terreno total, y es menor que el área previamente analizada que incluía tanto la zona de helecho como la de otras especies. Con este enfoque más restringido, se definiría de manera aún más precisa la región que requiere irrigación o tratamiento, aprovechando las técnicas de teledetección y fumigación mediante drones. De tal manera que:

$$\frac{0,346 \text{ ha}}{0,133 \text{ ha}} * \frac{6,92 \text{ litros}}{X} = 2,66 \text{ litros}$$

Estos 2,66 L son el total de producto que se necesita para las zonas de *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn, si tomamos en cuenta la eficiencia y reducción de material irrigado en el experimento contamos con:

$$\frac{6,92 \text{ litros}}{2,66 \text{ litros}} * \frac{100\%}{X} = 38,44 (\%total \text{ irrigado}) - 100 (\%ahorro) = 61,56\%$$

Esto nos quiere decir que tenemos un ahorro considerable de insumos por hectárea mayor al anterior con un total de 61,56% si llevamos a cabo estas 2 técnicas de agricultura de precisión.

Criterio técnico: Tomando de base la evaluación de Borges et al. (2017) a criterio de la efectividad, si utilizamos (Metsulfuron – metil + glifosato) erradicando el 81,4% a 90 días de plazo, usaríamos las siguientes cantidades, diferenciando con los datos recolectados de Romero (2008) quien no obtuvo diferencias significativas en el caso de la evaluación individual:

Metsulfuron – metil: 10 g/ha

$$\frac{10 \text{ galones}}{X} * \frac{1 \text{ ha}}{0,133 \text{ ha}} = 1,33 \text{ galones}$$

O en el caso de usar polvo humectante-Sulfon (Anexo 8) obtendríamos:

$$\frac{15 \text{ gramos}}{X} * \frac{1 \text{ ha}}{0,133 \text{ ha}} = 1,99 \text{ gramos} \times 2 \text{ (aplicaciones en el año)} = 3,99 \text{ gramos}$$

Glifosato: 4 L/ha

$$\frac{4 \text{ litros}}{X} * \frac{1 \text{ ha}}{0,133 \text{ ha}} = 0,53 \text{ litros} \times 2 \text{ (aplicaciones en el año)} = 1,06 \text{ litros}$$

En base a los datos obtenidos sobre servicios y precios (Anexo 8), si se adquirió para un año se necesitarían metsulfuron – metil (Sulfon) de 15 g/ha a 7,20 USD, glifosato 4 L/ha 37,50 USD, dron fumigador (25 USD /ha x 2 veces) y mapeo con dron (35 USD /ha x 2 veces). Siendo un total de 164,7 USD anuales. Cabe recalcar que se usaron las medidas de los empaques de presentación mas no la cantidad real que se debe usar, a esto sumado el ahorro que permite cada uno de los casos presentes.

- **Tercer caso (control mecánico de *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn exceptuando *Rye grass* y otras especies)**

Criterio técnico: En su área específica de 0.133 ha, surge la posibilidad de abordar la tarea de manera más tradicional utilizando un machete. Esta elección se basa en que esta área no representaría una labor particularmente ardua para un trabajador que percibe un salario diario de 20 dólares 2 veces al año (Anexo 8). Además, el terreno presenta limitaciones que dificultan el acceso de maquinaria, lo que hace que la opción del machete sea más viable.

En este escenario, es importante destacar que, el ahorro en términos porcentuales no sería significativo al emplear tecnología más avanzada o costosa. Por lo tanto, optar por el uso de herramientas manuales como el machete no solo sería una solución eficiente desde el punto de vista económico, sino que también sería práctica y adecuada para las condiciones específicas del terreno.

- **Cuarto caso (control químico + mecánico de *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn exceptuando *Rye grass* y otras especies):**

Criterio técnico: Para el control de *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn, considerando un área de 0,133 hectáreas, se presentan dos enfoques técnicos. En el primer caso, se combina la teledetección y fumigación con drones, logrando un ahorro del 61,56% en insumos agrícolas. Esto se traduce en una reducción significativa de costos anuales. Tomando en cuenta a la investigación de Borges et al. (2017) quien menciona que control mecánico y químico en periodos determinados de aplicación logra una reducción significativa, en contraste a la investigación de Romero (2008) al evaluar de forma separada ambos controles, resultando contraproducente y siendo una diferencia entre resultados poco significativas.

En el segundo caso, se opta por el control mecánico utilizando machetes, aprovechando su eficacia en un terreno de difícil acceso. Aunque no representa un gran ahorro porcentual, es una solución práctica y económica. Ambos enfoques ofrecen estrategias efectivas adaptadas a las condiciones específicas del terreno y las necesidades del proyecto.

En base a los datos obtenidos sobre servicios y precios (Anexo 8), si se adquirió para un año se necesitarían metsulfuron – metil (Sulfon) de 15 g/ha a 7,20 USD, glifosato 4 L/ha 37,50 USD, dron fumigador (25 USD /ha x 2 veces), mapeo con dron (35 USD /ha x 2 veces) y mano de obra macheteo (20 USD /día/ha x 3 veces). Siendo un total de 224,7 USD anuales. Cabe recalcar que se usaron las medidas de los empaques de presentación mas no la cantidad real que se debe usar, a esto sumado el ahorro que permite cada uno de los casos presentes.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES

- Se determino el área de invasión del helecho *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn, la cual del área total de 0,346 ha, 0,133 ha son de *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn equivalente al 38,43% del terreno, 0,066 ha son pertenecientes a otro tipo de especies equivalente al 19,07%, y 0,147 ha de *Rye grass* perenne equivalente al 42,48% restante.
- Se logro identificar mediante técnicas de fotometría el área de invasión, mediante el uso de la técnica de “Supervisión no ponderada” la cual mediante su algoritmo muestra detalladamente el área con sus respectivos campos delimitados, por otra parte, se logró identificar el área la cual se vio afectada por la alelopatía del helecho *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn mediante el estudio de NDVI la cual permite identificar la salud de las plantas aldeanas.
- Se diseñó la cartografía conjunta a su distribución espacial de las especies habitantes en el predio, como son: *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn, *Rye grass* y otras especies.
- Se propuso las medidas de control para *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn, dadas por la bibliografía en torno a su efectividad en campo, a esto se complementó el uso de tecnología agrícola que permita que tenga un menor impacto en el suelo y se tenga un uso eficiente de los recursos al tratar de controlar esta maleza, donde se concluyó que en el supuesto caso que se efectuase la técnica descrita se obtendría un ahorro considerable de insumos de alrededor de 57,51% siendo para el caso específico del predio de estudio, este puede variar dependiendo de la dosificación y área a la cual se someterá.

CAPITULO VII

RECOMENDACIONES

- Al momento de brindar este tipo de estudios, se suele estar sujeto a depender de la precisión de la instrumentaria, como en el caso del uso de los equipos dron, tanto de su cámara, su georreferenciación y de las propias condiciones externas como el clima y tormentas solares que pueda que infiera en la precisión del muestreo.
- En el caso de las técnicas usadas, se recomienda que el predio analizado sea de 2 o 3 campos de identificación, ya que la precisión de esta técnica depende mucho de los patrones, formas y colores de la fotografía analizada, para lo cual en el caso de este estudio se decidió optar por 3 campos para tener una precisión favorable ante el muestreo.
- Se recomienda encarecidamente a productores como técnicos en general, el uso de la técnica NDVI con imágenes multispectrales en investigaciones similares. Esta técnica proporciona información valiosa que no es fácilmente perceptible por el ojo humano. En este caso, se empleó para evaluar la salud del pasto y cuantificar el daño porcentual del área causado por *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn. Es importante destacar que la calidad de las imágenes puede depender de la precisión de los sensores y los equipos utilizados.
- Se aconseja ampliamente explorar la implementación completa de tecnología agrícola, incluyendo el uso de equipos drones, con el fin de capitalizar su versatilidad, precisión, facilidad de uso y su menor impacto ambiental, como se ha demostrado en el análisis previamente expuesto. La tecnología actual ha abierto nuevas posibilidades para llevar a cabo tareas que antes eran inaccesibles debido a las limitaciones tecnológicas. Por lo tanto, se sugiere que se realice una investigación futura en este campo, centrándose en la integración de la tecnología de drones en la agricultura moderna y evaluando sus posibles beneficios adicionales. Esto podría incluir aspectos como la optimización de rutas de vuelo, la recopilación de datos más detallados o el uso de inteligencia artificial para análisis avanzados. Estas investigaciones futuras podrían contribuir al avance continuo de la agricultura y ofrecer nuevas perspectivas sobre cómo aprovechar al máximo esta tecnología en evolución.

CAPÍTULO VIII

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adama. (5 de noviembre de 2021). *Hervicidas. Sulfón*.

ADAMA: <https://www.adama.com/ecuador/es/agroquimicos/herbicida/sulfon>

Aldana, Y. (2020). Drones y procesamiento de imágenes, una alternativa a la erradicación de malezas. 1-7

doi:10.35707/indagare/821

Aufiero Informática. (2021). *Acerca de Metashape*.

<https://www.metashape-la.com>

Bonilla, G., Meza, S., Esquivel, A., Arias, D., Tapia, A., & Masís, F. (4 de octubre de 2020). Uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT's) para el monitoreo y manejo de los recursos naturales: una síntesis. *Tecnología en Marcha*, 33(4), 12.

doi:<http://dx.doi.org/10.18845/tm.v33i4.4528>

Bordón, R. (2018). *Detección de malezas mediante el análisis de imágenes tomadas desde un vehículo aéreo no tripulado*. [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Zacatecas].

<http://ricaxcan.uaz.edu.mx/jspui/bitstream/20.500.11845/1695/1/2018-08%20RAIKEL%20BORDON%20LOPEZ.pdf>

Borges, J., Dominguez, L., Camacaro, A., & Graterol, A. (2017). Control químico de *Pteridium esculentum* (g. Forst.) cockayne (thomson, 2012) en el municipio Bolívar, estado Yaracuy, Venezuela.

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85751092009>

Brito, G., & López, D. (2018). *Evaluación del estándar IEEE 802.11ac con tecnología mu-mimo en comparación al estándar de fibra óptica en redes de transporte de datos*. [Tesis de Ingeniería, Universidad Técnica de Ambato].

<http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/28008>

- Chacón, M. R. (2023). La biotoxina ptaquilósido en helechos del género *Pteridium*. *Agronomía Mesoamericana*, 4-13.
<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agromeso/article/download/49755/53123?inline=1>
- Cordis, R. d. (12 de Julio de 2016). *Drones para vigilar cultivos y combatir malezas*.
<https://cordis.europa.eu/article/id/175008-drones-to-monitor-crops-and-help-fight-weeds/es>
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2020). Plan de Prevención, Manejo y Control del helecho marranero (*Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn) para la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR. *Cundinamarca*
<https://sie.car.gov.co/handle/20.500.11786/37858>
- Cueva, D. (2015). *Estudio de la prevalencia de la hematuria vesical enzootica bovina en la parroquia palanda del cantón palanda de la provincia de Zamora Chinchipe*. [Tesis de Ingeniería, Universidad Técnica de Loja], 1-82.
- Del Monte, A. (2019). *Glisolat* [Archivo PDF].
https://delmonteag.com.ec/wp-content/uploads/2021/10/FT.HER_.31-GLISOLAT-G-480-SL.docx.pdf
- Deng, L., Feng, J., & Xu, X. (2018). Evaluating the restoration of vegetation and soil nutrient after *Pteridium aquilinum* control in southwest China. *Ecological Engineering*, 111, 33-42.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.11.013>
- Echeverri, L. (mayo de 2018). *Impacto del Clareo del Helecho Marranero Pteridium aquilinum (L.) Kuhn sobre el Reclutamiento de Plántulas Nativas en el Parque Forestal Embalse del Neusa, Cundinamarca*. [Tesis de Ingeniería, Universidad Javeriana].
<https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/35311/Trabajo%20de%20Grado.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- ESRI. (2021). *Empezar a trabajar con el procesamiento de ráster e imagen*.
<https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/data/imagery/get-started-with-image-and-raster-processing.htm>

- ESRI. (2022). *Clasificación no supervisada de cluster ISO (Spatial Analyst)*.
<https://pro.arcgis.com/es/pro-app/2.8/tool-reference/spatial-analyst/iso-cluster-unsupervised-classification.htm>
- ESRI. (2022). *De ráster a polígono*.
<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.5/tools/conversion-toolbox/raster-to-polygon.htm>
- ESRI. (2022). *Disolver (Administración de datos)*.
<https://pro.arcgis.com/es/pro-app/2.8/tool-reference/data-management/dissolve.htm>
- Ferreira, M., Sousa, M., & Azevedo, E. (2020). Use of indigenous grasses for *Pteridium aquilinum* control and restoration of riparian vegetation. *Restoration Ecology*, 143.
<https://doi.org/10.1111/rec.12919>
- Flego, E. G. (2008). *Agricultura de precisión* [Archivo PDF].
<https://www.palermo.edu/ingenieria/downloads/pdfwebc&T8/8CyT12.pdf>
- Frattini, S. (2019). Georreferenciación en el campo. *Aneia*
<https://agronegocios.uniandes.edu.co/2019/09/16/georreferenciacion-en-el-campo/>
- Gaona, G. (2009). Validación del Índice de Área Foliar (LAI) de Sensores . [Tesis de Ingeniería, Universidad Nacional de Loja], 35-60.
<https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/5054/1/Validaci%C3%B3n%20del%20%C3%8Dndice%20de%20%C3%81rea%20Foliar%20%28LAI%29%20de%20Sensores%20Remotos.pdf>
- Garg, V., Kumar, M., Kumar, S., & Singh, M. (2021). *Detecting invasive bamboo (Dendrocalamus giganteus) using UAV-based multispectral imagery and machine learning*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(2), 1-14.
<https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-05-07>
- Giusiano, M. (2017). Drones agrícolas en el manejo sitio específico de malezas, análisis de beneficios económicos. [Tesis de Licenciatura, Universidad Siglo 21].
<https://repositorio.uesiglo21.edu.ar/handle/ues21/14078>
- González, P., Lazzaro, L., Villa, L., & Preda, C. (2019). Early detection and rapid response are crucial to avoid future invasions. *Biological Invasions*, 21(1), 1-3.
<https://doi.org/10.1111/rec.12919>

- Guzmán, R., & Rodríguez, E. (2020). Determinación de uso y cobertura del suelo mediante imágenes de cámara multiespectral y vehículo aéreo no tripulado. [Tesis de Ingeniería, Universidad *Distrital Francisco José de Caldas*], 19-30.
<http://hdl.handle.net/11349/25657>
- IICA. (2016). *La agricultura de precisión tiene potencial para transformar el agro*.
<https://www.iica.int/es/prensa/noticias/la-agricultura-de-precisi%25C3%25B3n-tiene-potencial-para-transformar-el-agro>
- iNaturalis. (2021). *Helecho Águila Pteridium aquilinum*.
<https://ecuador.inaturalist.org/taxa/52681-Pteridium-aquilinum>
- Instituto de Investigación de Sistemas Ambientales. (2022). *Función NDVI*.
<https://pro.arcgis.com/es/pro-app/2.8/help/analysis/raster-functions/ndvi-function.htm>
- Iván Maldonado y Diana Reyes. (2023). Optimización financiera del uso de drones en cultivos extensivos: caso de estudio cultivo de arroz en el municipio de Trinidad, Casanare, Colombia. *Revista Espacios*.
10.48082/espacios-a23v44n03p07
- Khan. (2016). *La luz: ondas electromagnéticas, espectro electromagnético y fotones*.
<https://es.khanacademy.org/science/ap-chemistry/electronic-structure-of-atoms-ap/bohr-model-hydrogen-ap/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum>
- Kogut, P. (10 de septiembre de 2020). *Agricultura De Precisión: De Los Libros A La Realidad*.
<https://eos.com/es/blog/agricultura-de-precision/>
- Loayza, J. (2015). *Efectividad de la levadura de selenio, administrada a bovinos como parte de las sales minerales, en el tratamiento de la intoxicación crónica por el consumo de Pteridium aquilinum (helecho macho)*. [Tesis de Ingeniería, Universidad De Las Américas].
<http://hdl.handle.net/20.500.11764/3804>
- Lorenzo León G., C. C. (2022). Detección de malezas en cultivos utilizando inteligencia artificial. *INIA*.
<https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/68488/NR42823.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Lorenzo León, C. C. (2020). Uso de la inteligencia artificial en el manejo integrado de malezas: experiencias en la temporada 2020-21. *INIA*
<https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/68431/8.pdf?sequence=9&isAllowed=y>
- Lui, Z. L., Wang, F., Zhang, Y., & Jiang, J. (2019). Combined effect of canopy cover and cutting on the growth of *Pteridium aquilinum* in a subtropical forest. *Restoration Ecology*, 27(4), 854-862.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105697>
- Matellanes, R. (10 de abril de 2017). *Geo innova*.
<https://geoinnova.org/blog-territorio/firmas-espectrales-drones/>
- Lineamientos para la evaluación del impacto económico de las plantas invasoras en Colombia (2010). *Informe 4: Recopilación de todos los resultados*. UICN.
<http://repository.humboldt.org.co/bitstream/handle/20.500.11761/31177/10-10-011-175.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Moltoni, L., Moltoni, A., Masia, G., Clemares, N., Duro, S., & Fiorini, J. (2019). Análisis económico del uso de drones para la generación de mapas de prescripción de malezas. 7° *Congreso de Soja de MERCOSUR*.
<http://hdl.handle.net/20.500.12123/7173>
- Muñoz, P., Ortega, R., López, F., & García, T. (2020). Automatic detection of Chinese lettuce (*Lactuca sativa* L.) using UAV - based multi images and deep learning algorithms. *Remote Sensing*, 12(13), 3.
<https://doi.org/10.17221/135/2018-pps>
- Murillo, G. P. (2019). *Evaluación de la eficiencia de aplicación de dos diferentes métodos de Fumigación, mediante Dron vs aplicación con Aguilón en el cultivo de soya*. [Tesis de Ingeniería, Universidad Católica de Santiago de Chile].
<http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/13294/1/T-UCSG-PRE-TEC-AGRO-155.pdf>

- Olguín, L. (2017). “*Implicaciones sociales y ecológicas de la restauración de áreas degradadas por helecho invasivo (Pteridium aquilinum) en San Pedro Tlatopusco, Oaxaca, México*”. [Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional].
http://literatura.ciidiroaxaca.ipn.mx/jspui/bitstream/LITER_CIIDIROAX/395/1/Olguín%20Hernández%2C%20L.%2C%202017.pdf
- Olvera, C., López, F., Bordón, R., Villagrama, R., Araiza, M., Arceo, J., & Ruiz, M. (2019). Plataforma de control de un vehículo aéreo no tripulado para la detección de malezas. *Convención Científica Internacional*, 1-14.
<http://ricaxcan.uaz.edu.mx/jspui/handle/20.500.11845/1621>
- Oscar Goñi, J. N. (2018). Sistema de detección malezas y cultivos. *Jornadas de Vinculación Universidad-Industriacd*, 5.
<https://49jaiio.sadio.org.ar/pdfs/jui/JUI-09.pdf>
- Parada, A. M. (2015). *Diseño e implementación de un sistema de detección de malezas en cultivos Cundiboyacenses*. [Tesis de Maestría, Universidad Católica De Colombia]
<https://doi.org/10.48779/r27c-6877>
- Pino, E. (2019). Los drones una herramienta para una agricultura eficiente: un futuro de alta tecnología. *Idesia*, 7(1).
<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292019005000402>
- Polanco, M. (2007). *Maquinaria y Mecanización Agrícola*. UNAD.
http://www.latranqueraweb.com.ar/web/archivos/menu/MAQUINARIA_Y_MECANIZACION_AGRICOLA.pdf
- Ramos, M., Chavera, A., Tabacchi, L., Huamán, H., & Nieves, S. (2012). Lesiones anatomo patológicas en cuyes intoxicados experimentalmente con *Pteridium aquilinum* como modelo animal para bovinos con hematuria vesical enzootica bovina. *Revista Investigaciones Veterinarias Perú*.
http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1609-91172012000200010&script=sci_abstract
- Rodríguez, P. (2019). *Problemas causados por el helecho (Pteridium aquilinum (L) Kuhn*.
<http://www.sidalc.net/cgi->

bin/wxis.exe/?IsisScript=bac.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mf
n=045502

Romero, C. (2008). *Efectos de algunas prácticas, solas y combinadas, para el control de helechos Pteridium aquilinum en potreros*. [Tesis de Ingeniería, Escuela Superior Politecnica Del Litoral], 40 -53.

<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/11826>

Sarauz, L. (2021). Conocimiento ancestral de plantas medicinales en la comunidad de Sahuangal, parroquia Pacto, Pichincha, Ecuador. *Revista de Investigación en Salud VIVE*, 1.

http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2664-32432021000100072&script=sci_abstract

Vallejo, C. B. (2018). *Servicio de fumigación con drones para plantaciones bananeras en la provincia del Guayas*. [Tesis de Ingeniería, Escuela Superior Politecnica Del Litoral]

<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/45661/1/D-P13860.pdf>

Yerly D. Mira, L. A. (2021). allelopathic effects of common bracken (*Pteridium aquilinum* (L.) kuhn) on germination and growth of economically important weeds. *Chilean Journal of Agricultural and Animal Sciences*, 2-8.

https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0719-38902021000300290&script=sci_arttext

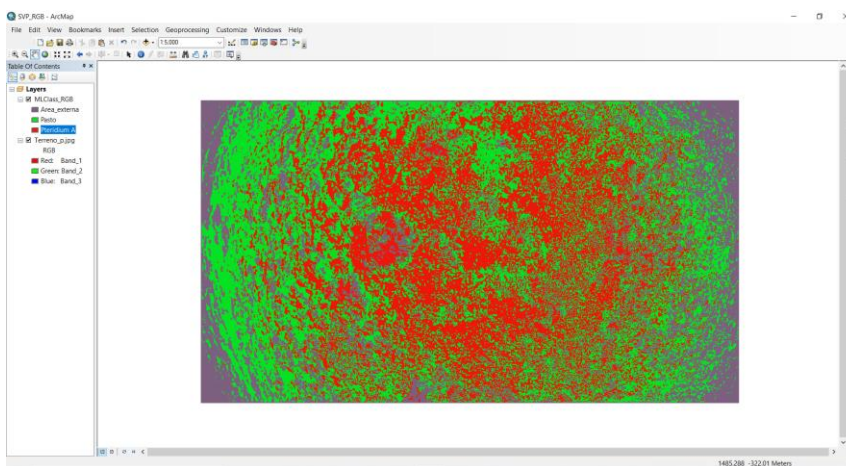
Zhao, X., Liu, Y., & Huang, Y. (2020). Effects of herbicides on the growth and nutrient uptake of *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn in Southwestern China. *Plant Protection Science*, 56(1), 32-41.

<https://doi.org/10.17221/135/2018-pps>

ANEXOS

Anexo 1

Pruebas de muestreo con dron convencional, finca "San Martín".



Anexo 2

Muestreo definitivo con equipo dron DJI Mavik Pro, finca “San Martín”.

**Anexo 3**

Muestreo definitivo con equipo dron DJI Mavic 2 con cámara sequoia, finca “San Martín”.



Anexo 4

Capacitación de insumos para control de malezas, empresa "CEREALES DEL NORTE"

**Anexo 5**

Capacitación de manejo de equipo agrícola DJI AGRAS T30, empresa "TETCH MALL"



Anexo 6

Pruebas de irrigación.

**Anexo 7**

Capacitación de manejo de “Drones agrícolas”, empresa “TETCH MALL”



Anexo 8

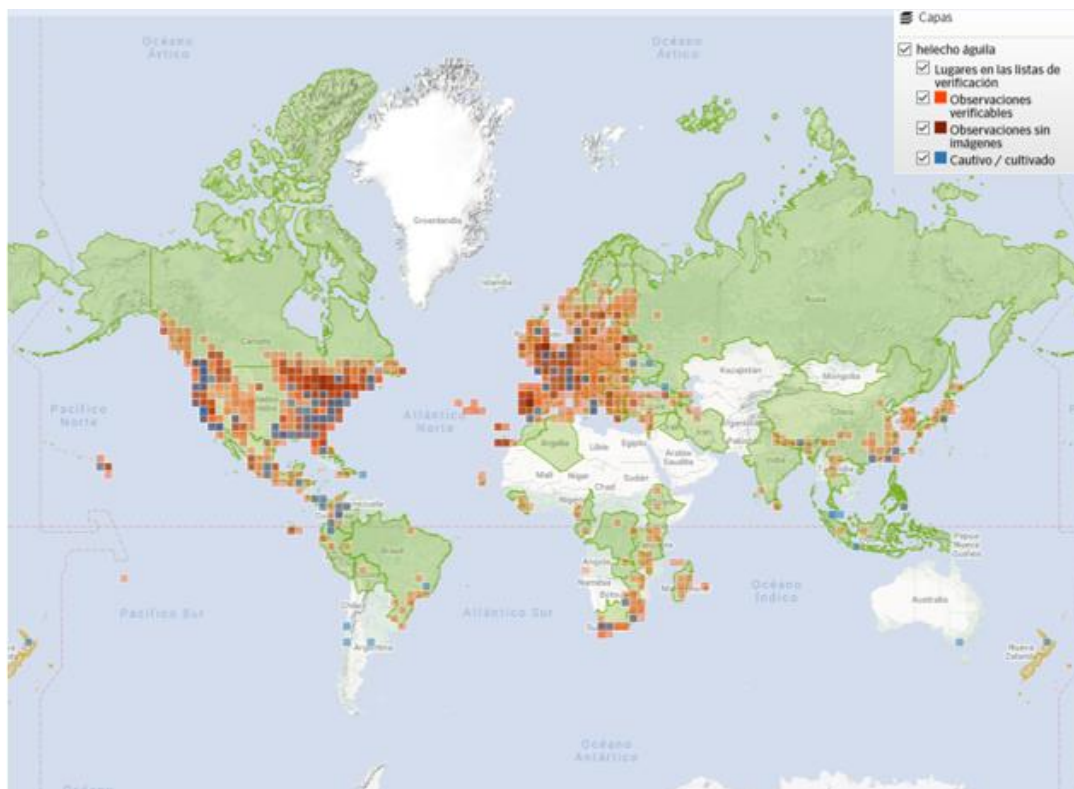
Costos del material de intervención de Pteridium aquilinum (L.) Kuhn.

Nombre	Nombre comercial	Contenido	Tipo	(Dosis)ha	Veces/año	Costo x unidad	Costo anual
Mapeo con Dron	/	/	Mano de obra	1 vez/ha	2 vece(s)	35 USD/ha	70 USD
Fumigador (Bomba de fumigar)	/	/	Mano de obra	1 vez/ha	2 vece(s)	20 USD /día/ha	40 USD
Fumigador (aguilón)	/	/	Mano de obra	1 vez/ha	2 vece(s)	25 USD /ha	50 USD
Fumigador (Dron fumigador)	/	/	Mano de obra	1 vez/ha	2 vece(s)	25 USD /ha	50 USD
Metsulfuron – metil	Sulfon	15 gramos	Control químico	15 gr/ ha	2 vece(s)	3.60 USD	7.20 USD
Glifosato:	Glisolat	1 galón o 3.80 litros	Control químico	1 L/ha	2 vece(s)	37.50 USD	37.50 USD
Picloram + 2,4D amina	Tordon	1 galón o 3.80 litros	Control químico	1 L/ha	2 vece(s)	29.90 USD	29.90 USD
Macheteo (obrero)	/	/	Control mecánico	1 vez/ha	3 vece(s)	20 USD /día/ha	60 USD
Arado	/	/	Control mecánico	1 vez/ha	1 vece(s)	25 USD /ha	25 USD

Nota. En la tabla se muestra los costos por hectárea en el Ecuador para la intervención de *Pteridium aquilinum*. Los datos mostrados fueron adaptados de una entrevista y capacitación de la empresa “Cereales del Norte, 2022”.

Anexo 9

Distribución geográfica de *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn.



Nota. La leyenda marca de la siguiente disposición: Rojo-el lugar donde existió una observación verificada. Rojo vino – Observaciones sin imágenes. Y Azul – Donde este cautivo o cultivado. Esta información fue recopilada y adaptada de (iNaturalis, 2021)