

# UCUENCA

**Universidad de Cuenca**

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Carrera de Ingeniería Agronómica

**Análisis del contenido de clorofila y rendimiento en cultivo de maíz (*Zea mays*)  
mediante técnicas de teledetección**

Trabajo de titulación previo a la  
obtención del título de Ingeniero  
Agrónomo


**Autor:**

Mercy Viviana Fajardo Martínez

Johnny Ismael Jaramillo Morocho

**Directora:**

Rosa Lucia Lupercio Novillo

ORCID:  0000-0002-4798-6108

**Cuenca, Ecuador**

2023-06-02

## Resumen

El maíz es un cultivo de gran importancia a nivel mundial, por ello la mayoría de productores buscan determinar el rendimiento productivo de su cultivo y para esto es primordial el contenido de clorofila ya que esta es considerada la propiedad vegetal más relevante para la estimación de la productividad. Basados en esta información la presente investigación tiene como objetivo evaluar el contenido de clorofila en la etapa reproductiva (R3) del cultivo de maíz (*Zea mays*), para estimar su rendimiento utilizando técnicas de teledetección. Se trabajó en tres parcelas productivas ubicadas en las parroquias Nulti (A y B) y El Valle (C). Durante la etapa R3 se realizó un vuelo fotogramétrico con el sensor Parrot Sequoia incorporado a un vehículo aéreo no tripulado, se realizó el postprocesamiento del mismo y se obtuvieron imágenes multiespectrales, luego se calculó el índice de vegetación de Borde rojo (NDRE) el cual fue contrastado con información adquirida a través del medidor de clorofila atLeaf CHL-PLUS para la validación de esta técnica. Además, se realizó el levantamiento de variables productivas y los análisis estadísticos pertinentes. Los resultados muestran una correlación positiva alta para la parcela A ( $R^2 = 0.79$ ), mientras que las parcelas B y C obtuvieron una correlación positiva moderada ( $R^2 = 0.69$ ;  $R^2 = 0.65$  respectivamente). En cuanto al rendimiento los resultados indicaron que existe una correlación moderada ( $R^2 = 0.74$ ) con el índice NDRE, es decir que esta técnica es una alternativa no invasiva para la estimación del rendimiento del cultivo de maíz.

*Palabras clave:* clorofila, índice de vegetación, ndre, maíz, teledetección

### Abstract

Corn is a crop of great importance worldwide, therefore most producers seek to determine the productive yield of their crop and for this, the chlorophyll content is essential since it is considered the most relevant plant property for the estimation of productivity. Based on this information, the present research aims to evaluate the chlorophyll content in the reproductive stage (R3) of the maize (*Zea mays*) crop, to estimate its yield using remote sensing techniques. We worked in three productive plots located in the parishes of Nulti (A and B) and El Valle (C). During the R3 stage, a photogrammetric flight was carried out with the Parrot Sequoia sensor incorporated to an unmanned aerial vehicle, post-processing was performed and multispectral images were obtained, then the Red Border Vegetation Index (NDRE) was calculated and contrasted with information acquired through the atLeaf CHL-PLUS chlorophyll meter for the validation of this technique. In addition, the survey of productive variables and the pertinent statistical analyses were carried out. The results show a high positive correlation for plot A ( $R^2 = 0.79$ ), while plots B and C obtained a moderate positive correlation ( $R^2 = 0.69$ ;  $R^2 = 0.65$  respectively). Regarding yield, the results indicated that there is a moderate correlation ( $R^2 = 0.74$ ) with the NDRE index, which means that this technique is a non-invasive alternative for the estimation of maize crop yield.

*Keywords:* chlorophyll, vegetation index, ndre, corn, remote sensing

## Índice de contenido

Resumen .....	2
Abstract.....	3
Índice de contenido.....	4
Agradecimiento.....	8
Dedicatoria.....	9
Introducción .....	10
1. Objetivos.....	11
1.1 Objetivo general del proyecto.....	11
1.2 Objetivos específicos .....	11
2. Revisión bibliográfica .....	12
2.1 Importancia del cultivo de maíz ( <i>Zea mays</i> ) en el Ecuador.....	12
2.2 Descripción del cultivo de maíz de altura .....	13
2.3 Relación entre el contenido de clorofila y rendimiento productivo.....	15
2.4 Eficiencia de los métodos directos e indirectos en la estimación de clorofila .....	16
2.5 Uso del medidor de clorofila atLeaf CHL-PLUS en la estimación de clorofila .....	17
2.6 Uso de la teledetección para la estimación de clorofila .....	19
2.7 Sensor Parrot sequoia .....	20
2.8 Índices de vegetación .....	22
3. Materiales y Métodos .....	23
3.1 Zona de estudio .....	23
3.2 Caracterización de las parcelas de producción .....	25
3.3 Materiales .....	26
3.4 Metodología .....	26
3.4.1 Metodología implementada en el objetivo específico uno: Estimar el contenido de clorofila del cultivo de maíz ( <i>Zea mays</i> ) a través del índice de diferencia normalizada de borde rojo (NDRE) .....	26
3.4.2 Metodología implementada en el objetivo específico dos: Validar las técnicas de teledetección para la estimación de clorofila mediante el medidor de clorofila atLeaf CHL-PLUS .....	32
3.4.3 Metodología implementada en el objetivo específico tres: Analizar el efecto del contenido de clorofila sobre el rendimiento del cultivo de maíz ( <i>Zea mays</i> ).....	33
4. Resultados.....	35
4.1 Estimación el contenido de clorofila del cultivo de maíz ( <i>Zea mays</i> ) a través del índice de diferencia normalizada de borde rojo (NDRE). Objetivo 1 .....	35
4.2 Validación de las técnicas de teledetección para la estimación de clorofila. Objetivo 2 .....	37
4.3 Efecto del contenido de clorofila sobre el rendimiento del cultivo de maíz ( <i>Zea mays</i> ). Objetivo 3 .....	42

5. Discusión .....	44
6. Conclusiones y Recomendaciones .....	46
Referencias.....	48
Anexos.....	54

## Índice de figuras

<b>Figura. - 1</b>	Mapa de ubicación de las parcelas en Nulti.....	24
<b>Figura. - 2</b>	Mapa de ubicación de la parcela en el Valle.....	24
<b>Figura. - 3</b>	Flujograma fotogramétrico para el procesamiento de imágenes .....	27
<b>Figura. - 4</b>	Ortofotografías de las parcelas A y B .....	28
<b>Figura. - 5</b>	Ortofotografía de la parcela C.....	29
<b>Figura. - 6</b>	Clasificación de clases dentro del panel “SCP” para la parcela B (Nulti).....	30
<b>Figura. - 7</b>	Índice NDRE para la parcela B (Nulti).....	31
<b>Figura. - 8</b>	Índice NDRE para la clase maíz y cuadrícula para la parcela B (Nulti) .....	32
<b>Figura. - 9</b>	Toma de datos en campo con el equipo atLeaf CHL-PLUS.....	33
<b>Figura. - 10</b>	Toma de variables de producción.....	34
<b>Figura. - 11</b>	Índice NDRE para el cultivo de maíz de la parcela A (Nulti).....	35
<b>Figura. - 12</b>	Índice NDRE para la clase maíz de la parcela B (Nulti) .....	36
<b>Figura. - 13</b>	Índice NDRE para la clase maíz de la parcela C (El Valle) .....	37
<b>Figura. - 14</b>	Correlación entre el Índice NDRE y el equipo atLeaf CHL-PLUS de la parcela A .....	40
<b>Figura. - 15</b>	Correlación entre el Índice NDRE y el equipo atLeaf CHL-PLUS de la parcela B .....	41
<b>Figura. - 16</b>	Correlación entre el Índice NDRE y el equipo atLeaf CHL-PLUS de la parcela C .....	42
<b>Figura. - 17</b>	Correlación entre el peso de los granos y el Índice NDRE de la parcela A .....	43

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Escala fenológica de Ritchie y Hanway para el cultivo de maíz.....	14
<b>Tabla 2.</b> Pruebas de normalidad, para los datos obtenidos en campo en el cultivo de maíz ( <i>Zea mays</i> ) mediante el equipo atLeaf CHL-PLUS. $p > 0.05$ .....	38
<b>Tabla 3.</b> Pruebas de normalidad, para los datos obtenidos a través del índice NDRE, en el cultivo de maíz ( <i>Zea mays</i> ). $p > 0.05$ .....	38
<b>Tabla 4.</b> Pruebas de homocedasticidad, para los datos obtenidos en campo en el cultivo de maíz ( <i>Zea Mays</i> ) mediante el equipo atleaf - CHL-PLUS.....	39
<b>Tabla 5.</b> Pruebas de homocedasticidad, para los datos obtenidos a través del índice NDRE, en el cultivo de maíz ( <i>Zea mays</i> ). $p > 0.05$ .....	39
<b>Tabla 6.</b> Prueba de normalidad y homocedasticidad para la variable peso de los granos en el cultivo de maíz ( <i>Zea mays</i> ). $p > 0.05$ .....	43

### Agradecimientos

Gracias a la Universidad de Cuenca, por permitirme formarme en ella, gracias a todas las personas que fueron partícipes de este proceso, ya sea de manera directa o indirecta, gracias a todos Ustedes que fueron los responsables de realizar un pequeño aporte, para que el día de hoy se vea reflejado la culminación de mi paso por la Universidad. También quiero agradecer a mis familiares que fueron mis mayores promotores durante este proceso, gracias a Dios por que fue pilar fundamental y motivador para poder avanzar cada día sin querer tirar la toalla.

Este es un nuevo logro, que en gran parte es de ustedes, hemos podido culminar con éxito lo que, en un inicio, se tornaba como una tarea colosal e interminable.

Este es un momento muy especial, que espero perdure en el transcurso del tiempo, no solo en las personas a las cuales exprese mi sentido de gratitud, sino también a todas las personas que invirtieron un momento de su tiempo para poder ejercer una crítica constructiva a este proyecto de tesis, a ellos a si mismo les expreso mi mayor gratitud.

Johnny Jaramillo

Por las veces que me sentí frustrada y su promesa de tener el control de todo me sostuvo, por las veces que dudé de mí y su amor me devolvió la confianza, por los días en que no entendía sus planes y aun así siempre me recordó que tiene un plan perfecto para mi vida, por esto y más mi agradecimiento infinito va dirigido a Dios. Gracias por mantenerme firme en este largo camino.

Gracias a la Dra. Lucia Lupercio por su esfuerzo y guía prestada durante este proceso. Gracias por su tiempo, conocimiento, empatía y dedicación en cada fase de investigación que nos permitió avanzar y culminar este proyecto.

Gracias a los docentes de la carrera de Ingeniería Agronómica de la Universidad de Cuenca y a la institución misma que por años me brindaron conocimientos y directrices en el campo de la agronomía y me permitieron formarme profesionalmente.

Gracias a mi familia y amigos que con palabras de ánimo me inspiraron a seguir adelante y culminar este ciclo de mi vida que considero uno de los más importantes.

Viviana Fajardo



### Dedicatorias

Principalmente dedicamos este trabajo a Dios, puesto que nos ayuda con su sabiduría, amor y paciencia, a nuestros familiares, y amigos, por sus palabras de aliento y perseverancia para poder concluir con este trabajo, a ellos por su apoyo incondicional, no solo durante el desarrollo de esta tesis, sino durante toda esta trayectoria en la universidad. También queremos dedicar el trabajo a la Universidad de Cuenca, por encomendarnos este trabajo, el cual nos ha permitido acrecentar nuestra capacidad intelectual.

A la Dra. Lucia Lupercio, quien nos supo apoyar en algunos momentos de incertidumbre con su amplio conocimiento, en ciertos puntos críticos en las diferentes áreas de estudio, en las cuales necesitábamos de su sabiduría para continuar con el desarrollo de la tesis.

Y por supuesto dedicar este pequeño aporte académico, a cada profesor, durante esta etapa, que con fervor supieron inculcar valores, y conocimiento, pese a las dificultades presentadas, consiguieron avanzar con la instrucción de cada alumno.

Johnny Jaramillo

Con el corazón agradecido quiero dedicar este trabajo a mis más grandes motivaciones en la vida, mis padres, Sergio Fajardo y Bertha Martínez quienes con palabras de ánimo y sustento me acompañaron fielmente por este largo camino de formación profesional. Porque a pesar de muchas veces no entender la carrera que elegí nunca dudaron de mí y confiaron en que en el momento perfecto lo iba a lograr. A mis hermanas Silvia y Alison quienes en medio de mi frustración siempre me escucharon y alentaron a continuar. A mi hermanito David quien a pesar de su edad con tan solo un abrazo me hacía sentir su apoyo y confianza en mí.

Isaías 41:13

Viviana Fajardo

## Introducción

El maíz (*Zea mays*) ocupa el segundo lugar en producción agrícola a escala mundial, después de la caña de azúcar, y ocupará el primero para 2025 según las predicciones de Rosegrant et al. (2008). En Ecuador, en el año 2021 la superficie sembrada de cultivos transitorios fue de 1,006,433 hectáreas; siendo los cultivos de maíz duro seco (37.12%), arroz en cáscara (34.08%) y papa (4.19%) los de mayor producción a nivel nacional (INEC, 2022). Aproximadamente el 60% de los productores agropecuarios del país siembran maíz, como consecuencia en 2021 la superficie cosechada fue de 366,138 hectáreas presentando un crecimiento del 7.28% respecto al 2020 (ESPAC, 2022).

Considerando la importancia del cultivo del maíz para el Ecuador, se debe tener presente ciertos parámetros relevantes para su rendimiento productivo, entre los cuales destacan riego, fertilización, buenas prácticas agrícolas, densidad de siembra, entre otros. El buen o mal manejo de estos parámetros se verán reflejados principalmente en el vigor del cultivo, que está determinado por el contenido de clorofila. De ahí la importancia de la estimación de la clorofila de un cultivo, ya que existe una relación directa con el estado de salud del cultivo, siendo considerada la propiedad vegetal más relevante para la estimación de la productividad (Bellacomo et al., 2020).

Adicionalmente, la importancia de conocer el contenido de clorofila radica en que esta información facilitará determinar en qué momento una planta se encuentra en circunstancias de estrés por salinidad o por cualquier otra causa, los cuales perjudican el proceso fotosintético y generan una reducción en la asimilación de nitrógeno y en la fijación del carbono, factores que a su vez modifican en la planta su concentración interna de clorofila, alterando su coloración normal (Castañeda et al., 2018).

En base a esto, conocer el comportamiento de la clorofila de forma rápida y precisa durante las etapas fenológicas de mayor importancia del cultivo se ha vuelto uno de los criterios más importantes para la estimación de su rendimiento. Para el maíz según Figueroa (2013) los más altos coeficientes de clorofila se encontraron desde la octava hoja (V8), logrando los más altos coeficientes de determinación en los estados reproductivos con un  $R^2 = 0.85$  en la etapa R3. Por otro lado, Castellanos et al. (2017) indican que los valores de índice de verdor encontrados a inicios de floración (superior de 50 unidades SPAD) determinan un valor adecuado de clorofila para un buen rendimiento de grano de maíz.

A lo largo de los años se ha venido estudiando y desarrollando diferentes métodos para determinar el contenido de clorofila en las plantas y su relación con el rendimiento del cultivo,

siendo estos métodos clasificados como directos e indirectos. Dentro de los métodos directos, generalmente el estado nutricional de las plantas se evalúa por análisis químico del tejido vegetal (hoja) y, normalmente, en su interpretación se utilizan concentraciones críticas o rangos de concentración. Sin embargo, estos métodos presentan ciertas limitaciones por el tiempo y el alto costo de ejecución (Kappes et al., 2013), además de ser considerados como destructivos. Mientras que el uso de métodos indirectos es visto como una alternativa amigable con el cultivo, ya que no se daña ningún órgano de la planta, es por ello que se han desarrollado diferentes estudios realizados por Rincón y Ligarreto (2010) que indican la importancia del uso de métodos indirectos como el clorofilómetro de tipo SPAD. No obstante, a pesar de la eficiencia de estas herramientas, el análisis solo puede realizarse en una porción de las parcelas de cultivo. Es aquí en donde cobra gran importancia la teledetección, la misma que ha demostrado ser una herramienta de gran ayuda principalmente para el área de la agricultura, debido a que la teledetección en el dominio solar proporciona mediciones indirectas de esta y otras variables en toda la porción de territorio (Sylvain et al., 2017) gracias a la ayuda de imágenes multiespectrales y los índices de vegetación; optimizando así tanto tiempo como recursos.

Los índices espectrales de vegetación (IV) empíricos son quizás el medio más popular para estimar el contenido de clorofila, aprovechando los niveles de reflectancia. (Croft et al., 2013), teniendo presente que la reflectancia de la hoja está controlada por la presencia de constituyentes foliares como clorofila, nitrógeno, carotenoides y agua (Blackburn, 2006).

De lo aquí mencionado, los resultados del presente trabajo permitirán conocer la relación que existe entre el contenido de clorofila en la etapa de grano lechoso (R3) y la estimación del rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays*). Por otro lado, contribuirá a la evaluación de la eficiencia y beneficios que proporcionan las técnicas de teledetección, en comparación con otros métodos de obtención del contenido de clorofila.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo general del proyecto**

Evaluar el contenido de clorofila en la etapa reproductiva (R3) del cultivo de maíz (*Zea mays*), para estimar su rendimiento utilizando técnicas de teledetección.

### **1.2 Objetivos específicos**

- Estimar el contenido de clorofila del cultivo de maíz (*Zea mays*) a través del índice de diferencia normalizada de borde rojo (NDRE).

- Validar las técnicas de teledetección para la estimación de clorofila mediante el medidor de clorofila atLeaf CHL-PLUS.
- Analizar el efecto del contenido de clorofila sobre el rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays*).

## 2. Revisión bibliográfica

### 2.1 Importancia del cultivo de maíz (*Zea mays*) en el Ecuador

El maíz (*Zea mays* L.) es un cereal que fue domesticado y venerado por culturas prehispánicas, se considera un elemento estratégico para la soberanía y seguridad alimentaria en sus distintas formas de usos y valores socioculturales, principalmente para el medio rural (González et al., 2016).

Pertenece a la familia de las gramíneas, tribu maideas, y se cree que se originó en los trópicos de América Latina, especialmente los géneros *Zea*, *Tripsacum* y *Euchlaena* (Deras, 2012). Para muchos autores el maíz es una planta originaria de América, específicamente en México en el Valle de Tehuacán y su domesticación se dio en el mismo lugar, posteriormente se extendió hacia Canadá, Argentina y al resto del mundo, por ello se considera a esté como uno de los granos alimenticios más antiguos (Sánchez, 2014).

Este cultivo ocupa el segundo lugar en producción agrícola a escala mundial, después de la caña de azúcar, siendo su producción de 1 038 millones de toneladas superando los 967 millones de toneladas estimadas. En Ecuador por su parte, en el año 2021 la superficie sembrada de maíz duro seco fue de 373,587 hectáreas (ha) con una producción de 1,699,370 toneladas representado el 37.12 % de la superficie total sembrada y formando parte de los cultivos de mayor producción a nivel nacional junto con el arroz en cascara y la papa (ESPAC, 2022). El maíz suave seco y el maíz suave choclo por otra parte representaron el 5.11 % y el 2.43 % de superficie total sembrada respectivamente.

Aproximadamente el 60% de los productores agropecuarios del país siembran maíz y para 2021 se registró un crecimiento en su producción del 30.23 % respecto al año anterior, es así que la superficie cosechada fue de 366,138 ha, presentando un crecimiento del 7.28 % respecto al 2020 (Orbe y Cuichán, 2022). Esta producción está destinada principalmente a la alimentación humana y animal y es por ello que es considerado un cultivo de gran importancia económica tanto a nivel nacional como a nivel mundial (FIRA, 2016).

Además, según investigaciones realizadas por Fuentes et al. (2022) el Ecuador tiene gran diversidad genética de maíz de las cuales se reconocen 36 razas como por ejemplo el maíz

Blanco, Harinoso, Dentado, Canguil, etc. Sin embargo, algunas variedades no están bien definidas hasta la actualidad.

## 2.2 Descripción del cultivo de maíz de altura

La planta del maíz es una monocotiledónea anual con alturas que alcanzan entre 2 y 6 metros, frondosa, con un sistema radicular fibroso y un sistema caulinar con pocos macollos. En cuanto a su cultivo, si bien tiene una gran adaptabilidad en diferentes condiciones físicas y climáticas se desarrolla de manera óptima en suelos que van desde los 2400 a 2800 m.s.n.m, con pendientes suaves y medias desde 0-25%. Las texturas en donde mejor se desarrolla pueden ser franco, franco arcilloso, franco arcillo arenoso y franco arcillo limoso, con pH entre 5.5 a 6.5. La temperatura óptima oscila entre 13 a 25°C y la precipitación óptima va de 600 a 12000 mm. Además, las zonas óptimas o moderadas para producir maíz deberían tener suelos profundos o moderadamente profundos, ricos o medios en materia orgánica y con buen drenaje para evitar encharcamiento (Zambrano et al., 2021).

Con respecto al ciclo del cultivo, en la sierra del Ecuador la mayoría de los productores siembran la variedad “Zhima Blanco” desde septiembre hasta mediados de enero, coincidiendo con el inicio del periodo de lluvias, obteniendo de esta forma un mayor grado de germinación, emergencia y producción. El ciclo del cultivo en variedades mejoradas llega hasta los 270 días; sin embargo, este periodo depende de la variedad y del propósito, si es para grano tierno o grano seco (Peñaherrera, 2011).

El ciclo fenológico del maíz de altura según Peñaherrera (2011) consta de las siguientes fases:

- Siembra: 0 a 3 días
- Germinación y emergencia: 5 a 7 días
- Desarrollo vegetativo: 25 a 60 días
- Floración: 90 a 120 días
- Maduración: 125 a 210 días
- Cosecha: 215 a 270 días

Ritchie y Hanway (1982) crearon la escala fenológica más utilizada hasta la actualidad por diferentes estudios desarrollados en el cultivo de maíz de altura para describir su ciclo fenológico, como se observa en la **Tabla 1** en esta escala se pueden visualizar dos grandes etapas: la vegetativa (V) y la reproductiva (R). La subdivisión numérica de la fase vegetativa corresponde al número de hojas totalmente expandidas (lígula visible) y la etapa reproductiva comienza con la emergencia de estigmas (R1) y finaliza en madurez fisiológica (R6).

**Tabla 1.** Escala fenológica de Ritchie y Hanway para el cultivo de maíz

Etapa vegetativa	Etapa reproductiva
VE (Emergencia)	R1 (Emergencia de estigma)
V1 (1º hoja desarrollada)	R2 (Cuaje)
V2 (2º hoja desarrollada)	R3 (Grano lechoso)
V3 (3º hoja desarrollada)	R4 (Grano pastoso)
V4 (4º hoja desarrollada)	R5 (Grano dentado)
V5 (5º hoja desarrollada)	R6 (Madurez fisiológica)
V6 (6º hoja desarrollada)	
V7 (7º hoja desarrollada)	
V8 (8º hoja desarrollada)	
V9 (9º hoja desarrollada)	
V10 (10º hoja desarrollada)	
VT (Panojamiento)	

**Fuente:** Ritchie y Hanway, 1982

Respecto a las diferentes variedades existentes en el país los estudios registran que en Ecuador se pueden encontrar maíces criollos y mejorados, dentro de los cuales existen variedades con múltiples características que los diferencian y es así que se han reconocido 29 razas de maíz, de las cuales 17 pertenecen a la sierra, mientras que las 12 razas restantes corresponden a maíces de la zona tropical. Considerando estas cifras, la sierra ecuatoriana es reconocida como fuente de las mayores riquezas genéticas por unidad de superficie en este cultivo (Coral et al., 2019).

Entre las principales variedades nativas del maíz que se cultivan en la sierra del Ecuador se tienen: cuzco ecuatoriano, canguil ecuatoriano, racimo de uva, chillos, huandango, morochon, patillo, chulpi y kcello. Dentro de las variedades mejoradas encontramos INIAP-122 “chaucho mejorado”, INIAP-124 “Mishca mejorado”, INIAP-102 “blanco blandito mejorado”, INIAP-111

“Guagal mejorado”, INIAP-153 “Zhima mejorado”, INIAP-180, INIAP.182, INIAP-176 e INIAP-103 (Yáñez et al., 2010).

La distribución de las variedades de la sierra va desde la sierra norte (provincias de Carchi, Imbabura, Pichincha) en donde se produce principalmente maíces con granos de tipo amarillo harinoso, en la parte central (Tungurahua, Chimborazo y Bolívar) se cultiva los maíces de grano blanco harinoso y en la sierra sur (Cañar y Azuay) el maíz denominado “Zhima”, de grano blanco dentado o amorochado (Zambrano et al., 2021).

La variedad conocida como INIAP-153 o “Zhima Mejorado” se caracteriza por ser semicristalino y tardío, la altura de la planta llega hasta 225 cm y la altura a la mazorca es de 165 cm con granos blancos y con una ligera capa harinosa (Yáñez et al., 2010). Su cultivo se da principalmente dentro de las provincias de Cañar y Azuay debido a los requerimientos del cultivo que van desde la altitud optima de 2200 a 3000 msnm, sus temperaturas favorables van de 10 a 20 °C y precipitaciones de 700 a 1300 mm en todo el ciclo, su pH óptimo va de 5.5 a 7.5 y se desarrolla muy bien en suelos profundos, ricos en materia orgánica y con buen drenaje (Yáñez et al., 2013).

### **2.3 Relación entre el contenido de clorofila y rendimiento productivo**

A lo largo de los años diferentes investigaciones han venido confirmando que la clorofila es una sustancia de gran importancia para la estimación del rendimiento de un cultivo ya que mediante la misma se puede conocer los niveles de concentración de nitrógeno en las hojas y a partir de estas concentraciones se puede tener una noción del estado físico de cada planta para así obtener una estimación de su rendimiento.

La clorofila es una sustancia de color verdoso, presente en plantas, algas y algunas bacterias; permite la producción de fotosíntesis, la cual consiste en la transformación de energía lumínica en energía química (Mathews et al., 2013).

En maíz la clorofila en la hoja está estrechamente relacionada con la concentración de N y, por lo tanto, refleja el estado nutricional con respecto a este importante nutriente. Por otro lado, la importancia de este nutriente radica en que es necesario para la síntesis de la clorofila y como parte de esta molécula, está involucrado en el proceso de la fotosíntesis, concluyendo así que cantidades adecuadas de N en la planta, producen hojas de color verde oscuro debido a que estas tienen alta concentración de clorofila y el pigmento verde de la clorofila absorbe la energía de la luz necesaria para iniciar la fotosíntesis (Rincón y Ligarreto, 2010).

El contenido y tipo de clorofila y de carotenoides influyen en la captación de luz y la transferencia de esa energía a los centros de reacción. Existen cuatro diferentes tipos de clorofila (A, B, C, D). La clorofila A es la que se encuentra en mayor cantidad y la más importante, corresponde al 75% de los pigmentos verdes que hay en la naturaleza, mientras que la clorofila B actúa como un pigmento recolector de luz absorbiendo energía luminosa y pasándola a la clorofila A. La clorofila C, se encuentra presente en los cloroplastos de las algas pardas, las diatomeas y por último la clorofila de tipo D, se encuentra especialmente en las algas rojas (Streit et al., 2015).

Además, la clorofila está involucrada en la síntesis de moléculas de crecimiento celular, por lo que es un indicador clave del estado físico de la planta, reflejado en su capacidad fotosintética, la productividad y nivel de estrés, entre otros aspectos (Umazi et al., 2016).

La importancia de la clorofila radica en que el estado nutricional del cultivo puede ser evaluado a través de la medición de la misma y esta puede ser realizada mediante equipos capaces de determinar el contenido relativo de clorofila, estas medidas se relacionan a su vez directamente con el rendimiento de la planta, por lo tanto, se podrían utilizar para poder diagnosticar deficiencias en los requerimientos de nitrógeno del cultivo (Pagani et al., 2009).

## **2.4 Eficiencia de los métodos directos e indirectos en la estimación de clorofila**

A lo largo de los años uno de los retos más grandes dentro del manejo de cualquier cultivo es el poder determinar el contenido de clorofila de manera rápida y precisa ya que esta variable contribuye a la determinación del estado de salud del cultivo. En base a esto, se han desarrollado diferentes métodos de obtención del contenido de clorofila siendo clasificados en métodos directos e indirectos.

Dentro de los métodos directos podemos encontrar algunas técnicas entre las cuales destacan el espectrofotométrico, fluoro métrico y por cromatografía líquida. Una de las más utilizadas es la técnica del espectrofotométrico UV-Vis que nos permite agilizar el proceso de análisis y tiene una elevada eficacia en su medición. Esta se trata básicamente de una técnica analítica que nos permite determinar la concentración de un compuesto en solución. Su metodología se centra en que las moléculas absorben las radiaciones electromagnéticas y a su vez que la cantidad de luz absorbida depende de forma lineal de la concentración. Para llevarlo a cabo, hacemos uso de un espectrofotómetro, en el cual podemos seleccionar la longitud de onda de la luz que pasa por una solución extractora y así medimos la cantidad de luz absorbida por ésta (Álvaro, 2019).



Sin embargo, para la aplicación de esta técnica se requiere de equipo, reactivos y tiempo que hace la determinación costosa y dispendiosa sin contar la mano de obra que se requiere para la toma de muestras en el campo, sin mencionar lo peligroso de la aplicación de estos métodos si no se cuenta con conocimientos adecuados para cada proceso.

Por su parte, los métodos indirectos consisten en la obtención del contenido de clorofila a través de técnicas que no destruyan ningún órgano de la planta, para ello se han desarrollado por un lado diferentes equipos portátiles de medición y por otro de manera reciente el uso de la teledetección.

El uso de estos medidores portátiles de clorofila se fundamenta en que parte de la luz que llega a la hoja es absorbida por la clorofila y el resto que se refleja entra en contacto con la celda detectora de los equipos siendo está convertida en una señal eléctrica. De acuerdo con sus fundamentos de uso, los equipos presentan similitudes, pero difieren en cuanto al rango de longitud de onda con la que trabaja (Castañeda et al., 2018).

Wei et al. (2012) señalan que la absorbancia a longitudes de onda cercanas a los 700 nm se correlaciona fuertemente con el contenido de clorofila en la hoja y pueden ser indicadores de estrés en la planta. No obstante, a pesar de la sencillez de estas herramientas, el análisis solo puede realizarse en una porción de las parcelas de cultivo, por lo tanto, se necesitaría gran cantidad de tiempo para la toma de estos datos, ya que se necesita recorrer toda la parcela y en extensiones de terreno grandes esto no sería viable.

## **2.5 Uso del medidor de clorofila atLeaf CHL-PLUS en la estimación de clorofila**

El medidor de clorofila atLeaf CHL-PLUS es un dispositivo robusto, portátil, fácil de usar para medir de manera no invasiva el contenido relativo de clorofila de plantas de hojas verdes. El contenido de clorofila es medido insertando una hoja en la abertura del dispositivo. Hojas verdes de hasta 3 mm de espesor y solo se requiere presionar un botón para realizar la medición (Tecnoindustry, 2020).

Su sistema de medición consiste en la diferencia de densidad óptica a 2 longitudes de onda (640 nm y 940 nm), con valores de medición de 0 a 99.9 unidades atLeaf, además posee otras unidades de medición como las de tipo SPAD y  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ . Estas opciones de medición son modificables a través del software provisto por el fabricante del equipo. También tiene una precisión de -0.6 a +0.5 unidades atLeaf. Puede almacenar hasta 9564 mediciones en la memoria del dispositivo y dispone de una interfaz USB que le permite transferir las mediciones a la computadora mediante el software gratuito atLEAFSoft para Windows. Además, permite

determinar el promedio de un número seleccionable de mediciones almacenadas (Tecnoindustry, 2020).

El uso y eficiencia de este equipo ha sido evaluado y comprobado a través de múltiples investigaciones, tal es el caso de un estudio realizado por Ali et al. (2020) en donde se buscó cuantificar y validar las relaciones entre la absorción de nitrógeno (N) y el rendimiento de grano de trigo usando mediciones durante la temporada con el medidor de clorofila atLeaf y el sensor óptico Green-Seeker (Trimble, 2022) en la etapa de crecimiento conocida como etapa de empalme o Feekes 6. Con esta información se compararon cinco modelos de regresión diferentes ajustados para describir las relaciones entre las mediciones espectrales y el rendimiento de grano en la madurez, dando como resultados que para la relación entre el rendimiento de grano y las mediciones de atLeaf el valor  $R^2$  significativo más alto fue de 0.53 siguiendo una función de potencia, mientras que, para la relación entre las mediciones de NDVI medidas con Green-Seeker y el rendimiento del grano en la madurez siguió una función exponencial con un valor  $R^2$  de 0.61. Concluyendo así que, tanto el medidor de clorofila atLeaf y el sensor óptico Green-Seeker son herramientas rápidas y confiables para predecir la absorción de N y el rendimiento de grano de trigo (Ali et al., 2020).

Por otro lado, en un estudio centrado en determinar si un nuevo medidor de transmitancia de luz, el atLeaf, podría usarse como una alternativa menos costosa frente al medidor SPAD se realizó la comparación de los valores SPAD y atLeaf para la evaluación de clorofila en cultivos de maíz, trigo, cebada, patata y canola (Konica Minolta, 2009). Para esto se realizó un experimento y se muestreó cinco veces con excepción de las muestras de trigo, que se recolectaron solo cuatro veces, para el muestreo se utilizó un medidor de clorofila SPAD-502 y un medidor atLeaf en las hojas superiores y se recolectaron un mínimo de 20 valores por planta para las mediciones SPAD y atLeaf, también se comparó la estabilidad de los valores obtenidos por ambos equipos en diferentes condiciones y con diferentes unidades. Además, se realizó un análisis en laboratorio para la extracción de clorofila de las hojas muestreadas y a través del análisis estadístico de estos datos los autores de este estudio obtuvieron como resultados correlaciones significativas entre los valores de SPAD ( $R^2 = 0.78$ ) o atLeaf ( $R^2 = 0.72$ ) por un lado y el contenido de clorofila en el laboratorio por el otro. Observaron además que las correlaciones entre los valores SPAD y los valores atLeaf fueron significativas para todas las especies y que no hubo diferencias significativas entre los valores SPAD o atLeaf. Concluyendo así que los valores SPAD y atLeaf estaban fuertemente correlacionados y no se vieron afectados por las diferentes condiciones de medición (Konica Minolta, 2009). Por lo tanto, el medidor atLeaf CHL- PLUS se puede utilizar como una alternativa económica al medidor SPAD-502, aunque se descubrió que este último es más fácil de manejar (Zhu et al.,

2012). Por otra parte, según informa Hebbar et al. (2016) los coeficientes de determinación se encontraban entre los 0.68 - 0.95 en coco, en las hojas de palma.

El medidor atLeaf CHL - PLUS al igual que otros medidores de clorofila permiten la estimación del contenido de clorofila en unidades relativas conocidas como índice de clorofila y es por ello que uno de los inconvenientes que pueden presentar este y otros medidores es la conversión del índice en valores absolutos del contenido de clorofila. Con el propósito de determinar la relación existente entre el índice de clorofila obtenido con el medidor atLeaf CHL - PLUS y el valor absoluto del contenido de clorofila un estudio desarrollado por Novichonok et al., (2016) tuvo como objetivos averiguar con que eficacia el medidor atLeaf CHL - PLUS permite estimar el contenido de clorofila a, clorofila b y clorofila (a+b), además de investigar si la precisión de esta estimación varía para diferentes especies de plantas y si las condiciones de luz influyen en dicha precisión. Para esto se realizó un experimento en dos especies, las mediciones se realizaron 5 veces con el equipo atLeaf CHL - PLUS a longitudes de onda de 665, 649 y 470 nm, posterior a esto se obtuvo un promedio de las mismas para luego determinar el contenido absoluto de clorofila a través de la espectrofotometría. Una vez obtenidos estos datos se realizó un análisis de regresión y se dedujo una ecuación general para la relación entre el valor atLeaf y el contenido de clorofila para todo el conjunto de datos, dando como resultados que las relaciones entre los valores de atLeaf y el contenido de Clorofila a, Clorofila b y Clorofila (a+b) pueden ser calculadas tanto por unidad de área foliar como por unidad de masa foliar seca (MS), sin embargo, fue más fuerte cuando se calculó como el contenido de clorofila por unidad de área foliar, estas relaciones se expresaron mejor mediante una función exponencial, no lineal y fueron específicas de la especie. Además, se demostró que, sí existe influencia de las condiciones de luz en el valor atLeaf, por ello los autores concluyen que a pesar de la alta precisión del medidor atLeaf CHL - PLUS, es importante tener en cuenta que la máxima precisión de la estimación se logró por unidad de área foliar y que fue necesario utilizar una ecuación específica de especie al convertir el valor de atLeaf en el contenido absoluto de clorofila para cada especie de planta. Por otra parte, concluyen que es necesario tener en cuenta las condiciones de crecimiento y que el medidor atLeaf CHL - PLUS podría ser una herramienta conveniente para una estimación rápida y no destructiva después de la calibración adecuada (Novichonok et al., 2016).

## **2.6 Uso de la teledetección para la estimación de clorofila**

La teledetección en el dominio solar proporciona mediciones de esta y otras variables en toda la porción de territorio (Silyain et al., 2017). Se refiere a las diferentes maneras de adquirir información por medio de sensores sin tener contacto físico con el objeto, los sensores están

en la plataforma de observación estos pueden ser aviones o satélites, y registran información centrada en las regiones del espectro electromagnético, su objetivo es obtener las características y fenómenos de una superficie observada (Sitjar, 2014).

#### Definición de UAV

Los drones, vehículos aéreos no tripulados (VANT) o por sus siglas en inglés UAV (Unmanned Aerial Vehicle), son equipos completamente deshabitados y reutilizables como menciona Blyenburgh (1999). Estos equipos con el pasar de las décadas se incorporan más dentro del campo de la agricultura, ya sea realizando muestreo de los campos, monitoreo de los cultivos, así como de plagas y enfermedades, etc. Siendo estos algunos de los beneficios que permiten llevar una agricultura más tecnificada, por lo tanto, los UAVs permiten ampliar y mejorar la productividad de los cultivos, dándoles un seguimiento y control en el momento adecuado, o cuando este se encuentre bajo condiciones de estrés de cualquier índole, estos y otros beneficios nos permiten formar parte en una minúscula proporción a los programas de agricultura de precisión (Stehr, 2015)

#### Limitaciones de los UAVs

Los vehículos aéreos no tripulados, en específico aquellos que resultan más económicos, limitan la carga útil del sensor en peso y dimensiones, por lo que a menudo se seleccionan sensores de bajo peso, como cámaras de aficionado de formato pequeño o medio. Por lo tanto, en comparación con las cámaras de gran formato, los UAV tienen que adquirir un mayor número de imágenes para obtener la misma cobertura y una resolución comparable. Además, los sensores de bajo coste suelen ser menos estables que los de gama alta, lo que se traduce en una mejor calidad de imagen. Además, estas limitaciones de carga útil obligan a utilizar unidades de navegación de bajo peso, lo que implica resultados menos precisos. Unidades de navegación, lo que implica resultados menos precisos para la orientación de los sensores (Colomina y Molina, 2014). La autonomía de vuelo del UAV también depende, además de la regulación de la línea de visión, de la habilidad del piloto para detectar y seguir la trayectoria de la aeronave.

### **2.7 Sensor Parrot sequoia**

El sensor multiespectral Parrot Sequoia está revolucionando el sector ofreciendo una solución integral, adaptable y compatible con todo tipo de UAVs. Con sus dos sensores, multiespectral y solar parrot sequoia analiza la vitalidad de las plantas capturando la cantidad de luz que absorben y reflejan. La recopilación de estos datos significa que los agricultores pueden hacer lo mejor para sus campos.

## Especificaciones Técnicas

### Cámara RGB 16 MPIX

- Definición: 4608×3456 píxeles
- HFOV: 63.9°
- VFOV: 50.1°
- DFOV: 73.5°

### Dimensiones y características

- 59 mm x 41 mm x 28 mm
- 72 g (2.5 oz)
- Hasta 1 fps
- Almacenamiento incorporado de 64 GB
- IMU & magnetómetro
- 5 W (pico ~12 W)

### 4 Cámaras con obturador global de una sola banda de 1.2 MPIX

- Definición: 1280 x 960 píxeles
- HFOV : 61.9°
- VFOV : 48.5°
- DFOV : 73.7°

### Sensor solar

- 4 sensores espectrales (los mismos filtros que el cuerpo)
- GPS
- IMU & magnetómetro
- Ranura para tarjeta SD
- 47 mm x 39.6 mm x 18.5 mm
- 35 g (1.2 oz)
- 1 W

### 4 bandas distintas

- Verde (550 BP 40)
- Rojo (660 BP 40)
- Borde rojo (735 BP 10)
- Infrarrojo cercano (790 BP 40) (TYCGIS, 2017).

## 2.8 Índices de vegetación

Se lo puede definir como un parámetro calculado en base a los valores de la reflectancia de distintas longitudes de onda, y que es sensible a la cubierta vegetal, también, es el número generado por una combinación de bandas espectrales que podría estar relacionado con la vegetación que se encuentra en un pixel (Muñoz, 2013)

Índice de vegetación de Borde rojo (NDRE). – NDRE es un índice espectral que se construye como una mezcla de varias bandas: el espectro del Infrarrojo Cercano (NIR) y una banda que utiliza un estrecho rango espectral entre el Rojo visible y el NIR conocido como RED EDGE o BORDE ROJO. Este índice es muy similar al índice de diferencia normalizada (NDVI), sin embargo, el NDRE es más sensible durante un cierto período de maduración del cultivo. El NDRE es un mejor indicador de las condiciones de las plantas que el NDVI para cultivos en temporada media y tardía de crecimiento que ya han acumulado una gran cantidad de clorofila. La razón es que la luz de borde rojo (la que se usa en el NDRE) puede atravesar las hojas mucho más profundamente que la luz roja (la que se usa en el NDVI). Es más útil que el NDVI para un uso intensivo durante toda la temporada de cultivo, ya que el NDVI a menudo se vuelve impreciso cuando las plantas acumulan la cantidad máxima posible de clorofila (EOS, s.f.).

El índice NDRE ha demostrado ser más sensible ante variaciones de vigor del cultivo dentro de un estudio realizado por Reveló et al. (2020), el cual sugiere que podría presentar mayor sensibilidad en la determinación del contenido de clorofila pigmento que se encuentra estrechamente ligado al vigor vegetal.

Por otro lado, el índice NDRE ha sido evaluado junto a otros índices de vegetación en la estimación de nitrógeno foliar en el cultivo de triticali (x. *Triticosecale wittmack*), para lo cual utilizaron imágenes Sentinel 2A y 2B y se correlacionaron con datos de muestreos foliares que permitieron conocer el nitrógeno extraído por el cultivo (NEC), los resultados obtenidos demostraron que este índice es uno de los que presentaron un coeficiente de correlación más alto con un  $R^2$  de 0.80 (Rivera et al., 2019). Debido a esto, se puede inferir que el índice NDRE es una muy buena opción al momento de estimar nitrógeno y debido a que este nutriente está ampliamente relacionado con el contenido de clorofila se puede llegar a tener una idea de la concentración de clorofila que tiene un cultivo.

El índice NDRE es una herramienta eficaz al momento de estimar el contenido de clorofila debido a que trabaja con la longitud de onda de BORDE ROJO, el cual proporciona un indicador sensible al contenido de clorofila en las hojas, la densidad de las hojas y el suelo,

esto se da porque la longitud de onda BORDE ROJO penetra una hoja mucho más profundamente que las longitudes de onda rojas o azules. Este supuesto es comprobado por un estudio desarrollado por (Boiarskii y Hasegawa, 2019) en donde se pretendía detectar diferencias en la cantidad de vegetación y el contenido de clorofila utilizando imágenes multiespectrales con el fin de identificar áreas de vegetación con crecimiento deficiente que podrían requerir fertilizante adicional para el suelo, para esto se compararon los índices NDVI y NDRE. Los resultados indicaron que el índice NDVI mostró un color verde visible donde quiera que hubiera vegetación, sin embargo, con el índice NDRE se observaron cultivos con bajo contenido de clorofila, lo que indica limitación de nitrógeno en las hojas. Estas observaciones demuestran la eficacia de usar NDRE como un índice sensible para monitorear el contenido de clorofila e indican que, por lo tanto, NDRE es más adecuado para etapas de crecimiento medio y tardío, cuando los cultivos han acumulado altas concentraciones de clorofila en las hojas y la luz roja penetrarán mal.

El índice NDRE, a pesar de que fue diseñado para detectar el comportamiento de la clorofila, tuvo inconvenientes para poder analizar, aquel tejido vegetal que presenta un estado avanzado de clorosis, sin embargo, cuando el estado del tejido vegetal es vigoroso, los resultados pueden llegar a ser muy favorables (Solis et al., 2021), por lo que sugieren que el índice NDRE, no es un buen estimador de la clorofila, cuando el cultivo se ve afectado por alguna lesión mecánica, sustancias químicas o algún agente patogénico.

### 3. Materiales y Métodos

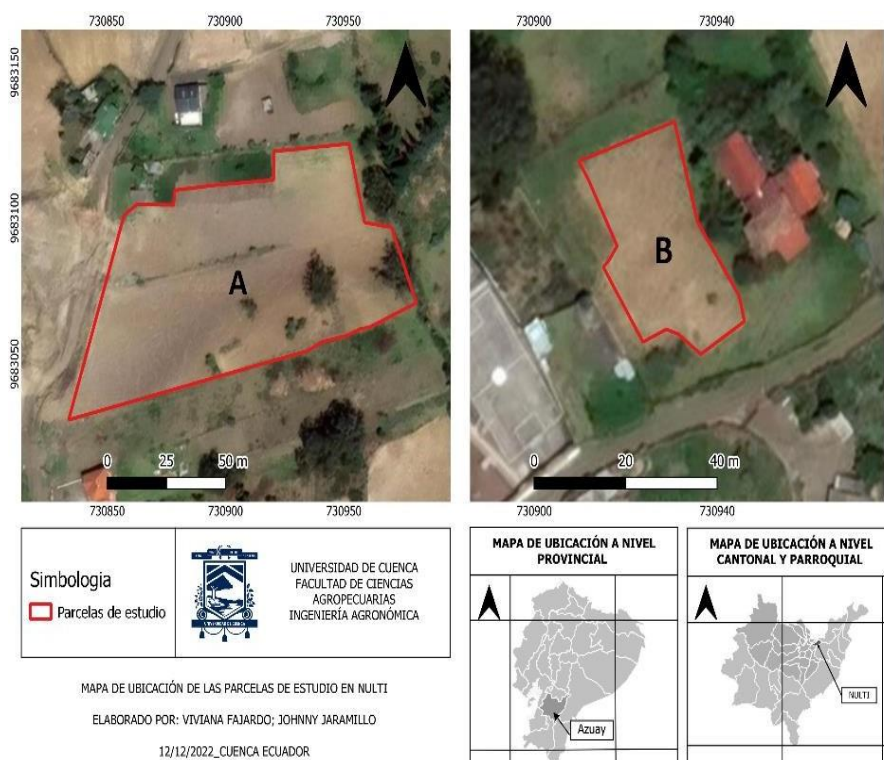
#### 3.1 Zona de estudio

Para el área de estudio se consideraron tres parcelas de producción de maíz, dos de ellas dentro de la parroquia Nulti, identificadas como parcelas A y B (**Figura 1**) y una dentro de la parroquia el Valle identificada como parcela C (**Figura 2**). Estas parcelas se ubican en el cantón Cuenca dentro de la provincia del Azuay al sur del Ecuador y fueron elegidas procurando que su etapa vegetativa sea útil para los fines de esta investigación y que todas mantengan condiciones similares en cuanto a manejo del cultivo y variedad cultivada. Considerando que dentro de la provincia del Azuay la variedad más cultivada es la conocida como Zhima blanco se trabajó con esta variedad en una extensión total aproximada de 1 ha.

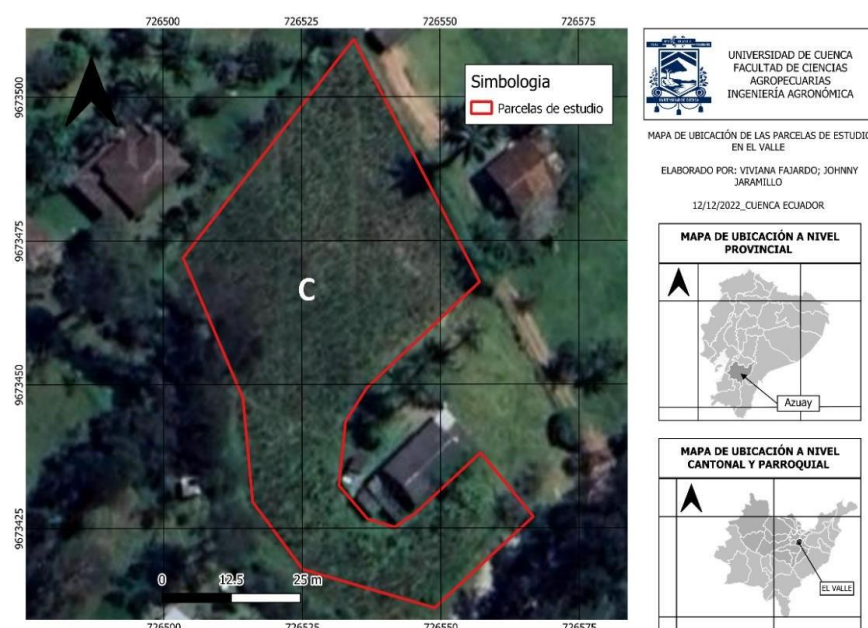
La provincia cuenta con un clima variable debido a la altura, desde el tropical hasta el glacial, debido a la presencia de la cordillera de los Andes y la vegetación subtropical al occidente (Cevallos, 2018). La parroquia de Nulti cuenta con una altitud de 2577 msnm, una temperatura media de 15.6°C, precipitación anual de 766.4 milímetros y velocidad del viento 2.2 metros



por segundo, media anual (Gomez, 2015). Por su parte en la parroquia El Valle el clima es ecuatorial mesotérmico semihúmedo, con precipitaciones anuales de 500 a 2500, tiene dos estaciones lluviosas que oscilan entre febrero – mayo y octubre – noviembre. La temperatura media oscila entre 12 y 20°C, siendo las más elevadas en los meses de marzo y septiembre, mientras que las bajas ocurren entre junio y julio (Toledo, 2015).



**Figura. - 1** Mapa de ubicación de las parcelas en Nulti



**Figura. - 2** Mapa de ubicación de la parcela en el Valle



### 3.2 Caracterización de las parcelas de producción

Para la determinación del manejo agronómico del cultivo, se realizó una encuesta a cada productor, donde se consideraron, el tipo de suelo, fertilización, manejo de plagas y enfermedades, riego, labores pre culturales, semilla (**Anexo 1**). Además, se recolectaron muestras de suelo y se realizó un análisis básico del mismo para cada parcela en el laboratorio de suelos de la facultad de Ciencias Agropecuarias (**Anexo 2**).

De lo recolectado en la encuesta para la parcela A de Nulti, se estableció que cuenta con 5000 m<sup>2</sup>, donde predominaba el cultivo de maíz asociado con fréjol (*Phaseolus vulgaris*), el distanciamiento entre cada planta es de (1 m X 0.80 m), en una pequeña proporción tenemos el cultivo de vicia (*Vicia sativa*), además de la presencia de especies arvenses que se encuentran diseminadas por todo el terreno, entre las cuales podemos mencionar al *Pennisetum clandestinum*, *Trifolium repens*, *Sorgum halepense*, *Bidens pilosa*. En lo que corresponde a la topografía, el terreno tiene 15 % de pendiente, en cuanto al tipo suelo, fue caracterizado como franco arcillo arenoso, esto fue determinado a través de pruebas realizadas en campo, también se realizó el análisis de pH = 7.9, y Ce = 0.1256 ms/cm<sup>2</sup>. Esta unidad de estudio no contaba con un sistema de riego, en lo que respecta a actividades culturales, solo realizaban el arado del suelo.

La segunda encuesta correspondiente a la parcela B, también se encuentra en la parroquia Nulti, dicha unidad cuenta con una extensión de terreno de 1000 m<sup>2</sup>, en lo que corresponde a la vegetación del área, predomina el cultivo de maíz asociado con fréjol (*Phaseolus vulgaris*), la densidad de siembra se encuentra determinada por la distancia entre cada planta siendo esta (0.80m X 0.60m), en cuanto a especies arvenses tenemos, *Pennisetum clandestinum*, *Trifolium repens*, *Portulaca oleracea*, *Sorgum halepense*, *Ipomea purpurea*, *Bidens pilosa*. La topografía del terreno es completamente plana con un 3% de pendiente, en cuanto al tipo de suelo fue un Arcillo Arenoso, caracterizado a través de pruebas de campo, al igual el análisis del pH = 7.9, y Ce = 0.1460 ms/ cm<sup>2</sup>. Esta unidad de estudio, tampoco dispone de riego, en cuanto a enmiendas culturales, únicamente realizan el arado del terreno y aportan al suelo abono orgánico.

La tercera encuesta dirigida a la parcela C quien se encuentra en la parroquia del Valle, en la comunidad de Maluay, indica que el área de estudio cuenta con 3000 m<sup>2</sup>, en esta área de estudio predomina el cultivo de maíz asociado con fréjol (*Phaseolus vulgaris*) y zambo (*Cucurbita pepo*), en lo que respecta a las especies arvenses nos encontramos con *Ipomea purpurea*, *Bidens pilosa*, *Pennisetum clandestinum*, *Trifolium repens*. La distancia de siembra para esta área era de (0.80 m X 0.30). La topografía del terreno, tiene pendiente del 2% es

prácticamente plano, el tipo de suelo franco arcilloso, caracterizado a través de pruebas de campo. Los análisis de pH = 6.6, y  $C_e = 0.1317 \text{ ms/cm}^2$ . Esta unidad de estudio tampoco dispone de riego, en lo que respecta a las actividades culturales, realizaban el arado del suelo, el aporque, la fertilización se realizaba únicamente con abono orgánico.

### 3.3 Materiales

Los principales materiales utilizados para la presente investigación consistieron en:

**Cámara multiespectral Parrot Sequoia.** - Este es un sensor multiespectral que cuenta con las bandas, VERDE ( $550 \text{ nm} \pm 40 \text{ nm}$ ), ROJO ( $660 \text{ nm} \pm 40 \text{ nm}$ ), BORDE ROJO ( $735 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$ ) e INFRARROJO ( $790 \text{ nm} \pm 40 \text{ nm}$ ). Además, cuenta con una resolución de RGB de 16 MP ( $4.608 \times 3.456 \text{ px}$ ) y con calibración radiométrica automática.

**UAV - Mavic (Vehículo aéreo no tripulado).** - Este equipo cuenta con un plegado de H 83 mm x W 83 mm x L 198 mm, velocidad máxima de 65 km/h sin viento, velocidad de descenso máx. de 3 m/s, altura máx. de servicio sobre el nivel del mar de 5 000 m y tiempo de vuelo máx. de 27 minutos (sin viento a una velocidad constante de 25 km/h).

**Ortofotos.** - Imágenes fotográficas del terreno, cuya proyección ha sido convertida en una proyección ortogonal, eliminando las distorsiones planimétricas causadas por la inclinación de la cámara aérea y el desplazamiento por el relieve. Estas imágenes serán tomadas a 80 metros de altura y con un tamaño de píxel considerado entre 6 - 8 cm.

**Medidor de Clorofila at Leaf CHL – PLUS.** - Mide de forma no invasiva el contenido relativo de clorofila de las plantas de hoja verde. Las mediciones se realizan en hojas verdes de hasta 3mm de grosor. Cuenta con tecnología de medición: Diferencia de densidad óptica a 2 longitudes de onda (640 y 940 nm). Requiere de una alimentación: 2 pilas AA de 1.5V, el equipo tiene las siguientes dimensiones: 175 x 50 x 45 mm.

**Otros materiales:** Computador portátil, Software - Qgis 3.22, Software estadístico Rstudio

### 3.4 Metodología

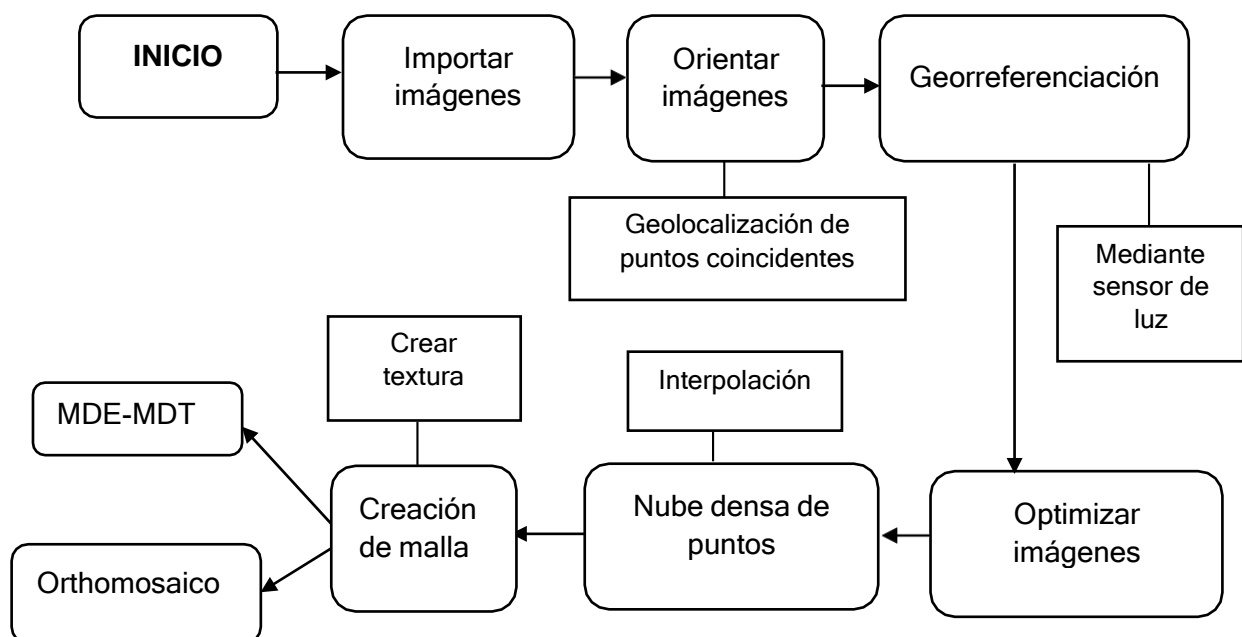
**3.4.1 Metodología implementada en el objetivo específico uno: Estimar el contenido de clorofila del cultivo de maíz (*Zea mays*) a través del índice de diferencia normalizada de borde rojo (NDRE).**

Para cumplir con este objetivo, durante el mes de mayo en el momento en que los cultivos se encontraban en la etapa reproductiva R3 (grano lechoso) de acuerdo con la escala fenológica (**Tabla 1**), se inició la recolección de datos.

Previo a esto se realizó la planificación de los vuelos, haciendo uso de la aplicación DjiPilot. Los parámetros escogidos para las parcelas A, B y C fueron un traslape de 80 frontal y 65 lateral, un ángulo cenital de cámara de 90°, velocidad máxima de 10 m/s y una altura de vuelo de 80 m. Se realizó un solo vuelo para cada parcela.

Con la cámara multispectral Parrot sequoia incorporada a un UAV (Vehículo aéreo no tripulado) se realizó el vuelo sobre cada parcela de investigación a una altura de 80 m con un tamaño de píxel entre 6 y 8 cm, obteniendo imágenes multispectrales con información de 4 bandas (Verde, Rojo, Borde rojo, Infrarrojo) e imágenes RGB.

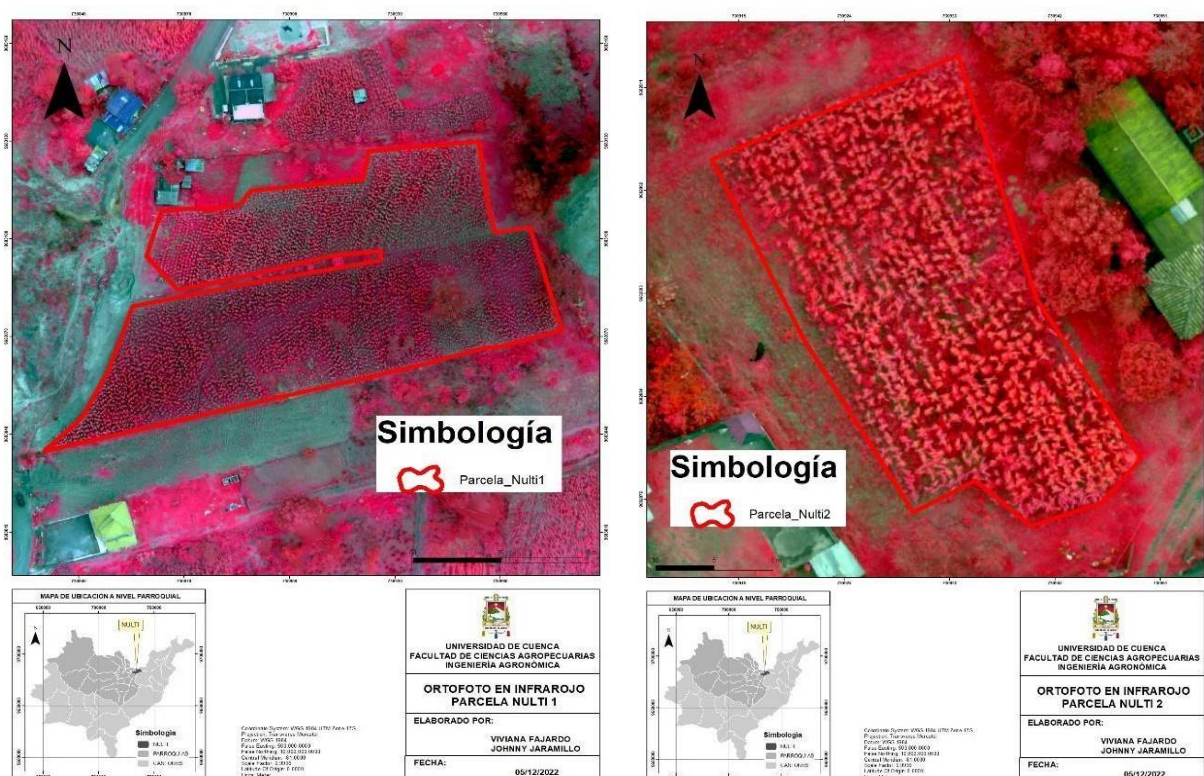
Estas imágenes cuentan con una corrección radiométrica adquirida a través del panel de reflectancia y sensor de luz utilizados al momento del vuelo y que son propios del equipo, este panel es fabricado con un material del cual se conoce su respuesta espectral la cual es captada por el sensor de luz incorporada en el equipo. Además, se realizó el post-procesamiento de las imágenes, el cual nos permitió realizar la corrección geométrica de las mismas, para esto se utilizó un software GIS y se siguió el flujograma fotogramétrico mostrado a continuación (**Figura 3**)



**Figura. - 3** Flujograma fotogramétrico para el procesamiento de imágenes

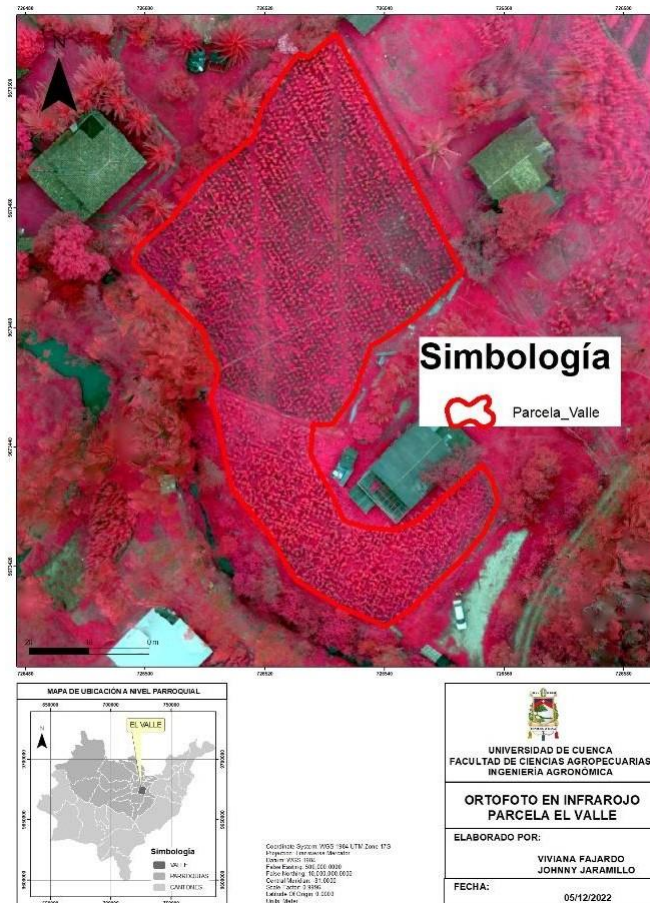
Este flujo consistió primeramente en importar las imágenes al software GIS desde una carpeta previamente creada, en donde se encontraban todos los archivos obtenidos con la cámara, seguido de esto se procedió a orientar cada una de las imágenes obtenidas a través de puntos

coincidentes geo localizados previamente por el programa de planeamiento de vuelo, de tal forma que se pueda visualizar una nube de puntos alineados. La georreferenciación de las imágenes consistió en definir el sistema de coordenadas con el que vamos a trabajar y a su vez cargar las coordenadas conocidas por medio del sensor de luz propio de Parrot Sequoia para posteriormente ubicarlos en las fotografías con el fin de que no queden desconfiguradas ni en posición (X, Y) ni en altura (Z), para finalizar este proceso se procedió a optimizar las imágenes. Lo siguiente fue generar la nube densa de puntos y la creación de una malla con el fin de generar textura al modelo, lo cual consistió en la interpolación a través de los puntos ya conocidos. Finalmente, como productos de este post-procesamiento se obtuvo el modelo digital de elevación y a su vez el ortomosaico u ortofoto de cada una de las parcelas de investigación (A, B y C) como se puede observar en la **Figura 4 y 5**.



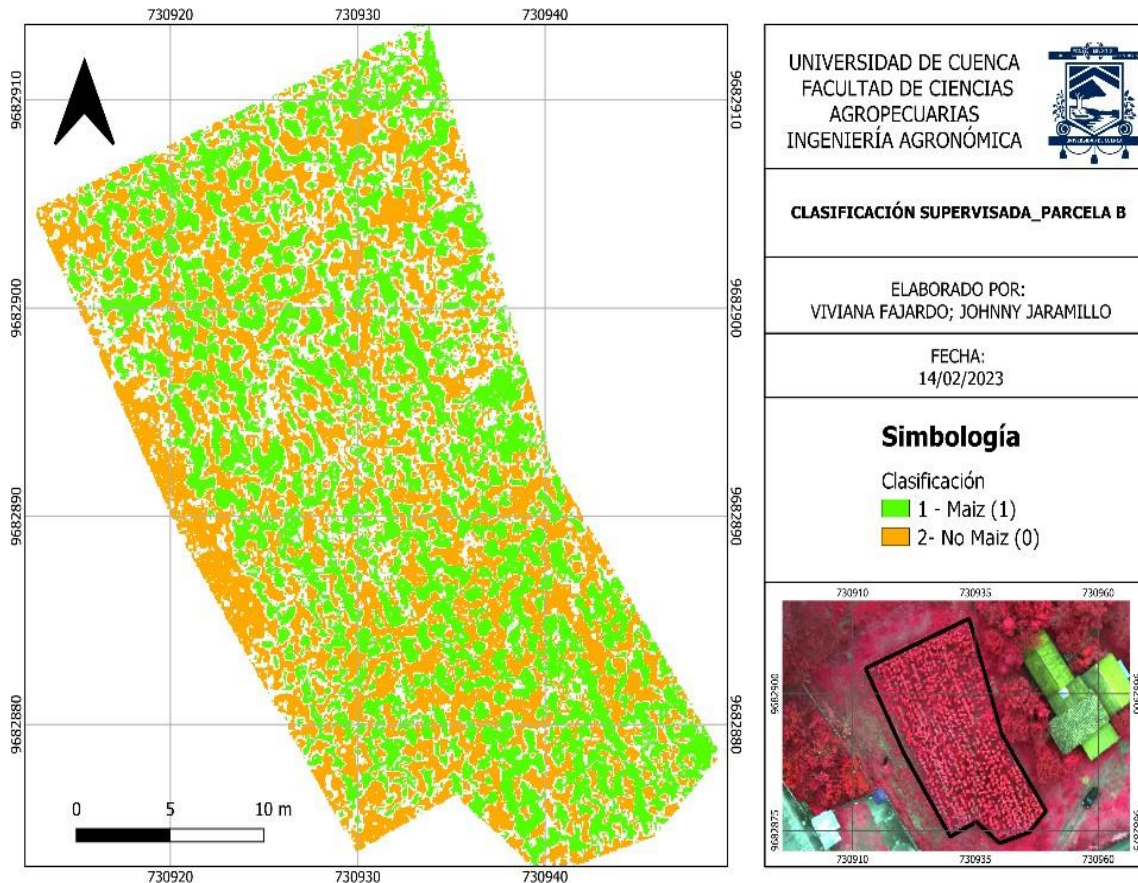
**Figura. - 4** Ortofotografías de las parcelas A y B





**Figura. - 5** Ortofotografía de la parcela C

Una vez obtenidas las ortofotos se realizó un corte delimitando únicamente el área de interés, para esto se creó una capa shapefile de tipo polígono con referencia de coordenadas iguales a las de las ortofotos, de tal forma que nos sirva como un molde para realizar el corte. Luego de esto procedió a realizar una clasificación supervisada de la imagen a través de la herramienta Semi-Automatic Classification Plugin (SCP), de tal forma que se puedan distinguir dos clases denominadas Maíz y No maíz (**Figura 6**), para esto se tomaron 25 muestras de cada clase con la finalidad de que la clasificación, sea la más apegada a la realidad, para su categorización se utilizaron códigos alfanuméricos siendo 1 para Maíz y 0 para No maíz, los parámetros de clasificación utilizados fueron el algoritmo “Distancia Mínima”, y en el apartado de “Clasificación de Firmas de la Cobertura Terrestre” se escogió la opción “LCS”.

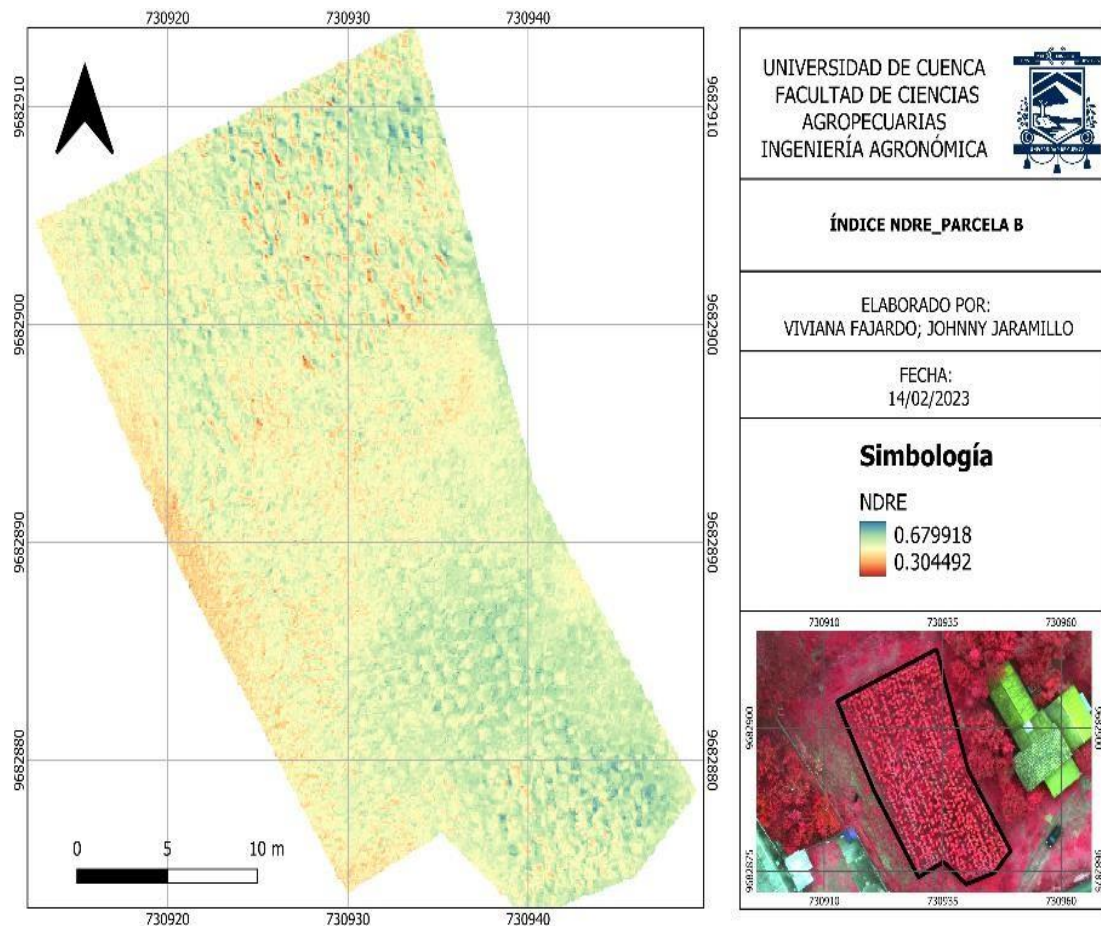


**Figura. - 6** Clasificación de clases dentro del panel “SCP” para la parcela B (Nulti).

Posterior a esto, a través de la opción “Calculadora Raster” se elaboró el índice de vegetación de diferencia normalizada de borde rojo (NDRE) (**Figura 7**) expresado de la siguiente manera:

$$\text{NDRE} = (\text{NIR} - \text{RED EDGE}) / (\text{NIR} + \text{RED EDGE})$$

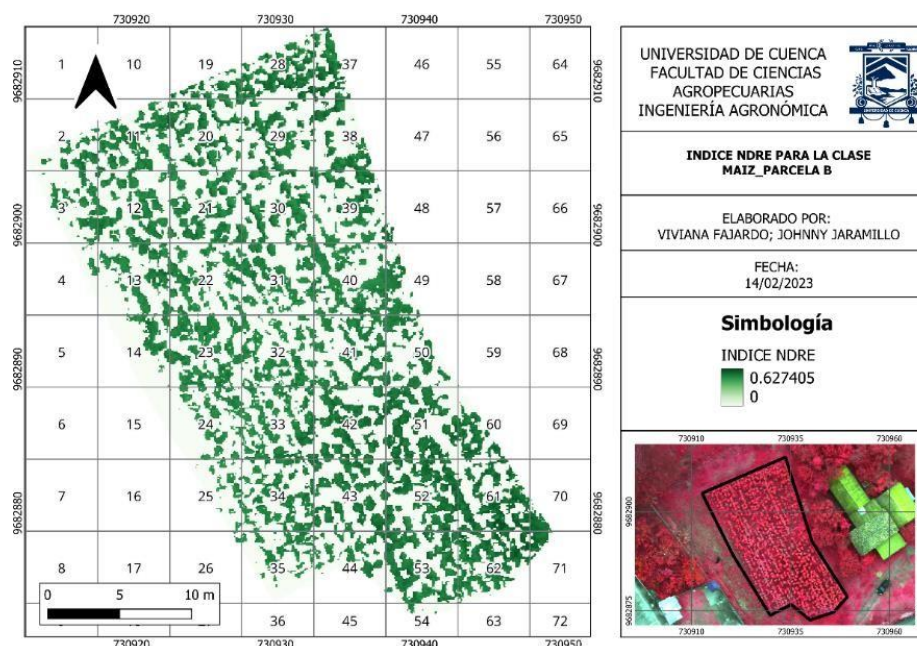
Donde NIR hace referencia al Infrarrojo cercano y RED EDGE, corresponde al salto del Infrarrojo (Borde Rojo).



**Figura. - 7** Índice NDRE para la parcela B (Nulti)

Siguiendo con el procesamiento se creó un álgebra de mapas, el cual se obtiene de multiplicar las capas raster correspondientes al índice NDRE y la capa de clasificación de uso de suelo, finalmente obtenemos un mapa en el cual se logra apreciar únicamente valores del índice para la clase maíz. Una vez obtenida esta capa se creó una cuadrícula que divide la parcela en 150, 72 y 70 segmentos para las parcelas A, B y C respectivamente, de los cuales se tomó en cuenta únicamente los segmentos que contenían información de la parcela y se obtuvo el promedio de los píxeles comprendidos en cada uno de estos segmentos a través del programa R Studio (**Figura 8**).





**Figura. - 8** Índice NDRE para la clase maíz y cuadrícula para la parcela B (Nulti).

### 3.4.2 Metodología implementada en el objetivo específico dos: Validar las técnicas de teledetección para la estimación de clorofila mediante el medidor de clorofila atLeaf CHL-PLUS.

Para la toma de datos en campo con el medidor atLeaf CHL-PLUS primero se procedió a determinar el tamaño de la muestra para las parcelas de estudio, para ello se tomará un aproximado de 10 plantas por cada 1000 m<sup>2</sup>, tomando así un total de 50 muestras para la parcela A, 10 para la parcela B y 20 para la parcela C.

Posterior a esto se seleccionaron las plantas al azar y se etiquetó cada una. Las lecturas con el sensor atLeaf CHL-PLUS se tomaron en el tercio medio de la planta, en la hoja 11 y en la mitad de la hoja, donde se encuentran los contenidos de clorofila más altos significativamente según Rincón y Ligarreto (2010). Los datos obtenidos se trabajaron en unidades atLeaf y las mediciones se realizaron cada 8 días, desde la fase R3 hasta que el grano alcance la madurez fisiológica.





**Figura. - 9** Toma de datos en campo con el equipo atLeaf CHL-PLUS

Para el análisis estadístico los datos obtenidos fueron sometidos a pruebas de normalidad mediante las pruebas de Shapiro Wilk para muestras menores a 50 datos y Kolmogorov-Smirnov para muestras superiores a 50 datos. Además, se realizaron pruebas de homocedasticidad de Bartlett para muestras normales y Levene para muestras no normales. Una vez realizado las interpretaciones de estas pruebas se realizó el reagrupamiento de los datos, que consistió en reordenar los datos obtenidos con el índice según la ubicación de cada una de las plantas escogidas anteriormente para la toma de datos con el medidor atLeaf CHL-PLUS.

Con los datos reagrupados se realizó correlaciones de Pearson ( $p < 0.05$ ) para los datos normales, mientras que para los datos no normales se empleó el coeficiente de correlación de Spearman ( $p < 0.05$ ). Estas correlaciones se realizaron entre los valores obtenidos a través del equipo atLeaf CHL-PLUS y el índice NDRE mediante el software R Studio, lo cual nos permitió verificar qué tan precisos fueron los valores del contenido de clorofila obtenidos a través de la teledetección.

Finalmente se elaboró un gráfico general de las correlaciones en las parcelas de estudio, en donde se obtuvo una visión completa del comportamiento del índice NDRE frente al equipo atLeaf CHL-PLUS (**Anexo 6**).

### **3.4.3 Metodología implementada en el objetivo específico tres: Analizar el efecto del contenido de clorofila sobre el rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays*).**

Para analizar qué tipo de relación hay entre el contenido de clorofila y el rendimiento del cultivo, se cosecharon las mazorcas de cada unidad experimental, seguidamente, del pesado y desgranado de las mazorcas para finalmente contar y pesar los granos de maíz, esto nos

permitió posteriormente analizar la relación entre el peso total de los granos con la estimación de la clorofila.



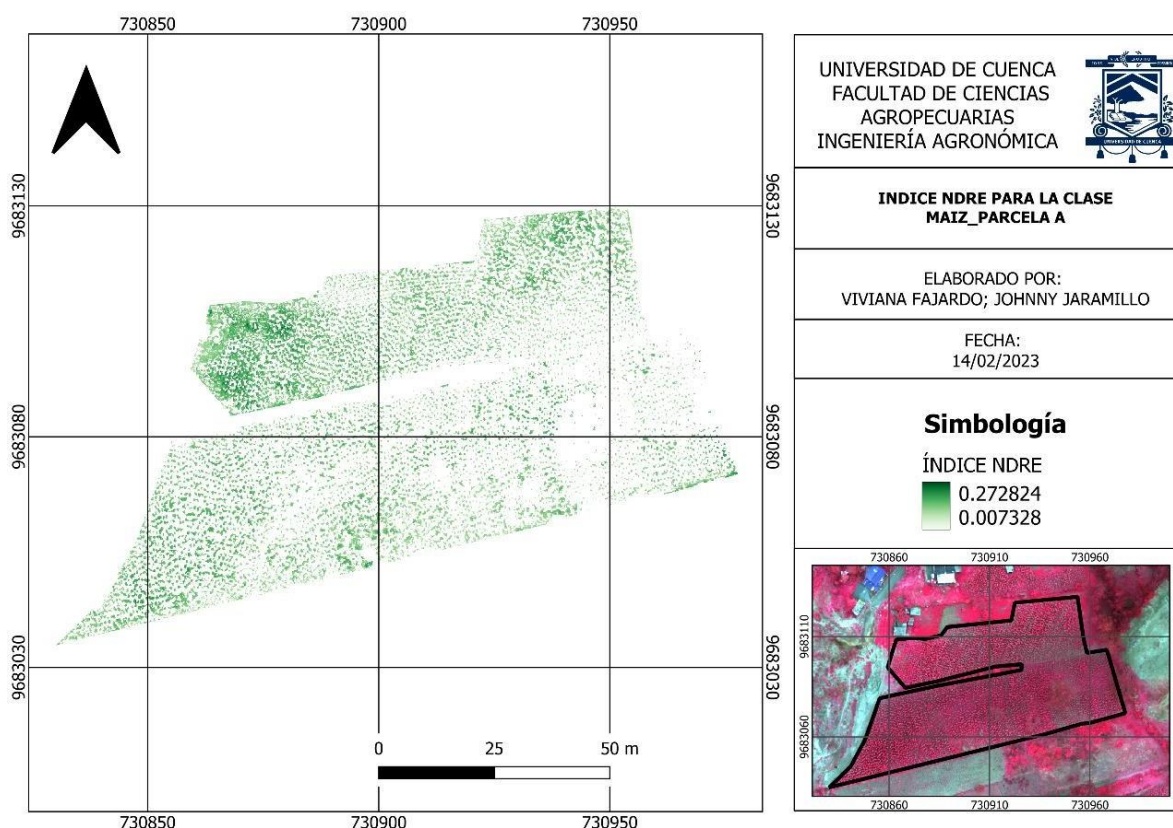
**Figura. - 10** Toma de variables de producción

Para determinar la relación que existe se aplicó pruebas de normalidad mediante Shapiro Wilk. Además, se realizó una correlación entre los valores del contenido de clorofila y el rendimiento por parcela. De esta forma se determinó la relación del contenido de clorofila sobre el rendimiento del cultivo de maíz.

## 4. Resultados

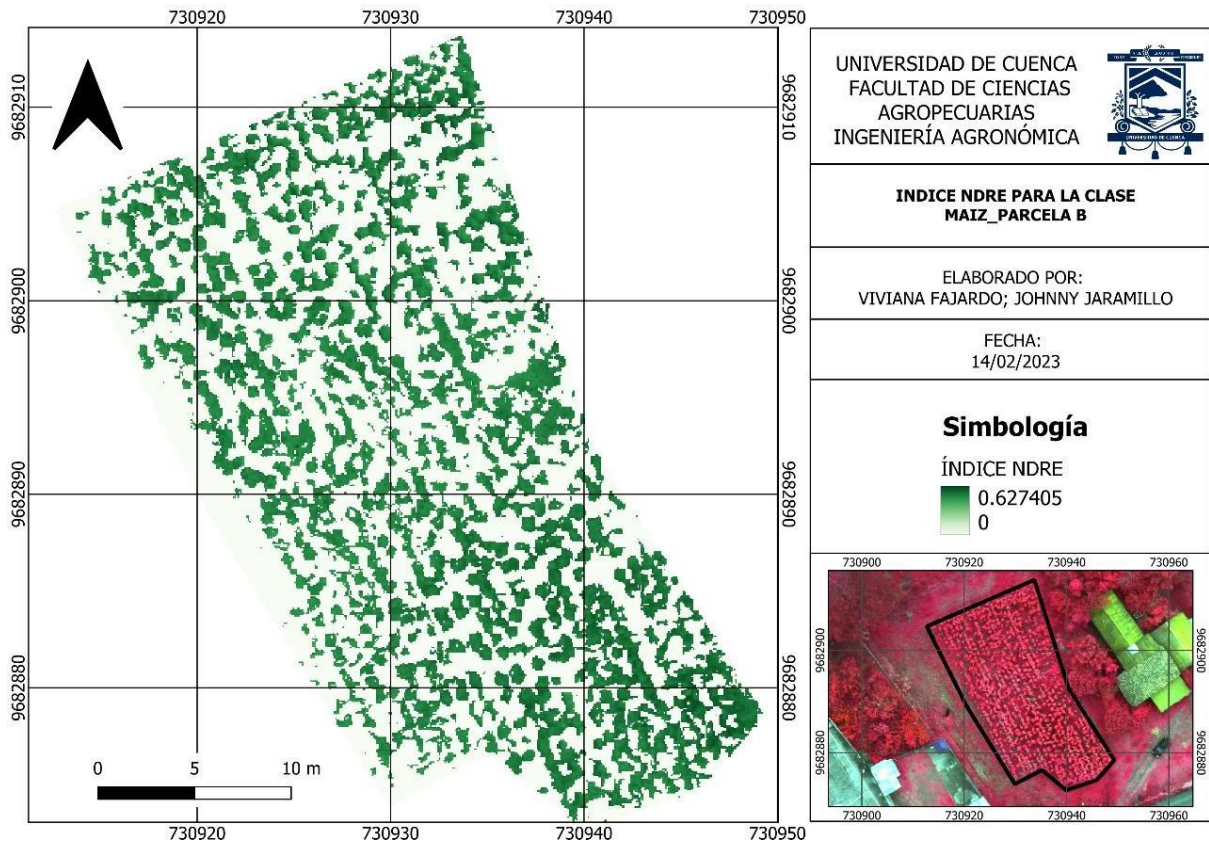
### 4.1 Estimación el contenido de clorofila del cultivo de maíz (*Zea mays*) a través del índice de diferencia normalizada de borde rojo (NDRE). Objetivo 1

Como primeros resultados de esta investigación se obtuvieron los datos del índice NDRE para cada parcela de estudio. Debido a que las parcelas no son monocultivos de maíz, sino asociaciones, fue necesario excluir todos los valores que no pertenecen al cultivo. De esta forma se pudo obtener únicamente los valores del índice NDRE del cultivo de maíz (*Zea mays*).



**Figura. - 11** Índice NDRE para el cultivo de maíz de la parcela A (Nulti)

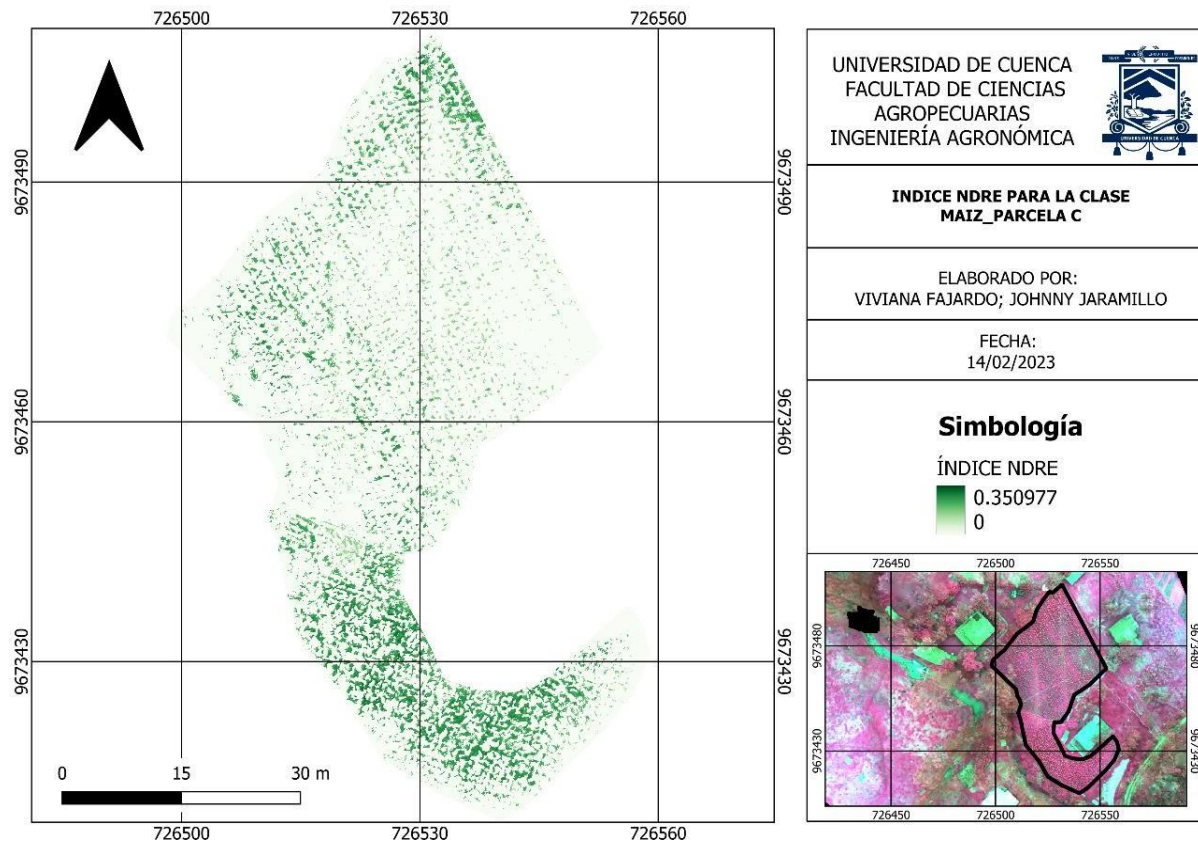
En la **Figura 11** podemos observar a través de una rampa de colores, los valores del índice NDRE para el cultivo de maíz (*Zea mays*) en la parcela A, ubicada en Nulti, en donde encontramos valores que van de 0.007328 a 0.272824, lo cual indica que los valores más altos del índice son aquellos que contienen altos niveles de reflectancia para la banda BORDE ROJO y están representados en este caso por un color verde intenso, mientras que los valores más bajos del índice, representados por un color menta, obtuvieron niveles inferiores de reflectancia en la banda BORDE ROJO, por lo tanto se puede decir en base a los estudios previos, que a valores de índice altos representan un mayor valor de clorofila.



**Figura. - 12** Índice NDRE para la clase maíz de la parcela B (Nulti)

Para la parcela B ubicada en Nulti podemos observar en la **Figura 12** los valores del índice NDRE para el cultivo de maíz (*Zea mays*) a través de una rampa de colores, aquí encontramos valores que van de 0 a 0.627405 indicando así las zonas de menor y mayor reflectancia en la banda BORDE ROJO, basándonos en el supuesto de que a mayor valor de índice mayor concentración de clorofila se puede deducir que las estimaciones de concentración de clorofila superiores se encuentran en las zonas representadas en este caso por un color verde intenso y las estimaciones de concentración de clorofila inferiores se encuentran en las zonas representadas por un color menta.





**Figura. - 13** Índice NDRE para la clase maíz de la parcela C (El Valle)

La **Figura 13** correspondiente a la parcela C ubicada en El Valle nos presenta los valores del índice NDRE para el cultivo de maíz (*Zea mays*) a través de una rampa de colores, en donde los valores más altos son representados con un color verde intenso y los valores bajos con un color menta. Es así que podemos distinguir valores que van de 0 a 0.350977 siendo estos últimos los de mayor nivel de reflectancia en la banda BORDE ROJO y por ende se deduce que estas zonas presentan una mayor concentración de clorofila.

#### 4.2 Validación de las técnicas de teledetección para la estimación de clorofila. Objetivo

##### 2

Para este objetivo se contrastaron los datos obtenidos con el medidor de clorofila atLeaf CHL-PLUS, con los valores del índice NDRE. Previamente fue necesario verificar la normalidad y homocedasticidad de estas variables.

#### Pruebas de normalidad de los datos

**Tabla 2.** Pruebas de normalidad, para los datos obtenidos en campo en el cultivo de maíz (*Zea mays*) mediante el equipo atLeaf CHL-PLUS.  $p > 0.05$

Parcela	variable	N	media	D.E.	D, W*	p (Unilateral D)
A	atleaf	92	39.87	8.22	0.054	0.7061
B	atleaf	25	45.56	9.25	0.974	0.7701
C	atleaf	43	59.01	5.55	0.954	0.0894

Nota: N = número de muestras; D.E. = desviación estándar; D, W = valor del estadístico

En la **Tabla 2** se muestran las pruebas de normalidad para los datos tomados, a través del equipo atLeaf CHL-PLUS, dentro de las cuales se consideró un nivel de significancia del 0.05. Para la parcela **A** se consideró un total de 92 datos con una media de 39.87 y un valor p de 0.7061, mientras que para la parcela **B** se tomaron en cuenta 25 datos con una media de 45.56 y un valor p de 0.7701, por otro lado, para la parcela **C** se consideraron 43 datos con una media de 59.01 y un valor p de 0.0894, lo cual sugiere que estas parcelas siguen una distribución normal en cuanto a esta variable.

**Tabla 3.** Pruebas de normalidad, para los datos obtenidos a través del índice NDRE, en el cultivo de maíz (*Zea mays*).  $p > 0.05$

Parcela	variable	N	media	D.E.	D, W*	p (Unilateral D)
A	Índice	92	0.12	0.016	0.068	0.3551
B	Índice	25	0.51	0.017	0.971	0.6848
C	Índice	43	0.20	0.038	0.901	0.0014

Nota: N = número de muestras; D.E. = desviación estándar; D, W = valor del estadístico

En la **Tabla 3** se muestran las pruebas de normalidad para la variable concentración de clorofila a través del índice NDRE. Se consideró un nivel de significancia del 0.05 y se consideró para la parcela **A** 92 datos con una media de 0.12 y un p valor de 0.3551 cumpliendo así con una distribución normal. Para la parcela **B** se contó con 25 datos con una media de 0.51 y un p valor de 0.6848, lo cual indica que los datos son normales, mientras que para la parcela **C** se consideraron 43 datos con una media de 0.20 y un p valor de 0.0014

concluyendo que dentro de esta parcela no se cumple con la normalidad respecto a la variable índice NDRE.

#### Pruebas de homocedasticidad de los datos

**Tabla 4.** Pruebas de homocedasticidad, para los datos obtenidos en campo en el cultivo de maíz (*Zea Mays*) mediante el equipo atleaf – CHL-PLUS.

Parcela	variable	N	K,F	p - Valor
A	atLeaf	92	4.40	0.493
B	atLeaf	25	1.31	0.517
C	atLeaf	43	1.43	0.486

Nota: N = número de muestras; K, F = valor del estadístico

En la **Tabla 4** se muestran las pruebas de homocedasticidad para la variable atLeaf a través el equipo atLeaf CHL-PLUS. Se consideró un nivel de significancia de 0.05 y se tomaron en cuenta 92, 25 y 43 datos para las parcelas A, B y C, respectivamente. Los resultados obtenidos sugieren que no existe variabilidad en los diferentes niveles del parámetro evaluado, siendo el p valor de 0.493 para la parcela **A**, 0.517 para la parcela **B**, y finalmente 0.486 para la parcela **C**.

**Tabla 5.** Pruebas de homocedasticidad, para los datos obtenidos a través del índice NDRE, en el cultivo de maíz (*Zea mays*).  $p > 0.05$

Parcela	Variable	N	K,F	p - Valor
A	NDRE	92	7.42	0.191
B	NDRE	25	11.12	0.003
C	NDRE	43	0.63	0.537

Nota: N = número de muestras; K, F = valor del estadístico

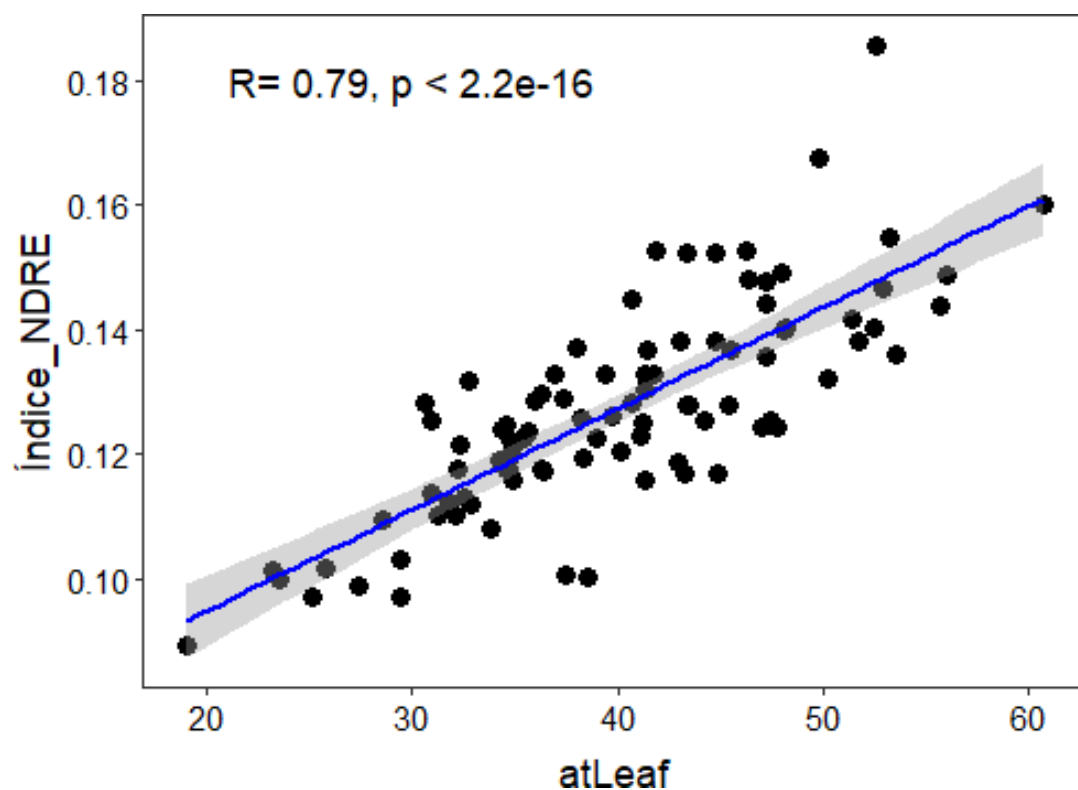
En la **Tabla 5** se indican los resultados obtenidos de la prueba de homocedasticidad en la variable concentración de clorofila a partir del índice NDRE con un nivel de significancia de 0.05 y un total de 92, 25 y 43 datos para las parcelas A, B y C respectivamente, siendo los resultados favorables para la parcela **A** con un p valor de 0.191 y para la parcela **C** con un p

valor de 0.537 demostrando así que no existe variabilidad dentro de estos datos, sin embargo, para la parcela **B** se obtuvo un p valor de 0.003 indicando que dentro de esta parcela si existió variabilidad.

#### Correlaciones entre Índice NDRE y atLeaf CHL-PLUS

Una vez interpretada la normalidad y homocedasticidad de los datos se realizaron las correlaciones respectivas para cada parcela entre los datos del Índice NDRE y el equipo atLeaf CHL-PLUS.

##### **Parcela A**

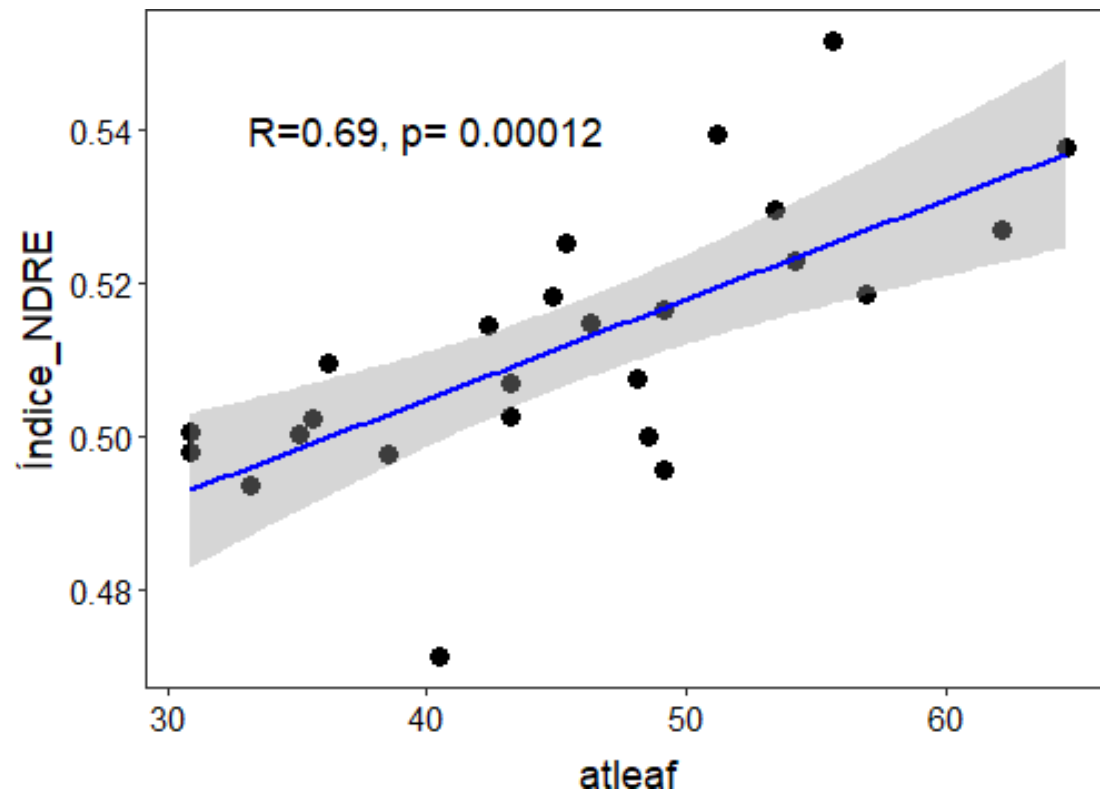


**Figura. - 14** Correlación entre el Índice NDRE y el equipo atLeaf CHL-PLUS de la parcela A

La **Figura 14** muestra la correlación existente entre los datos obtenidos del índice NDRE y del equipo atLeaf CHL-PLUS en la parcela **A**. El coeficiente de correlación de Pearson fue de 0.79 indicando una correlación positiva con un nivel de relación o significancia alta. En base a esto se puede decir que existe una relación significativa entre estas dos técnicas que permiten validar la técnica de teledetección utilizando del índice NDRE para la estimación del contenido de clorofila en el cultivo de maíz.



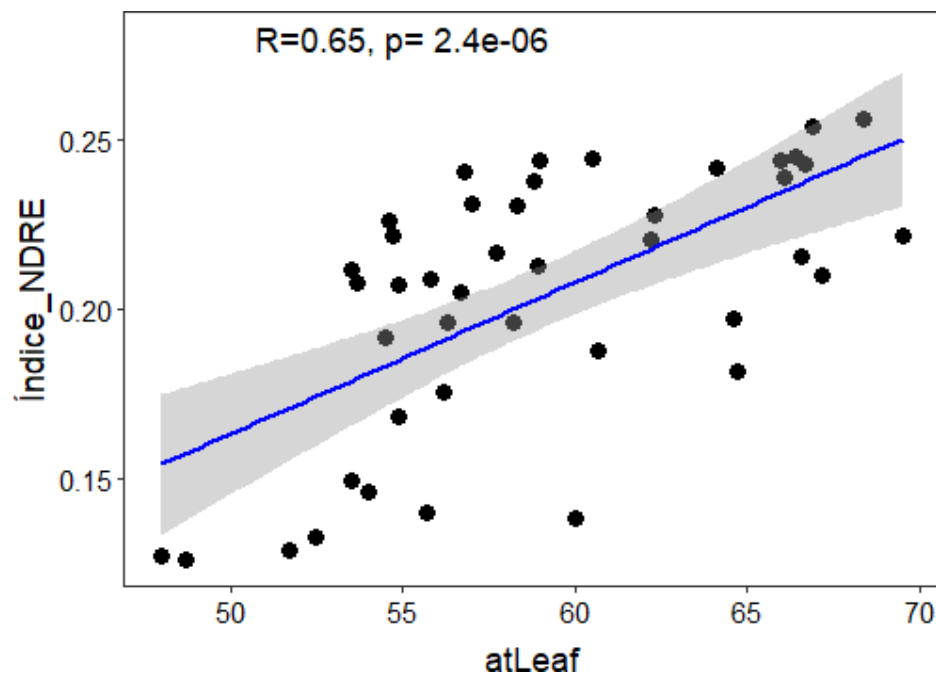
## Parcela B



**Figura. - 15** Correlación entre el Índice NDRE y el equipo atLeaf CHL-PLUS de la parcela B

La **Figura 15** muestra la correlación existente entre los datos obtenidos del índice NDRE y del equipo atLeaf CHL-PLUS en la parcela **B**. El coeficiente de correlación de Pearson fue de 0.69 indicando una correlación positiva con un nivel de relación moderada, por lo que se puede inferir que, si bien existe una relación entre estas dos técnicas, la relación no es tan significativa por lo que dependiendo las condiciones del cultivo y la disponibilidad de recursos podría o no usarse para la estimación del contenido de clorofila en el cultivo de maíz.

## Parcela C



**Figura. - 16** Correlación entre el Índice NDRE y el equipo atLeaf CHL-PLUS de la parcela C

En la **Figura 16** se muestra la correlación existente entre los datos obtenidos del índice NDRE y del equipo atLeaf CHL-PLUS en la parcela **C**. El coeficiente de correlación de Spearman fue de 0.65 indicando una correlación positiva con un nivel de relación moderada, por lo que se puede concluir que existe una relación no tan significativa entre estas dos técnicas por lo que se debería tener en cuenta las condiciones del cultivo y la disponibilidad de recursos al momento de decidir si se podría o no usar esta técnica para la estimación del contenido de clorofila en el cultivo de maíz.

#### 4.3 Efecto del contenido de clorofila sobre el rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays*). Objetivo 3

En cuanto a la relación que existe entre la estimación de clorofila mediante el índice NDRE y el rendimiento del cultivo de maíz, se tomó en cuenta el rendimiento expresado en peso total de granos por planta y los datos del índice NDRE únicamente en la parcela A debido a que esta parcela la mejor correlación con los datos del equipo atLeaf.

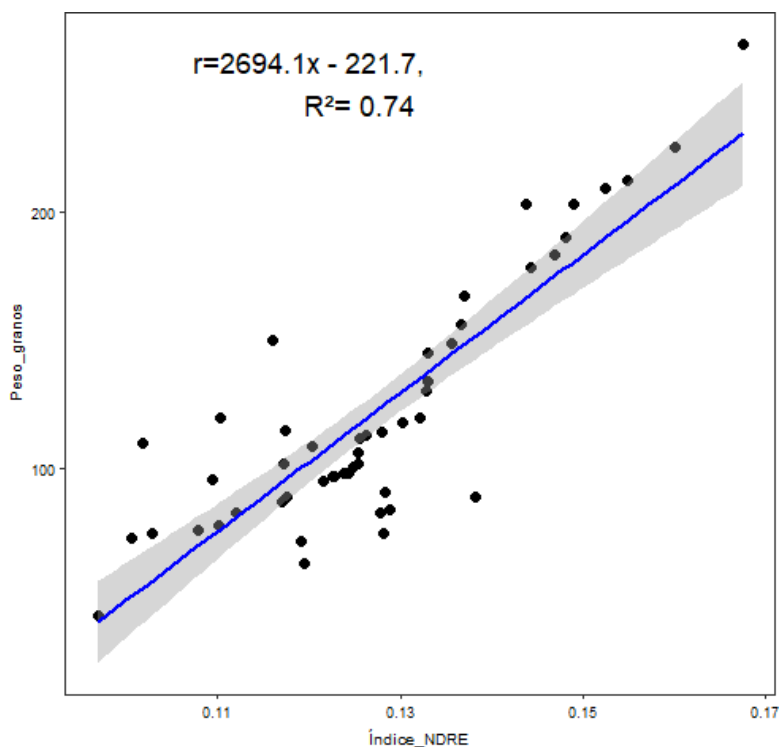
**Tabla 6.** Prueba de normalidad y homocedasticidad para la variable peso de los granos en el cultivo de maíz (*Zea mays*).  $p > 0.05$

Prueba	N	W,K	p - Valor
Normalidad	50	0.899	0.00046
Homocedasticidad	50	29.835	3.321e-07

Nota: N = número de muestras; W, K = valor del estadístico

En la **Tabla 6** se muestran las pruebas de normalidad y homocedasticidad para la variable peso de los granos para la parcela **A**, dentro de las cuales se consideró un nivel de significancia del 0.05 y un total de 50, obteniendo un p valor de 0.00046 para la prueba de normalidad de Shapiro Wilk, lo cual sugiere que no siguen una distribución normal en cuanto a esta variable, y un p valor de 3.321e-07 para la prueba de homocedasticidad, lo cual indica alta variabilidad en las medias de esta variable. Por consiguiente, se procedió a determinar el coeficiente de Spearman para pruebas no paramétricas:

#### Correlación y coeficiente de Spearman



**Figura. - 17** Correlación entre el peso de los granos y el Índice NDRE de la parcela A

La **Figura 17** muestra la correlación existente entre los datos obtenidos para rendimiento expresado en peso de granos por planta y el índice NDRE en la parcela **A**. El coeficiente de correlación de Spearman fue de 0.74 indicando una correlación positiva con un nivel de relación o significancia aceptable, por lo que se puede inferir que a mayor valor del índice mayor valor de rendimiento se obtendrá. En base a esto se puede concluir que las estimaciones del contenido de clorofila permiten estimar también el rendimiento de la planta y a su vez predecir el comportamiento productivo de un cultivo.

## 5. Discusión

En base a los resultados obtenidos en el presente estudio se pudo observar que el índice NDRE presenta valores que indican sensibilidad, en los niveles de vigor del cultivo, que a su vez se traducen en estimaciones de la concentración de clorofila. La peculiaridad del índice NDRE que lo hace ser una buena opción para la estimación de clorofila es el hecho de que se trabaja con la región del espectro conocida como borde-rojo (680nm - 740nm), esto es corroborado por un estudio en el que se estudió la reflectancia de la hoja de la planta en la región del borde rojo, en el mismo se definió un parámetro ( $\lambda_{re}$ ) como la longitud de onda de máxima pendiente y se encontró que depende de la concentración de clorofila ( $p < 0.001$ ) con efectos adicionales de especie, etapa de desarrollo, capas de hojas y contenido de agua de las hojas, es por ello que los autores concluyen que las mediciones del borde rojo serán valiosas para evaluar el estado de la clorofila vegetativa y el índice de área foliar independientemente de las variaciones de la cobertura del suelo, y son particularmente adecuadas para la detección temprana del estrés (Taylor et al., 2007)

Por otro lado, se pudo demostrar la eficiencia del índice NDRE, para la estimación del contenido de clorofila en el cultivo de maíz (*Zea mays*) ya que las correlaciones entre índice NDRE y los valores medidos por el equipo atLeaf CHL-PLUS estuvieron dentro del rango de significancia de moderada a alta, los resultados fueron categorizados en base a la escala de rangos propuesta por Pearson, siendo estos para la unidad de estudio **(A)**  $R^2 = 0.79$  Alto – perfecto, mientras que para las unidades de estudio **(B y C)**  $R^2 = 0.69$ ,  $R^2 = 0.65$  de carácter moderado. Esta eficiencia coincide con lo afirmado por Revelo et al. (2020) en su estudio denominado análisis de los índices de vegetación NDVI, GNDVI y NDRE para la caracterización del cultivo de café (*Coffea arabica*), dentro del cual los resultados mostraron valores prometedores en la implementación del índice NDRE ( $p = 0.91$  y  $R^2 = 0.83$ ) y GNDVI, además, se observó que, de acuerdo con los valores del coeficiente de variación y el análisis posterior de los histogramas, el índice NDRE presentó una mayor sensibilidad ante la variación de vigor vegetal, lo que sugeriría un mayor potencial a la hora de caracterizar el estado de desarrollo del cultivo de café, frente a los otros índices estudiados.

Conociendo la relación que existe entre el contenido de clorofila y el nitrógeno foliar se puede llegar a inferir que el índice NDRE es una buena opción al momento de estimar cualquiera de estas variables tal como lo indica un estudio realizado por Rivera et al. (2019), en donde se evaluaron diferentes índices de vegetación entre ellos el índice NDRE en relación con la estimación de nitrógeno foliar en el cultivo de triticale (x. *Triticosecale wittmack*), los resultados obtenidos demostraron que el índice NDRE fue uno de los que presentaron un coeficiente de correlación más alto con un  $R^2$  de 0.80 por lo que se confirma la eficiencia de este índice en actividades relacionadas al contenido de clorofila.

En maíz la eficiencia del índice NDRE y su relación con el contenido de clorofila fue superior para las parcelas A ( $R^2 = 0.79$ ) y B ( $R^2 = 0.69$ ), esto podría ser explicado por diversos aspectos, siendo uno de ellos el porcentaje de cobertura del área foliar ya que dentro de estas dos parcelas se pudo observar mayor variabilidad de la cobertura de la copa con respecto a la parcela C. Por lo que podríamos considerar una relación entre el contenido de clorofila medido a través del índice NDRE y el índice de área foliar del cultivo tal como lo explica un estudio desarrollado por Simic et al. (2018) quienes estudiaron la importancia del índice de área foliar en el mapeo del contenido de clorofila del maíz bajo diferentes tratamientos agrícolas utilizando imágenes UAV, en este estudio se encontró una correlación moderada ( $R^2 = 0.620$ ) entre el índice NDRE y el índice de área foliar (LAI) y conociendo esta relación los autores desarrollaron un algoritmo predictivo para la recuperación del contenido de clorofila del dosel incorporando el LAI como un parámetro de entrada en dicho algoritmo obteniendo un coeficiente de determinación de  $R^2 = 0.774$  para el modelo empírico, indicando de esta forma que LAI mejoró considerablemente la recuperación del contenido de clorofila usando UAV para campos agrícolas donde la variabilidad de la cobertura de la copa era alta. Otro factor que posiblemente influyó en las correlaciones moderadas de las parcelas B y C fue la concentración de N disponible en el suelo, ya que como lo indican las encuestas realizadas a los productores en el manejo del cultivo la parcela B y C abonan sus cultivos únicamente en la etapa de siembra y con un solo abono orgánico, mientras que para la parcela A cuenta con una fertilización tanto orgánica (abono de cuy) como química (10-30-10) permitiéndole al cultivo contar con mayor disponibilidad de N en el suelo, esto coincide con lo que indica un estudio que pretendía evaluar la sensibilidad de medidores de clorofila para el diagnóstico de deficiencias de nitrógeno en maíz en agricultura de producción, en donde uno de sus resultados sostiene que bajo condiciones de deficiencia de N en la planta los clorofilómetros tienden a ser muy sensibles por lo que se pueden producir alteraciones en las lecturas SPAD (Zhang et al., 2008), de manera similar Sharma et al. (2012) sostienen que las razones del déficit de nitrógeno en la planta pueden provenir de deficiencia de este nutriente en el suelo, o por factores en el suelo que no permiten a la planta adquirir el elemento.

Las fases fenológicas del maíz son un factor importante al momento de estimar clorofila, durante este estudio se obtuvieron fechas tentativas de siembra, siendo la parcela A sembrada durante el mes de octubre y las parcelas B y C en el mes de noviembre. Considerando que para la toma de datos se estimó la etapa R3 y deduciendo que las parcelas B y C no se encontraban aun en esta etapa esto podría justificar la correlación alta en la parcela A en contraste con las otras parcelas, tal como lo indica Argenta et al. (2004) en su estudio denominado Contenido relativo de clorofila foliar como parámetro indicador para predecir la fertilización nitrogenada en maíz, en el cual indican que el valor SPAD se ve influenciado por el estado fenológico del cultivo, observándose que la variación en las primeras etapas del desarrollo es alta (entre V3 y V7) con un promedio 0.48 unidades día<sup>-1</sup>. Desde V8 hasta V11 los valores SPAD varían entre 0.18 - 0.19 unidades día<sup>-1</sup> y en las etapas reproductivas (R1 y R6) los valores varían en 0.1 unidades día<sup>-1</sup>, en promedio.

Los resultados obtenidos en la relación existente entre el rendimiento productivo del cultivo y el contenido de clorofila, tuvo un  $R^2 = 0.74$ , lo cual indica que es una correlación moderada, lo cual sugiere, que mientras más alto sea el contenido de clorofila, mayor será la productividad del cultivo este resultado, puede ser corroborado por los resultados obtenidos por Adekayode y Olojugba (2009). En el estudio "La utilización de cenizas de madera como abono para reducir el uso de fertilizantes minerales para mejorar el rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) medido en clorofila contenido y rendimiento de grano". Donde indican que el área foliar total, índice de área foliar y contenido de clorofila tuvo una correlación positiva con el rendimiento de grano de maíz ( $r = 0.96, 0.97$  y  $0.95$  respectivamente). Esos resultados corroboraron la afirmación de Mohamed et al. (2008) que el contenido de clorofila y la fotosíntesis fueron procesos bioquímicos que aumentaron el rendimiento de grano de maíz. Durante el estudio se dio a conocer que el tratamiento combinado de (MN+OM+SI). Presento un efecto beneficioso, que se atribuye a enriquecer en sustancias minerales y orgánicas, que son esenciales para el crecimiento de las plantas, estimulando y activando los procesos bioquímicos en las plantas (es decir, respiración, fotosíntesis y contenido de clorofila).

## Conclusiones

A través de esta investigación se pudo evaluar el contenido de clorofila en la etapa reproductiva (R3) del cultivo de maíz (*Zea mays*), para estimar su rendimiento utilizando técnicas de teledetección. Al realizar un vuelo fotogramétrico se obtuvieron imágenes multiespectrales que nos permitieron calcular el índice de diferencia normalizada de borde rojo (NDRE) el cual significativamente en la identificación del estado de vigor del cultivo y a su vez en la estimación de la concentración de clorofila, sin embargo, se debe tener en cuenta diferentes factores externos, como por ejemplo el clima, el riego, las heladas, etc. que pueden llegar a intervenir con esta técnica o que representan cambios en el vigor de las plantas.

Por otro lado, comparando la funcionalidad de esta técnica con el medidor atLeaf CHL-PLUS se comprobó que existe correlación entre estas dos técnicas por lo que concluimos que NDRE puede llegar a ser utilizado como una alternativa no invasiva para la determinación del estado de salud del cultivo de maíz de altura. Además de ser una técnica con la que se puede llegar a optimizar tiempo y que nos permite obtener información de todo el cultivo, que en grandes extensiones de terreno podría ser una alternativa más conveniente.

En cuanto a rendimiento del cultivo se observó en una de las parcelas que existe una correlación aceptable entre el índice NDRE y el rendimiento del cultivo por lo que concluimos que la estimación del contenido de clorofila aporta significativamente a la estimación del rendimiento, además de que el contenido de clorofila resulta ser una variable de gran importancia en la salud de la planta, siendo NDRE una técnica útil a la hora de realizar aportaciones de nitrógeno o de mejorar actividades de manejo del cultivo.

### Recomendaciones

En base a nuestros hallazgos, se recomienda para futuras investigaciones relacionadas a este tema, trabajar en cultivos con los cuales se pueda tener mejor control del manejo, ya que esto permitirá desestimar factores externos que puedan llegar a afectar los resultados. Si bien la utilización del índice NDRE resultó una gran opción para esta investigación se recomienda implementar diferentes índices de vegetación en diferentes etapas fenológicas del cultivo para evaluar su comportamiento.

Además, se recomienda llevar un registro preciso en cuanto a las etapas fenológicas del cultivo ya que de esto dependerá una mayor precisión en la estimación de los niveles de clorofila. Finalmente se recomienda expandir esta investigación a diferentes cultivos de importancia, de forma que se pueda tener una mejor caracterización sobre el funcionamiento fisiológico de los mismos.



## Referencias

- Adekayode, F. O., & Olojugba, M. R. (2009). La utilización de cenizas de madera como abono para reducir el uso de fertilizantes minerales para mejorar el rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) medido el contenido de clorofila y rendimiento de grano. *Journal of Soil Science and Environmental Management*, 6.
- Ali, M. A., Ibrahim, S., & Bijay-Singh. (2020). Wheat grain yield and nitrogen uptake prediction using atLeaf and GreenSeeker portable optical sensors at jointing growth stage. *Information Processing in Agriculture*, 7(3), 375-383.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.inpa.2019.09.008>
- Alvaro, G. J. (2019). *Festibox*. Obtenido de Fertibox: <https://www.fertibox.net/single-post/clorofila>
- Argenta, G., Ferreira da Silva, P. R., & Sangoi, L. (2004). Leaf relative chlorophyll content as an indicator parameter to predict nitrogen fertilization in maize. *Crop Production • Cienc. Rural*, 34(5), 1379-1387. doi:<https://doi.org/10.1590/S0103-84782004000500009>
- Bellacomo, C., Orden, L., Pezzola, A., Winschel, C., & Casella, A. (2020). Análisis de variables biofísicas en cultivo de cebolla (*Allium cepa*) con fertilización nitrogenada mediante teledetección. *Horticultura Argentina*, 39(100), 1851-9342.
- Blackburn, G. (2006). Hyperspectral remote sensing of plant pigments. *Journal of Experimental Botany*, 58(4), 855-867.
- Boiarskii, B., & Hasegawa, H. (2019). Comparison of NDVI and NDRE Indices to Detect Differences in Vegetation and Chlorophyll Content. *J. Mech. Cont. & Math* (4), 20-29.  
doi:<https://doi.org/10.26782/jmcms.spl.4/2019.11.00003>
- Castañeda, C., Almanza, P., Pinzón, E., Cely, G., & Serrano, P. (2018). Estimación de la concentración de clorofila mediante métodos no destructivos en vid (*Vitis vinifera* L.) cv. Riesling Becker. *rev.colomb.cienc.hortic*, 12(2), 2011-2173.  
doi:<https://doi.org/10.17584/rcch.2018v12i2.7566>
- Castellanos, M., Valdés, R., López, A., & Guridi, F. (2017). Mediciones de índices de verdor relacionadas con área foliar y productividad de híbrido de maíz. *cultrop*, 38(3), 1819-4087. Obtenido de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0258-59362017000300016](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362017000300016)

- Cevallos, C. (2018). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del Azuay actualizado*. Gobierno provincial del Azuay. Obtenido de <https://odsterritorioecuador.ec/wp-content/uploads/2019/04/PDOT-PROVINCIA-AZUAY-2015-2030.pdf>
- Colomina, I., & Molina, P. (2014). *Sistemas aéreos no tripulados para fotogrametría y teledetección: una revisión*. Catalunya: ISPRS de fotogrametría y teledetección.
- Coral, J. V., Andrade, H. J., Pumisacho, M. M., Caicedo, J. D., & Salazar, D. R. (2019). Caracterización morfológica y agronómica de dos genotipos de maíz (*Zea mays* L.) en la zona media de la parroquia Malchinguí. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 11(1), 40-49. doi:<https://doi.org/10.18272/aci.v11i1.1091>
- Croft, H., Chen, J., & Zhang, Y. (2013). La aplicabilidad de los índices empíricos de vegetación para determinar el contenido de clorofila de las hojas en diferentes estructuras de hojas y dosel. *Ecological Complexity*, 17, 119-130. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2013.11.005>
- Deras, H. (2012). *Guía técnica El cultivo de maíz*. El Salvador: CENTA. Obtenido de <http://repiica.iica.int/docs/b3469e/b3469e.pdf>
- EOS. (s.f.). *Diferencia Normalizada De Borde Rojo*. Obtenido de Diferencia Normalizada De Borde Rojo: <https://eos.com/es/industries/agriculture/ndre/>
- ESPAC. (2022). *Boletín Técnico Encuesta de superficie producción agropecuaria continua, 2021*. ESPAC. Obtenido de [https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas\\_agropecuarias/espac/espac-2021/Bolet%C3%ADn%20t%C3%A9cnico.pdf](https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac-2021/Bolet%C3%ADn%20t%C3%A9cnico.pdf)
- Figueroa, V. (2013). *Evaluación del índice de suficiencia de nitrógeno como mejorador de la capacidad predictiva de las lecturas SPAD en híbridos de maíz*. Santiago: Universidad de Chile. Obtenido de: <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/151705/Evaluacion-del-indice-de-suficiencia-de-nitrogeno-como-mejorador-de-la-capacidad-predictiva-de-las-lecturas-SPAD-en-hi%C3%81bridos-de-maiz.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- FIRA. (2016). *Panorama Agroalimentario. Maíz 2016*. FIRA. Obtenido de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/200637/Panorama\\_Agroalimentario\\_Ma\\_z\\_2016.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/200637/Panorama_Agroalimentario_Ma_z_2016.pdf)

- Fuentes, T., Parrales, A. D., Morán, J., García, J., & Gabriel, J. (2022). Caracterización morfológica y etnobotánica del maíz criollo (*Zea mays* L.) en la comuna Sancán, Ecuador. *Revista Científica Multidisciplinaria*, 6(2), (Especial Agropecuaria), 101-116.
- Gomez, S. (2015). "Actualización del plan de desarrollo y ordenamiento territorial de la parroquia Nulti". Cuenca: Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial de Nulti. Obtenido de [https://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL\\_SNI/data\\_sigad\\_plus/sigadplusdocumentofinal/0160026740001\\_Documento%20final%20aprobado\\_30-10-2015\\_14-30-37.pdf](https://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdocumentofinal/0160026740001_Documento%20final%20aprobado_30-10-2015_14-30-37.pdf)
- González, N., Silos, H., Estrada, J. C., Chávez, J. A., & Tejero, L. (2016). Características y propiedades del maíz (*Zea mays* L.) criollo cultivado en Aguascalientes, México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc*, 7(3), 669-680.
- Hebbar, K.B., Subramanian, P., Sheena, T.L., Shwetha, K., Sugatha, P., Arivalagan, M., Varaprasad, P.V. (2016). Chlorophyll and nitrogen determination in coconut using a non-destructive method. *Journal of Plant Nutrition*, 39(11):1610-1619.
- INEC. (2022). *Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua 2021*. INEC. Obtenido de [https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas\\_agropecuarias/espac/espac-2021/Principales%20resultados-ESPAC\\_2021.pdf](https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac-2021/Principales%20resultados-ESPAC_2021.pdf)
- Kappes, C., Arf, O., & Andrade, J. (2013). Produtividade do milho em condições de diferentes manejos do solo e de doses de nitrogênio. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 1310-1321. doi:10.1590/S0100-06832013000500020
- Konica Minolta. (2009). *SPAD-502Plus*. Obtenido de <https://www.konicaminolta.eu/eu-en/hardware/measuring-instruments/colour-measurement/chlorophyll-meter/spad-502plus>
- Mathews, C., Van Holde, K., & Dean, R. A. (2013). *Bioquímica (4a. ed.)*. Madrid: Pearson Educación. Recuperado el 22 de diciembre de 2022.
- Mohamed SA, Ewees SA, Sawsan A, Seaf EY, Dalia MS (2008). Improving maize grain yield and its quality grown on a newly reclaimed sandy soil by applying micronutrients, organic manure and biological inoculation. *Res. J. Agric. Biol. Sci.* 4. 537 - 544.
- Muñoz, P. (2013). *Apuntes de teledetección: Índices de vegetación*. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). Chile. Obtenido de

[https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/20.500.13082/26389/Tema%20Indic es%20de%20vegetaci%C3%B3n%20Pedro%20Mu%C3%B1oz%20A.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Un%20%C3%8Dndice%20de%20Vegetaci%C3%B3n%20puede,Gilabert%20et%20al%20%201997\).](https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/20.500.13082/26389/Tema%20Indic es%20de%20vegetaci%C3%B3n%20Pedro%20Mu%C3%B1oz%20A.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Un%20%C3%8Dndice%20de%20Vegetaci%C3%B3n%20puede,Gilabert%20et%20al%20%201997).)

Novichonok, E., Novichonok, A., Kurbatova, J., & Markovskaya, E. (2016). Use of the atLEAF+ chlorophyll meter for a nondestructive estimate of chlorophyll content. *Photosynthetica*, 54(1), 130-137. doi:DOI: 10.1007/s11099-015-0172-8

Orbe, D., & Cuichán, M. (2022). *Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC). Boletín técnico*. Ecuador: INEC. Obtenido de [https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas\\_agropecuarias/espac/espac-2021/Bolet%C3%ADn%20t%C3%A9cnico.pdf](https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac-2021/Bolet%C3%ADn%20t%C3%A9cnico.pdf)

Pagani, A., H. Echeverría, F. Andrade and H. Sainz. (2009). Characterization of Corn Nitrogen Status with a Greenness Index under Different Availability of Sulfur. *Agronomy Journal*, 101, 315- 322.

Peñaherrera, D. (2011). *Manejo integrado del cultivo de maíz de altura. Módulos de Capacitación para Capacitadores. Módulo 4*. Quito-Ecuador: Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias INIAP. Obtenido de <https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/3302/1/iniapscpm190.pdf>

Revelo, D., Mejia, J., Montoya, B., & Hoyos, J. (2020). Análisis de los índices de vegetación NDVI, GNDVI y NDRE para la caracterización del cultivo de café (*Coffea arabica*). *Ingeniería y Desarrollo*, 38(2), 2145-9371.

Rincón, Á., & Ligarreto, G. (2010). Relación entre nitrógeno foliar y el contenido de clorofila, en maíz asociado con pastos en el Piedemonte Llanero colombiano. *Revista Corpoica - Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 11(2), 122-128. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/4499/449945029003.pdf>

Ritchie, S., & Hanway, J. (1982). *How a Corn Plant Develops* (Special Report No. 48 ed.). Iowa State University of Science and Technology, Cooperative Extension Service.

Rivera, M., Nava, E., Martínez, A., & Cerano, J. (2019). Evaluacion de indices de vegetacion para estimar nitrogeno foliar en el cultivo de triticali (x. Triticosecale wittmack) mediante teledeteccion. *Agrofaz*, 1(1) (Nº Especial), 126-133.

- Rosegrant, M.W., Msangi, S., Ringler, C., Sulser, T.B., Zhu, T. & Cline, S.A. (2008). *International model for policy analysis of agricultural commodities and trade (IMPACT): Model Description*. Washington D.C: International Food Policy Research Institute. Recuperado de <http://bit.ly/2rDE9EF>
- Sanchez, I. (2014). Maíz I (*Zea mays*). *reduca (Biología)*, 151-171.
- Sharma, P., Shukla, M., Sammis, T., Steiner, R., & Mexal, J. (2012). Nitrate-nitrogen leaching from three specialty crops of New Mexico under furrow irrigation system. *Agricultural Water Management*, 109, 71- 80. doi:10.1016/j.agwat.2012.02.008
- Simic, M. A., Reil, P., Abeysinghe, T., Marambe, A., & Romanko, M. (2018). La importancia del índice de área foliar en el mapeo del contenido de clorofila del maíz bajo diferentes tratamientos agrícolas utilizando imágenes UAV. *International Journal of Remote Sensing*, 39(15), 5415-5431. doi:<https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1455244>
- Sitjar, J. (2014). *Principios básicos de teledetección*. Servicio de SIG y Teledetección (SIGTE) de la Universitat de Girona.
- Solis, A., Revelo, D., Campo, D., & Gaviria, C. (2021). Correlación del contenido de clorofila foliar de la especie *Coffea arabica* con índices espectrales en imágenes. *Rev.Bio.Agro*, 19(2), 57-68. doi:<https://doi.org/10.18684/bsaa.v19.n2.2021.1536>.
- Stehr, N. J. (2015). *Drones: la última tecnología para la agricultura de precisión*. Natural Sciences Education.
- Streit, N., Ramirez, L., Queiroz, L., Jacob, E., & Queiroz, M. (2015). Producción de pigmentos naturales (clorofila-a) en biorrefinerías agroindustriales. *Ciencia y tecnología*, 27-34.
- Sylvain, J., Maupas, F., Bendoula, R., & Gorretta, N. (2017). Retrieving LAI, chlorophyll and nitrogen contents in sugar beet crops from multi-angular optical remote sensing: Comparison of vegetation indices and PROSAIL inversion for field phenotyping. *Field Crops Research*, 33-46.
- Taylor, P., Horler, D. N., Dockray, M., & Barber, J. (2007). The red edge of plant leaf reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 4(2), 273-288. doi:<https://doi.org/10.1080/01431168308948546>

Tecnoindustry. (2020). *Medidores de Clorofila atLeaf*. Tecnoindustry. Quito-Ecuador.

Obtenido de: <https://tecnoindustry.com/wp-content/uploads/2013/08/Medidor-de-Clorofila-Brochure.pdf>

Trimble. (2022). *Sensor de cultivos GreenSeeker*. Obtenido de

<https://agriculture.trimble.ar/product/sensor-de-cultivos-greenseeker/>

Toledo, J. P. (2015). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de la parroquia El Valle*.

Cuenca: GAD de la parroquia El Valle. Obtenido de [https://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL\\_SNI/data\\_sigad\\_plus/sigadplusdiagnostico/0160026660001\\_PDOT\\_%20EL%20VALLE%202015\\_Diagn%C3%B3stico\\_reducido\\_30-10-2015\\_22-29-44.pdf](https://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdiagnostico/0160026660001_PDOT_%20EL%20VALLE%202015_Diagn%C3%B3stico_reducido_30-10-2015_22-29-44.pdf)

TYCGIS. (2017). *Parrot Sequoia +*. Obtenido de [https://tycgis.com/parrot-sequoia\\_plus/](https://tycgis.com/parrot-sequoia_plus/)

Umazi, A., S. Alyegba & K. Sunday. 2016. An assessment of leaf chlorophyll concentration of afforestation tree species in South-Eastern, Nigeria. *Journal of Forest and Environmental Science* 32(2): 205-211

Wei, G., S. Shalei, Z. Bo, S. Shuo, L. Faqua and C. Xuewu. (2012). Multi-wavelength canopy LiDAR for remote sensing of vegetation: Design and system performance. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 69, 1-9. doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.02.001>

Yanez, C., Velasquez, J., Peñaherrera, D., Zambrano, L., Caicedo, M., Jorge, H., . . . Quimbita, A. (2010). *Guía de Producción de Altura*. INIAP.

Yáñez, C., Zambrano, J., & Caicedo, M. (2013). *Guía de Producción de maíz para pequeños agricultores y agricultoras*. Quito, Ecuador: INIAP, Programa de Maíz, 28p, (Guía No 96).

Zambrano, J., Velásquez, J., Peñaherrera, D., Sangoquiza, C., Cartagena, Y., Villacrés, E., Racines, M. (2021). *Guía para la producción sustentable de maíz en la Sierra ecuatoriana*. Quito, Ecuador: INIAP.

Zhang, J., Blackmer, A., Ellsworth, J., & Koehler, K. (2008). Sensitivity of chlorophyll meters for diagnosing nitrogen deficiencies of corn in production agriculture. *Agronomy Journal*, 100(3), 543-550. doi:10.2134/agronj2006.0153

Zhu J, Tremblay N, Liang Y (2012). Comparing SPAD and atLEAF values for chlorophyll assessment in crop species. *Canadian Journal of Soil Science* 92(4), 645-648.



## Anexos

## Anexo. - 1. Encuesta de manejo agronómico de las parcelas de estudio



Universidad de Cuenca  
Facultad de Ciencias Agropecuarias  
Ingeniería Agronómica

Tesis: Análisis del contenido de clorofila y rendimiento en cultivo de maíz (*Zea mays*) mediante técnicas de teledetección

## Ficha de caracterización de las parcelas

## Información del lugar

Fecha	
Código de la parcela	
Propietario	
Coordenadas	
Altura	
Pendiente	

## Actividades de manejo del cultivo

1. ¿Realiza usted una preparación del suelo antes de la siembra?

SI \_\_\_\_

NO \_\_\_\_

2. ¿Qué labores previas a la siembra realiza usted dentro de su lote?

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

3. ¿De dónde obtiene usted la semilla para su lote?

Propia \_\_\_\_

Compra \_\_\_\_

Si su respuesta es compra donde: \_\_\_\_\_

4. Distancia de siembra

\_\_\_\_\_

5. Método de siembra

\_\_\_\_\_

6. De la siguiente lista de prácticas culturales, ¿cuáles se realizan dentro de su lote?

Raleo \_\_\_\_

Deshierbe \_\_\_\_

Aporque \_\_\_\_

Riego \_\_\_\_



Defoliación o despunte \_\_\_\_\_

7. ¿Cuenta con sistema de riego?

Sí \_\_\_\_\_

No \_\_\_\_\_

Si su respuesta es sí cual: \_\_\_\_\_

8. ¿Utiliza algún tipo de fertilizante?

Sí \_\_\_\_\_

No \_\_\_\_\_

Si su respuesta es sí cuales:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

9. ¿Cada que tiempo realiza la fertilización del lote?

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

10. ¿Ha detectado la infestación de alguna plaga o enfermedad?

Sí \_\_\_\_\_

No \_\_\_\_\_

Si su respuesta es sí cuales:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

11. ¿Qué productos utiliza para controlar plagas y enfermedades?

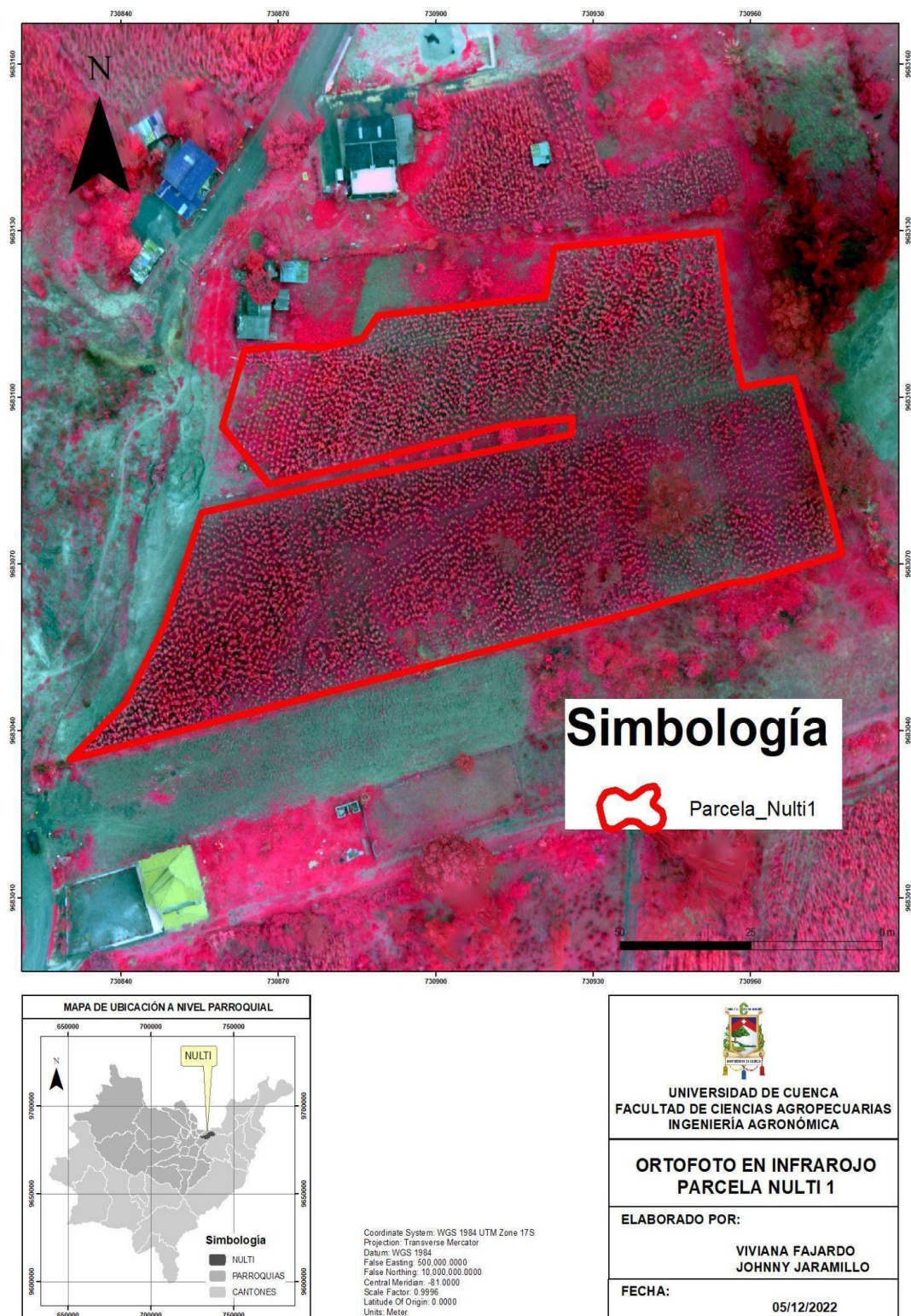
\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## Anexo. - 2. Análisis de suelo de las parcelas de estudio

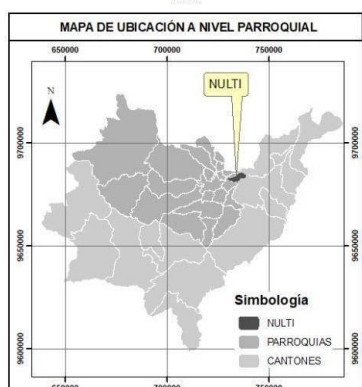
Análisis del contenido de clorofila y rendimiento en cultivo de maíz ( <i>Zea mays</i> ) mediante técnicas de teledetección			
Caracterización de Parcelas			
Información	Nulti A	Nulti B	Valle
Propietario	Maria Dolores Aguavilla	Rosa Teneacaca	Jorge Beltran
Coordenadas	730875,6-9683088,8	730937-9682904,4	726533,4 - 9673480,3
Tipo de suelo	Arcillo - Arenoso	Arcillo - Arenoso	Franco arcilloso
Ph	7.8	7.9	6.6
CE	0,1256 mS/cm <sup>2</sup>	0,146 mS/cm <sup>2</sup>	0,1317 mS/cm <sup>2</sup>

## Anexo. - 3. Ortofoto en combinación infrarrojo de parcela Nulti A





## Anexo. - 4. Ortofoto en combinación infrarrojo de parcela Nulti B

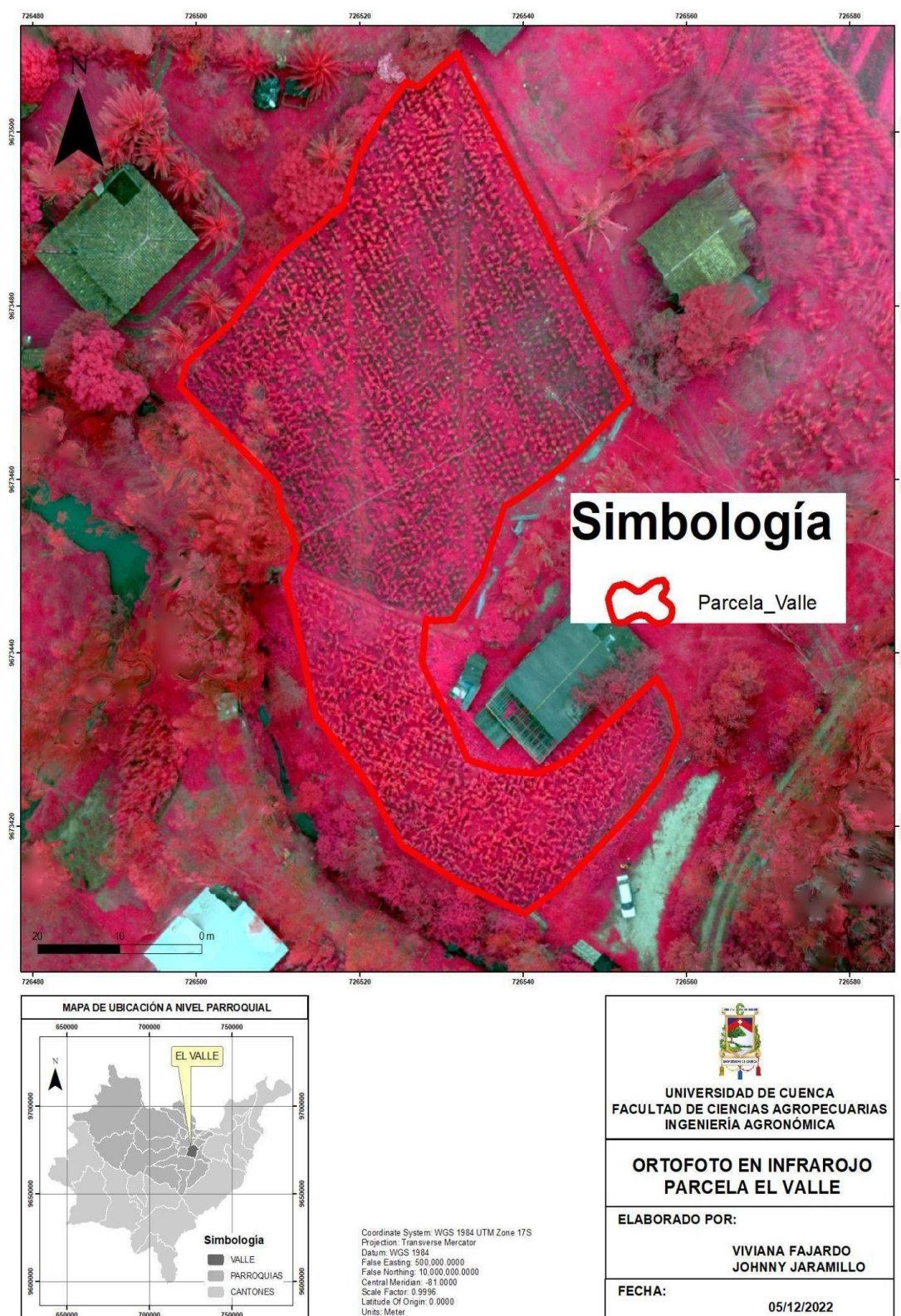


Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S  
 Projection: Transverse Mercator  
 Datum: WGS 1984  
 False Easting: 500,000.0000  
 False Northing: 10,000,000.0000  
 Central Meridian: -81.0000  
 Scale Factor: 0.9996  
 Latitude Of Origin: 0.0000  
 Units: Meter

 <b>UNIVERSIDAD DE CUENCA</b> <b>FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS</b> <b>INGENIERÍA AGRÓNOMICA</b>	
<b>ORTOFOTO EN INFRAROJO</b> <b>PARCELA NULTI 2</b>	
<b>ELABORADO POR:</b> <div style="text-align: right;"> <b>VIVIANA FAJARDO</b>  <b>JOHNNY JARAMILLO</b> </div>	
<b>FECHA:</b>	<b>05/12/2022</b>



## Anexo. - 5. Ortofoto en combinación infrarrojo de parcela Valle C



**Anexo. - 6.** Resultado General de las correlaciones. Parcela A, B y C