



**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

**Facultad de Ciencias Agropecuarias**

**Carrera de Ingeniería Agronómica**

**TÍTULO:**

**Evaluación del estrés hídrico en el cultivo de brócoli (*Brassica oleracea* var.  
Itálica), mediante técnicas espectrales.**

Trabajo de titulación previa a la obtención del  
título de Ingeniera Agrónoma

**AUTOR:** Nancy del Rocío Quito Yanza

C.I.0107128159

rocio.yanza94@gmail.com

**DIRECTOR:** Ing. Agr. Víctor Eduardo Tacuri Espinoza, MSc.

C.I.0102363579

**CUENCA, ECUADOR**

**30/07/2020**



## RESUMEN

Los sensores multiespectrales son de gran utilidad en la detección temprana del estrés, las imágenes generadas por estos equipos en conjunto con los índices de vegetación permiten estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación. La presente investigación, realizó la evaluación de una metodología basada en análisis espectral de imágenes para la estimación del estado hídrico en plantas de brócoli (*Brassica oleracea* var. *Itálica*). Se trabajó sobre una parcela de “experimentación” en la facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Cuenca. Se evaluó cinco tratamientos; T1-Anegamiento, T2, T3 y T4 a 25-50-75% respectivamente en referencia a la Capacidad de Campo y T5-Testigo, en el cultivo de brócoli. Se sometió a estrés hídrico instantáneo a diferentes dosis de riego; T1 > 0,52 L/p, T2 0,13 L/p, T3 0,26 L/p, T4 0,39 L/p y Testigo con 0,52 L/p durante trece días, en dos periodos; 45 y 75 días después del trasplante. Se realizó la toma de imágenes con el sensor Parrot Sequoia, además se registró variables fisiológicas como; conductancia estomática y contenido relativo de agua para validar los resultados espectrales del índice de vegetación de diferencia normalizada para los dos periodos. Los resultados mostraron diferencias significativas  $P=0,0022$  para el índice de vegetación en el análisis espectral entre tratamientos en los dos periodos estudiados. Las correlaciones de Pearson realizadas entre índice de vegetación y variables fisiológicas determinaron un coeficiente  $R > 0,7$  para el primer periodo. Esta investigación sugiere que las técnicas espectrales aplicadas a imágenes captadas con el sensor Parrot Sequoia, permiten analizar el estado hídrico en el cultivo de brócoli.

**Palabras claves:** Imágenes multiespectrales. NDVI. Brócoli. Estrés hídrico.



## ABSTRACT

Multispectral sensors are very useful in the early detection of stress, the images generated by these teams together with the vegetation indices allow estimating the quantity, quality and development of the vegetation. The present investigation carried out the evaluation of a methodology based on spectral analysis of images for the estimation of the hydric state in broccoli plants (*Brassica oleracea* var. *Itálica*). Work was done on an "experimentation" plot at the Faculty of Agricultural Sciences of the University of Cuenca. Five treatments were evaluated; T1-Waterlogging, T2, T3 and T4 at 25-50-75% respectively in reference to Field Capacity and T5-Witness, in broccoli culture. He underwent instantaneous water stress at different irrigation doses; T1 > 0,52 L / p, T2 0,13 L / p, T3 0,26 L / p, T4 0,39 L / p and Witness with 0,52 L / p for thirteen days, in two periods; 45 and 75 days after the transplant. The images were taken with the Parrot Sequoia sensor, and physiological variables such as; stomatal conductance and relative water content to validate the spectral results of the normalized difference vegetation index for the two periods. The results showed significant differences  $P = 0,0022$  for the vegetation index in the spectral analysis between treatments in the two periods studied. Pearson's correlations made between vegetation index and physiological variables determined an R coefficient > 0,7 for the first period. This research suggests that the spectral techniques applied to images captured with the Parrot Sequoia sensor, allow analyzing the water state in the broccoli culture.

**Key words:** Multispectral images. NDVI. Broccoli. Water stress.



## ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN .....	13
2. JUSTIFICACIÓN.....	15
3. OBJETIVOS.....	17
3.1 Objetivo General:.....	17
3.2 Objetivos Específicos: .....	17
4. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN .....	17
5. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	17
5.1 Breve reseña acerca de la Agricultura de Precisión. ....	17
5.2 Análisis espectral .....	18
5.3 Teledetección .....	19
5.4 Sensores y plataformas.....	19
5.5 Sensor multiespectral Parrot Sequoia .....	20
5.5.1 Características principales .....	21
5.6 Índices de vegetación.....	22
5.7 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).....	23
5.8 Reflectancia de la hoja .....	24
5.9 Fotogrametría.....	25
5.10 Software para el procesamiento primario de las imágenes.....	26
5.11 Productos de Sensores multiespectrales. ....	26
5.12 Brócoli en Ecuador .....	31
5.13 Generalidades del brócoli.....	32
5.14 Estrés hídrico en el brócoli .....	34
6. MATERIALES Y MÉTODOS.....	36
6.1 Materiales.....	36
6.2 Área de estudio .....	36
6.3 Características del campo experimental.....	38
6.4 Metodología.....	39
6.4.1 Establecimiento del cultivo .....	40
6.4.2 Fertilización .....	41
6.4.3 Cálculo de dosis de riego.....	42



6.5 Metodología para evaluar el índice de vegetación del cultivo sometido a estrés hídrico. ....	48
6.5.1 Captura de imágenes multiespectrales del cultivo. ....	49
6.5.2 Procesamiento de las imágenes multiespectrales. ....	50
6.6 Metodología para la determinación de la relación entre el producto espectral y las respuestas fisiológicas.....	59
6.6.1 Contenido Relativo de Agua .....	59
6.6.2 Conductancia Estomática .....	60
6.6.3 Humedad de suelo (Time Domain Reflectometry, TDR).....	61
6.7 Metodología para la elaboración de un protocolo de uso para el sensor <i>Parrot Sequoia</i> . ....	62
7. RESULTADOS.....	63
7.1 Análisis del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) del cultivo sometido a estrés. ....	63
7.2 Evaluación del NDVI para el periodo de los 45 DDT.....	64
7.3 Evaluación del NDVI para el periodo de los 75 DDT.....	68
7.4 Relación entre NDVI y respuestas fisiológicas. ....	72
7.4.1 Correlación entre NDVI y conductancia estomática (CE), plantas 45DDT. 73	
7.4.2 Correlación entre NDVI y CRA, plantas 45DDT.....	73
7.4.3 Correlación entre NDVI y Humedad de sustrato 45 DDT.....	74
7.5 Análisis de la etapa de los 75 DDT .....	75
7.5.1 Correlación entre NDVI y conductancia estomática, plantas 75DDT. ....	75
7.5.2 Correlación entre NDVI con el CRA, plantas 75DDT. ....	75
7.5.3 NDVI y Humedad del sustrato 75 DDT. ....	75
7.6 Protocolo de uso del sensor <i>Parrot Sequoia</i> . ....	77
7.6.1 Descripción del equipo.....	77
7.6.2 Partes de equipo.....	77
7.6.3 Instalación del equipo .....	80
7.6.4 Obtención de información .....	84
8. DISCUSIÓN .....	85
9. CONCLUSIONES .....	88
10. RECOMENDACIONES .....	89
11. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	90
12. ANEXOS.....	101



## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Diferentes bandas espectrales para cada sensor adaptado de (Díaz, 2015). .....	20
<b>Tabla 2:</b> Principales características del sensor Parrot Sequoia (Kharuf et al., 2018). .....	22
<b>Tabla 3:</b> Fases fenológicas del brócoli. Adaptado de Cosmo, (2015). .....	33
<b>Tabla 4:</b> Características del campo experimental. ....	38
<b>Tabla 5:</b> Etapas y dosis de fertilizante aplicado. ....	41
<b>Tabla 6:</b> Datos para el cálculo de la lámina de riego. ....	42
<b>Tabla 7:</b> Descripción de las dosis de riego por planta y en la unidad experimental. 45	
<b>Tabla 8:</b> Representación de los Tratamientos y su proximidad al Umbral de Riego. 45	
<b>Tabla 9:</b> Calendario de seguimiento del riego en el experimento. ....	46
<b>Tabla 10:</b> Registro de captura de imágenes para los periodos estudiados.....	50
<b>Tabla 11:</b> Puntos foto identificables. ....	51
<b>Tabla 12:</b> Determinación de rangos de NDVI para la clasificación final.....	57
<b>Tabla 13:</b> Comparación de porcentajes de NDVI entre tratamientos. ....	64
<b>Tabla 14:</b> Descripción del área de cobertura por tratamientos de plantas de 45DDT. .....	67
<b>Tabla 15:</b> Comparación de NDVI en porcentajes para los diferentes tratamientos.. 68	
<b>Tabla 16:</b> Descripción del área de cobertura por tratamientos de plantas grandes. 71	
<b>Tabla 17:</b> Correlaciones de Pearson ( $P < 0,05$ ) entre variables de NDVI, Conductancia Estomática y Contenido Relativo de Agua, en dos etapas fenológicas del cultivo de brócoli. ....	76
<b>Tabla 18.</b> Puntos de Retención TESIS.....	106



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Principales regiones de interés dentro del espectro electromagnético. ....	19
<b>Figura 2:</b> Cámara multispectral y sensor de brillo.....	21
<b>Figura 3:</b> Bandas que conforman la fórmula de NDVI. ....	23
<b>Figura 4:</b> Expresión de las bandas para la vegetación. ....	24
<b>Figura 5:</b> Características de la reflectancia espectral en las hojas. ....	25
<b>Figura 6:</b> Ciclo vegetativo del brócoli.....	33
<b>Figura 7:</b> Mapa de localización de la facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Cuenca. ....	37
<b>Figura 8:</b> Disposición de los bloques y los tratamientos en la parcela experimental. ....	39
<b>Figura 9:</b> Muestras para el análisis de laboratorio CC y PMP. ....	42
<b>Figura 10:</b> Representación del agua Fácilmente Disponible.....	43
<b>Figura 11:</b> Anegamiento después de la saturación completa. ....	47
<b>Figura 12:</b> Planta de Brócoli de 45 DDT (izquierda) y 75DDT (derecha). ....	48
<b>Figura 13:</b> Plantas de brócoli dentro del marco de referencia. ....	50
<b>Figura 14:</b> Tabla de contenido de ArcMap. ....	51
<b>Figura 15:</b> Imagen RGB primaria. ....	52
<b>Figura 16:</b> Referenciación de los puntos foto identificables (izquierda) y ventana para guardar bandas referenciadas.....	53
<b>Figura 17:</b> Combinación de bandas. ....	53
<b>Figura 18:</b> Combinación de falso color (izquierda) y color verdadero (derecha).....	54
<b>Figura 19:</b> NDVI de las plantas y fórmula. ....	54
<b>Figura 20:</b> Clasificación no supervisada de la imagen. ....	55
<b>Figura 21:</b> Extracción del área de cobertura de las plantas. ....	56
<b>Figura 22:</b> NDVI resultante solo de las plantas.....	56
<b>Figura 23:</b> Diagrama de proceso espectral.....	58
<b>Figura 24:</b> Registro de la humedad de suelo con el TDR. ....	61
<b>Figura 25:</b> Curva de calibración para la humedad del sustrato.....	62
<b>Figura 26:</b> Curva de Normalidad.....	63
<b>Figura 27:</b> Promedios de NDVI estresado y saludable para los tratamientos de la etapa de 45 DDT. ....	65
<b>Figura 28:</b> NDVI de un tratamiento de 45 DDT, zonas de colores verdes representan pixeles saludables. ....	66
<b>Figura 29:</b> Área de cobertura para cada tratamiento, con su desviación estándar. ....	67
<b>Figura 30:</b> NDVI estresado y saludable con desviaciones estándar. ....	69
<b>Figura 31:</b> Área de cobertura para los tratamientos de 75 DDT con sus desviaciones estándar.....	70
<b>Figura 32:</b> NDVI de T2 de la etapa de los 75 DDT, en donde se evidenció estrés (zonas < 0.35). ....	71
<b>Figura 33:</b> Raíces de planta grande (75 DDT) y pequeña de brócoli (45 DDT). ....	72



<b>Figura 34:</b> Humedad del sustrato para los diferentes niveles de estrés (tratamientos). .....	74
<b>Figura 35:</b> Archivos de cada sensor de la cámara.....	78
<b>Figura 36:</b> Dimensiones del equipo. ....	78
<b>Figura 37:</b> Calibrador de color. ....	79
<b>Figura 38:</b> Montaje del sensor .....	81
<b>Figura 39:</b> Menú principal de Parrot Sequoia. ....	81
<b>Figura 40:</b> Programación de captura de imágenes y calibración (derecha).....	82
<b>Figura 41:</b> Luces en el equipo Parrot Sequoia.....	82
<b>Figura 42:</b> Tipos de luz, en el sensor.....	83
<b>Figura 43:</b> Ajuste del equipo con ligas.....	83
<b>Figura 44:</b> Opciones de almacenamiento. ....	84

## LISTA DE ANEXOS

<b>Anexo 1:</b> Plantas de 45DDT (izquierda) y de 75 DDT (derecha). ....	101
<b>Anexo 2:</b> Fertilización, Tratamiento1 anegamiento, muestras de sustrato para CC. ....	101
<b>Anexo 3:</b> Registro de datos de Conductancia estomática, Contenido relativo de agua y humedad de suelo. ....	102
<b>Anexo 4:</b> muestras de sustrato intervenidas con el método gravimétrico para la calibración de humedad.....	102
<b>Anexo 5:</b> Tabla de valores de NDVI obtenidos por tratamiento para las dos etapas evaluadas. ....	103
<b>Anexo 6:</b> Informe de laboratorio de pruebas de CC y PMP del sustrato.....	104



## **ABREVIATURAS Y SIMBOLOGIA**

AP: Agricultura de Precisión

AC: Área de Cobertura

CC: Capacidad de Campo

CE: Conductancia Estomática

CRA: Contenido Relativo de Agua

DDT: Días Después del Trasplante

ETc: Evapotranspiración del cultivo

FPS: Frames por Segundo

NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

PMP: Punto de Marchitez Permanente

PTP: Precision Time Protocol

RGB: Red, Green y Blue

VANT: Vehículo Aéreo no Tripulado



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio  
Institucional

---

Nancy del Rocío Quito Yanza en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "**Evaluación del estrés hídrico en el cultivo de brócoli (*Brassica oleracea* var. *Itálica*) mediante técnicas espectrales**", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca 30 de julio del 2020

Nancy del Rocío Quito Yanza

C.I: 0107128159



### Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Yo, Nancy del Rocío Quito Yanza, autor/a del trabajo de titulación "Evaluación del estrés hídrico en el cultivo de brócoli (*Brassica oleracea* var. *Itálica*) mediante técnicas espectrales", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca 30 de julio del 2020

Nancy del Rocío Quito Yanza

C.I: 0107128159



## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad de Cuenca por haber sido la institución encargada de mi formación durante estos años para convertirme en una profesional útil para servir a la sociedad, mediante sus enseñanzas impartidas por la comunidad docente con quienes también me siento agradecida. En especial con el Ing. Eduardo Tacuri Espinoza MSc. por su dirección en el desarrollo de esta investigación, quien gracias a sus conocimientos y apoyo incondicional fue la motivación para este logro. Además, agradezco al Ing. Eduardo Chica PhD MSc. e Ing. Mateo López, quienes me supieron colaborar, al compartir sus conocimientos en la parte práctica que fue indispensable para poder culminar este trabajo de titulación.

A mi familia por el apoyo incondicional en todos los momentos de mi vida universitaria, amigos y compañeros por los momentos maravillosos que hemos vivido.

Nancy del Rocío Quito Yanza.



## DEDICATORIA

Dedico esta tesis a Dios por haberme regalado la vida, a mi madre María Yanza quien con su apoyo y amor incondicional me otorgó las ganas de seguir adelante. A todos mis hermanos con quienes compartimos momentos agradables, en especial a Sonia quien me supo dar su mano cuando más lo necesité y me ayudó a cumplir este gran logro en este punto tan especial de mi vida, superando los obstáculos y adversidades que se presentaron.

Finalmente, a mi bendición por llenar un pedacito en mi vida y enseñarme que no importa lo complejo de la situación, siempre hay un motivo para sonreír y seguir creciendo como persona.

Nancy del Rocío Quito Yanza.



## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad factores como el crecimiento poblacional, limitación de recursos y el cambio climático hacen imprescindible la implementación de la tecnología en los procesos de agricultura con el objeto de apoyar la sostenibilidad tanto económica como ambiental y satisfacer la demanda de productos, por tales motivos se vuelve justificable la indagación, desarrollo y aplicación de nuevas tecnologías que permitan progresar en la búsqueda de soluciones a problemas actuales en la gestión de cultivos y procesos agrícolas, como son la variabilidad de rendimientos, calidad, detección temprana de estrés, uso eficiente de recursos e impacto ambiental. Aparece en modo de respuesta, para solucionar estos inconvenientes, la agricultura de precisión y en conjunto a ella la contribución que brindan las herramientas tecnológicas de monitoreo, como la teledetección basada en sensores multiespectrales (Kharuf, Hernández, Orozco, Aday, & Mora, 2018). El uso en el mundo civil de sensores habilitó un nuevo concepto en teledetección de alta resolución (espacial, espectral y temporal), convirtiéndose en una opción viable en superficies de área menor que una imagen satelital (Martínez, 2017).

Estos sensores multiespectrales permiten la obtención de imágenes y estas a su vez, posibilitan realizar un mejor análisis de lo que ocurre en el cultivo a través de los índices de vegetación, muchos antecedentes exponen la idoneidad de estas metodologías para discriminar con éxito parámetros agronómicos de alto impacto en el manejo agrícola, pues se encuentra enormes potencialidades (Granados, 2013) para la detección de enfermedades (Roya) en cultivos de caña de azúcar (Soca, 2017), exploración que incorpora imágenes multiespectrales de cultivos asistidas por VANT para el tizón del tallo gomoso en sandía (Kalischuk et al., 2019), detección de



malezas basada en la respuesta espectral de la vegetación (Hernández, 2017), ajustes de la dosis óptima de fertilización nitrogenada, además es posible determinar una diferencia entre quinua con y sin fertilizante entre sus primeros estados fenológicos (Mora & Cañarte, 2017). Análisis del estado hídrico del cultivo mediante el uso de imágenes de elevada resolución espacial, con el fin de obtener información que permita optimizar el uso del agua, pues el estrés por déficit hídrico provoca el cierre de los estomas, baja la tasa de transpiración y eleva la temperatura en las hojas, así como el exceso impide la respiración de las raíces, todo esto se puede detectar a partir de sensores multiespectrales (Díaz, 2015). Este último ha sido una situación muy común en los cultivos en especial de las hortalizas, como es el caso del brócoli su relevancia se debe, porque para nuestro país es un producto de excelencia para la exportación, entonces evitar pérdidas por situaciones de estrés es de gran interés para el productor, se conoce que el suelo debe contener un rango de humedad comprendido entre 60% de la capacidad de campo (CC) como mínimo y el 80% como máximo debido a que si desciende al 50% de la CC, la producción puede verse comprometida entre un 25 a 30 % (Ayme, 2016), entonces la detección temprana de esta situación permite la obtención de un fundamento para la toma de decisiones al momento de realizar las correcciones al cultivo.



## 2. JUSTIFICACIÓN

Una de las actividades más importantes para el país es la agricultura, en donde la producción de: hortalizas, frutales o cereales en cualquier caso, representan un rol esencial en la dieta de las personas (Mayorga, Roldan, & Uvidia, 2019). Además, de la producción de cultivos como las hortalizas depende la base económica de los pequeños y medianos productores principalmente haciendo referencia a la región sierra, pues según datos de la Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC, 2018) hortalizas como el brócoli ocuparon el 1,2% de la superficie total sembrada, en conjunto con los principales cultivos transitorios, de estos cultivos transitorios solo el 32,52% posee riego (ESPAC, 2017). Un detalle más que demuestra la relevancia de esta hortaliza para el productor ecuatoriano es como su aceptación se ha incrementado en mercados externos pues, para el periodo de enero del 2018 generó 53 millones USD con una participación de 0,84% del grupo de los productos de exportación no petroleros (PROECUADOR, 2018).

En este contexto, haciendo alusión al cultivo de brócoli es fundamental realizar la supervisión constante del cultivo debido a su susceptibilidad a los periodos de estrés independientemente del medio en el que se encuentre establecido, de los diversos motivos que pueden provocar el estrés nos enfocaremos en el estrés hídrico el mismo que es un factor abiótico, que podría llegar a comprometer la productividad de un cultivo, además de tener una tendencia en aumento debido a los cambios ambientales lo cual conlleva a complicaciones para los países en vías de desarrollo como el nuestro, principalmente en el área socio económica (Rodríguez y Guevara, 2017). Por otro lado, el uso eficiente del riego es de vital importancia para la optimización del recurso puesto que es común actividades erróneas como realizar aportes excesivos



de agua lo cual provoca el lixiviado de nutrientes, erosión de suelo, entre otras situaciones adversas (Risco y col., 2018).

Para realizar una supervisión continua se pueden usar diversos métodos, sin embargo, el beneficio que nos otorga la teledetección remota mediante el uso de imágenes multiespectrales del cultivo, permiten el monitoreo de grandes extensiones en poco tiempo evitando recurrir a técnicas destructivas o de mayor costo.

Las imágenes multiespectrales de alta resolución tanto en partes visibles como en el infrarrojo del espectro electromagnético, posibilitan el cálculo de índices de vegetación como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el mismo que tiene la capacidad de discriminar la presencia o ausencia de vegetación, así como también entre lo que es saludable y estresado (Assamann, Kerby, Cunliffe, y Smith, 2018). Además, el análisis y procesamiento de imágenes a nivel de píxeles individuales, conllevan hacia la determinación de la información en fracciones, de diferentes superficies (vegetación y suelo), se ha utilizado como una aplicación de la detección remota para indicadores de estrés hídrico en cultivos (Jones y col., 2009).

Finalmente incursionar en nuevas tecnologías con el fin de estudiar, comprender, simplificar, y compartir mediante la enseñanza para el posterior uso, aplicación tanto de estudiantes, profesionales como productores en el campo, es lo que se procura mostrar con una técnica moderna y alternativa al monitoreo convencional, para evitar la aplicación de insumos a todo el cultivo sin discriminar entre las áreas que lo requieren y las que no, este es el aporte que se pretende con la investigación.



### 3. OBJETIVOS

#### 3.1 Objetivo General:

Evaluar una metodología basada en análisis espectral, para la estimación del estado hídrico de plantas de brócoli (*Brassica oleracea* var. *Itálica*).

#### 3.2 Objetivos Específicos:

- Evaluar el índice de vegetación del cultivo sometido a estrés hídrico mediante técnicas espectrales.
- Determinar la relación entre el producto espectral y las respuestas fisiológicas de las plantas sometidas a diferentes niveles de estrés.
- Elaborar un protocolo para el uso del sensor *Parrot Sequoia*.

### 4. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Metodologías basadas en análisis espectral, permiten la estimación del estado hídrico de plantas de brócoli (*Brassica oleracea* var. *Itálica*) en diferentes periodos del cultivo?

### 5. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

#### 5.1 Breve reseña acerca de la Agricultura de Precisión.

La agricultura de precisión (AP), *precision farming*, ha sido utilizada desde hace dos décadas especialmente en regiones de agricultura extensiva debido a que el manejo de la variabilidad del cultivo en parcela se vuelve complejo, esta se ha convertido en una herramienta útil para la adquisición y análisis de información de forma masiva. Se trata de un método innovador para la gestión de un cultivo, pues



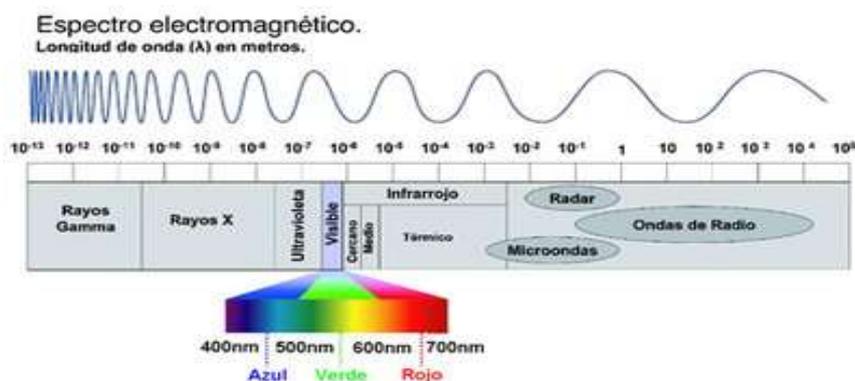
parte de la observación, la recolección y análisis de información acerca de las variaciones en el cultivo para finalizar en la toma de decisiones, con el objeto de reflejar resultados que permitan la mejora en la economía del productor (Planas, 2019).

El progreso de la AP se apoya en el uso de diversos equipos sobre los cuales es posible embarcar sensores de visión, los cuales en conjunto con otros elementos hacen posible la adquisición de grandes cantidades de información. Actualmente el potencial que poseen estos implementos en la AP se aplica al control de plagas, enfermedades, malezas además de la eficiente aplicación de tratamientos fitosanitarios (Planas, 2019).

## **5.2 Análisis espectral**

El análisis espectral busca capturar la disposición espectral de la energía, es decir capturar el flujo de energía que irradia sobre un objeto o superficie respecto a una longitud de onda. La espectroscopia dentro de la ciencia tiene el objeto de estudiar la emisión y absorción de la radiación electromagnética por la materia (Andrade & Moncayo, 2017).

La radiación electromagnética que puede cubrir de forma continua todo un amplio rango de valores de longitudes de onda (Olaya, 2014), que a su vez es conocida como espectro electromagnético (Ver Figura 1):



**Figura 1:** Principales regiones de interés dentro del espectro electromagnético.

**Fuente:** tycgis.com, 2020.

### 5.3 Teledetección

Es el estudio y medida de las características de los elementos de la superficie terrestre evitando el contacto físico. Para ello, se miden las perturbaciones del elemento con su entorno, principalmente las de tipo electromagnético (Olaya, 2014).

### 5.4 Sensores y plataformas

La plataforma es el medio en el que se sitúa el sensor y desde el cual se realiza la observación (Olaya, 2014). Existen dos tipos diferentes de plataforma. Dentro del primer grupo aquellas situadas dentro de la atmósfera como ejemplo los vehículos aéreos no tripulados VANT. Los VANT son equipos tipo aeronave sin tripulación a bordo, especializados técnicamente para realizar vuelos, dirigidos por un piloto mediante un sistema de control. Conformando dos periodos; una en vuelo y otra en tierra (Díaz, 2015).

El segundo tipo de plataforma son aquellas situadas fuera de la atmósfera (a bordo de satélites).



El sensor por su parte es el aparato que nos permite “capturar” la imagen, y puede ir desde una simple cámara fotográfica hasta un sensor más especializado. Para dar a conocer algunos de ellos:

**Tabla 1:** Diferentes bandas espectrales para cada sensor adaptado de Díaz, (2015).

<b>SENSOR</b>	<b>BANDA ESPECTRAL</b>
Visible RGB (cámara fotográfica)	380-780 Nanómetros
Visible (cámara de video)	380-780 Nanómetros
Infrarrojo cercano	3 bandas 500-950 Nanómetros
Multiespectral	18 bandas 500-950 Nanómetros
Hiperespectral	400 bandas 450-950 Nanómetros
Térmico	400 bandas 450-950 Nanómetros

### **5.5 Sensor multispectral *Parrot Sequoia***

El sensor multispectral *Parrot Sequoia* ofrece una solución completa, adaptable y compatible con todos los VANT. *Parrot Sequoia* analiza la vitalidad de las plantas detectando la cantidad de luz que absorben y reflejan gracias a sus dos sensores, multispectral y de luz solar. Estos datos permiten al agricultor optimizar su intervención en las parcelas (Sequoia, 2019). Algunas de las ventajas obtenidas gracias al uso del sensor son: hacer aportes de fertilizante variando la cantidad según las necesidades, reduce el uso de pesticidas aplicándose únicamente donde se requiere o analizar el comportamiento de las plantas tras el riego, etc. a nivel de micro parcela (Sequoia, 2019).



### 5.5.1 Características principales

El sensor “multiespectral”, capta la luz que reflejan las plantas en cuatro partes diferentes: verde y rojo, así como dos bandas infrarrojas no visibles para los humanos. El sensor "sunshine", ubicado encima de la plataforma, memoriza la intensidad de la luz reflejada del sol en estas mismas cuatro bandas de luz (Martínez, 2017).



**Figura 2:** Cámara multiespectral y sensor de brillo.

**Fuente:** tycgis.com, 2020.

- Cámara auto calibrada usando el sensor de irradiación
- Cámara RGB: 16 Mpx, tamaño del píxel de 1.34  $\mu\text{m}$  y distancia focal de la lente de 4.88 mm.
- Tasa de toma fotográfica de 1 foto por segundo.
- 4 cámaras espectrales: 1.2 Mpx, tamaño del píxel de 3.75  $\mu\text{m}$  y distancia focal de la lente de 3.98 mm
- Independiente del dron (Kharuf et al., 2018).

**Tabla 2:** Principales características del sensor Parrot Sequoia (Kharuf et al., 2018).

<b>Cámara RGB 16 Mpix</b>	<b>Ancho de banda espectral</b>
Definición: 4608x3456 pixeles HFOV: 63.9° VFOV: 50.1° DFOV: 73.5° <b>4 cámaras con obturador global de una sola banda de 1,2 Mpix.</b> HFOV: 61.9 VFOV: 48.5 DFOV: 73.7	Verde (530-570) nm Rojo (640-680) nm Red Edge (730-740) nm Infrarrojo cercano (770-810) nm <b>Peso y dimensiones</b> <b>Sensor multiespectral:</b> 59 x 41 x 28 Peso: 72g / 2.5 oz <b>Sensor de luz solar:</b> 47 x 39.6 x 18.5 Peso: 36g / 1.3 oz

## 5.6 Índices de vegetación

Los parámetros que permiten detectar la presencia o ausencia de vegetación en dado lugar, son los índices de vegetación debido a que la actividad y comportamiento de la vegetación puede ser evaluada según su estado. Para ello, utilizan los valores de reflectancia correspondientes a las distintas longitudes de onda, interpretando estas en relación con la actividad fotosintética (Olaya, 2014).

Un índice de vegetación es una combinación de las bandas espectrales, siendo el producto de una operación aritmética entre dichas bandas, para generar un valor que permita estimar y evaluar el estado de salud de la vegetación por pixel (Andrade & Moncayo, 2017).

Existen varios índices de vegetación que permiten monitorear estas características la mayoría de estos índices se basan en la interacción entre la vegetación y la energía electromagnética de las bandas del espectro rojo e infrarrojo.



### 5.7 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Este índice consiste en apartar la vegetación del brillo que refleja el suelo, basándose en el comportamiento de la estructura foliar y actividad fotosintética de la vegetación. Este índice está representado por valores que están en función de la energía reflejada o absorbida dentro del espectro electromagnético (Andrade & Moncayo, 2017).

A continuación, se muestra la fórmula del NDVI:

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

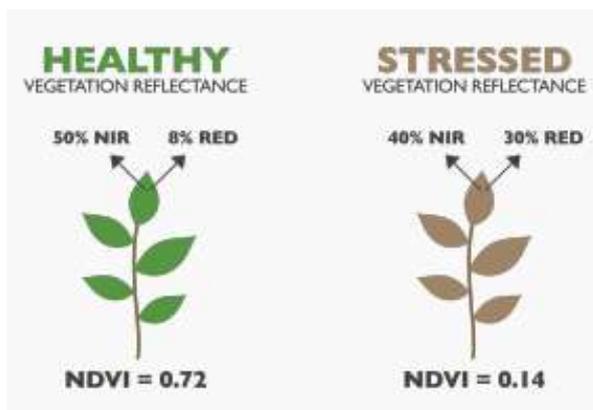
**Figura 3:** Bandas que conforman la fórmula de NDVI.

Donde:

- NIR es la reflectancia espectral del canal infrarrojo cercano
- RED representa la reflectancia en el canal rojo del visible.

En la vegetación sana, se puede ver claramente un contraste entre la banda roja, y Near Infrared (NIR).

En el espectro visible se absorbe la mayor parte de la energía de los pigmentos de la hoja; en el NIR, se refleja la mayor cantidad de energía de las paredes de las células de las hojas que se encuentran llenas de agua. Cuando la vegetación sufre algún tipo de estrés disminuye el NIR y aumenta paralelamente el rojo (Andrade & Moncayo, 2017).



**Figura 4:** Expresión de las bandas para la vegetación.

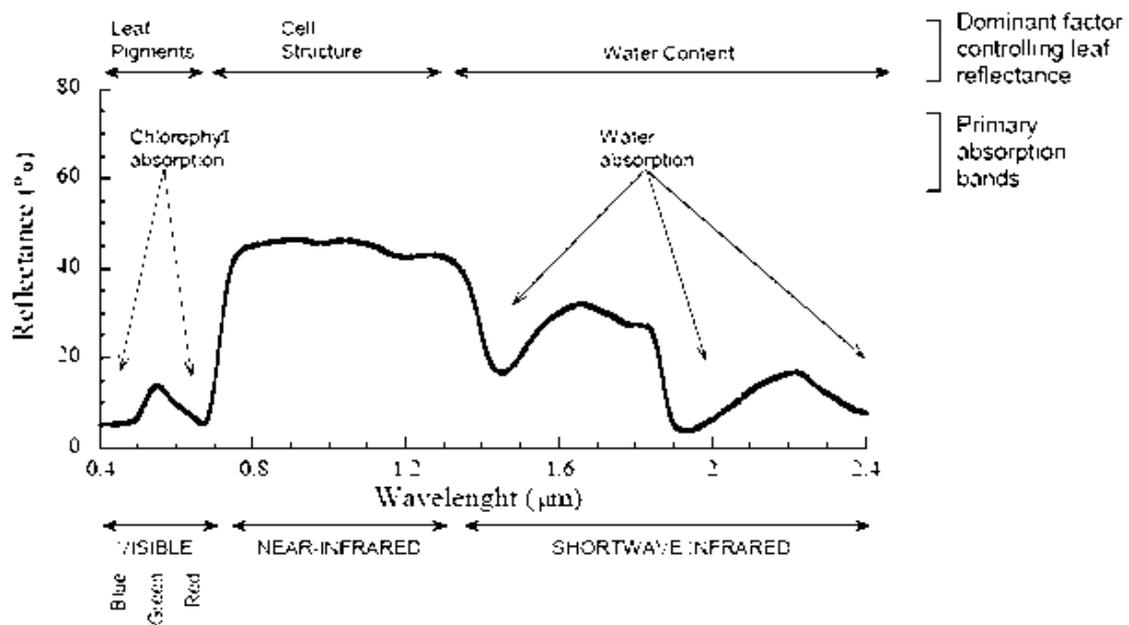
**Fuente:** Antognelli, (2020).

El rango de valores del NDVI está entre -1 a 1, los valores más cercanos a 1 representan mejores condiciones de salud de las plantas.

### 5.8 Reflectancia de la hoja

En general, los pigmentos de las hojas tienen un gran efecto en la reflectancia visible debido a las clorofilas (a y b), carotenos y xantofilas. Existen dos bandas de absorción fundamentales el azul y rojo debido a la clorofila que inducen un pico de reflectancia en la región verde, característico de la fisonomía verde de hojas sanas (Gilabert, González, & Martínez, 2010).

En el infrarrojo cercano, la absorción es muy baja (inferior al 10%) y la dispersión de la radiación por los elementos de la hoja interna determina tanto la reflectancia como la transmitancia, que presenta valores semejantes. La característica más común de esta zona es una meseta que puede alcanzar una reflectancia del 50%, y que depende de la estructura interna de la hoja, así como de la cantidad de espacio en el mesófilo que determina las interfaces (aire / agua) con diferentes índices de refracción (Gilabert et al., 2010).



**Figura 5:** Características de la reflectancia espectral en las hojas.

**Fuente:** Gilabert, González, & Martínez, (2010).

La reflectancia se eleva con el incremento del grosor del mesófilo porque aumenta el número de capas de células e interfaces, por lo tanto, el proceso de dispersión es más prominente. La absorción de luz por el agua de la hoja determina la reflectancia en el medio dominio infrarrojo, de modo que la reflectancia disminuye cuando el contenido de agua aumenta (Gilabert et al., 2010).

## 5.9 Fotogrametría

Es la técnica que permite el estudio y definición con la mayor exactitud tanto la configuración, dimensión y posición en el espacio de cualquier objeto mediante medidas realizadas sobre una o más fotografías (Olaya, 2014). La fotogrametría multispectral hace referencia al análisis de las propiedades de los objetos desde bandas separadas, las fotografías que se realizan con el sensor Parrot Sequoia están divididas en cinco archivos (RED, GREEN, NIR, REDEDGE, RGB). El análisis de



fotografías en vegetación permite visualizar variables como; la biomasa del cultivo, sanidad, estados de estrés, etc. Todo depende de la calidad del material inicial, el procesado de esta información y la interpretación de resultados.

### **5.10 Software para el procesamiento primario de las imágenes**

En la fotogrametría digital juega un papel de gran importancia tanto el sensor como la plataforma que se utilice, pues a diferencia de una imagen satelital que es adquirida de manera más acelerada con una geometría realmente estable y simple, la orto imagen puede componerse de cientos y hasta miles de imágenes, de geometría compleja. Convertir tales datos a unidades físicas de radiancia o formato de reflectancia no es un pequeño desafío (Milas et al., 2018).

Actualmente se dispone de diversidad de software que se destinan al procesamiento de imágenes vinculadas a diversas áreas de estudio entre ellas la agricultura, podemos destacar los que son paquetes de software con licencia de pago y aquellos de software libre, en cualquiera de los dos casos se llegarán a obtener los resultados como: orto mapas, procesamiento de imágenes NIR o cálculo de índices vegetativos. Por mencionar algunos; Data Mapper, Agisoft PhotoScan, Pix4Dmapper Ag, ArcGIS, QGIS, entre muchos más (Jiménez, 2016).

### **5.11 Productos de Sensores multiespectrales.**

Los productos de los sensores multiespectrales son las imágenes las mismas que poseen gran utilidad pues, mediante el procesado y análisis de esta información estamos en capacidad de darle aplicabilidad. Además, la vegetación es un elemento del medio que por sus características despierta interés dentro del análisis espectral.



Las aplicaciones más comunes están en mapeo de vegetación, que incluye lo siguiente:

- Regeneración forestal
- Clasificación de especies arbóreas
- Evapotranspiración
- Mapeo de hojarasca, etc. (Milas et al., 2018)

Las aplicaciones se extienden hacia áreas dentro de la agricultura también son claramente muy importantes, incluyen lo siguiente:

- Rendimientos
- Contenido de clorofila
- Mapeo de malezas
- Mapeo de cultivos de pequeños productores (Milas et al., 2018)

Las plantas absorben la radiación en regiones visibles dentro del espectro electromagnético, como principio se refleja en las bandas de las imágenes la zona del infrarrojo con valores altos de reflectancia y bajos en la banda del rojo este caso, demuestra la presencia y estado de la vegetación (Olaya, 2014).

Por estas características que se atribuyen a la vegetación ha sido posible la captura de variaciones en la fotosíntesis y la evapotranspiración durante los episodios de sequía, mediante la aplicación de un modelo de transferencia radiativa y basado en el proceso, denominado Observación de la fotosíntesis y los flujos de energía del suelo / dosel Soil Canopy Observation of Photosynthesis and Energy fluxes, (SCOPE) que relaciona las señales de la detección remota con procesos



fisiológicos como la fotosíntesis y la evapotranspiración en la planta (Bayat, van der Tol, Yang, & Verhoef, 2019).

La capacidad para discriminar entre el estrés generado por la limitación en la cantidad de agua y nitrógeno para el brócoli, mediante la evaluación de varios índices entre ellos el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), índice de concentración de clorofila en el dosel (CCCI) y el índice de déficit de agua (WDI), permiten detectar un retraso del crecimiento inducido por el tratamiento. El WDI proporcionó información apropiada sobre el estado del agua, independientemente de las condiciones de cobertura del dosel, después de varios eventos de riego (Shikha, Waller, Hunsaker, Clarke, & Barnes, 2007).

Diferenciación de superficies (vegetación y suelo) se ha utilizado como una aplicación de la detección remota para indicadores de estrés hídrico en cultivos mediante el análisis y procesamiento de imágenes a nivel de píxeles individuales (Jones et al., 2009).

Lara, (2017) demuestra que mediante el uso de imágenes multiespectrales, capturadas con el sensor Parrot Sequoia en cultivos de hortalizas y mediante el análisis con software especializado, es posible la detección de la presencia de maleza en el cultivo a nivel de píxeles, pues al construir modelos de clasificación de cultivos y maleza por medio de estos equipos se obtienen resultados con precisiones superiores al 90%.

Mamani, Ramos, Ontiveros, Bustamante, & Porras, (2019) en sus estudios evaluaron la relación de la altura de planta del cultivo de arroz bajo estrés hídrico con índices de vegetación obtenidas de imágenes con VANT, en donde los resultados,



revelan que el NDVI y *Leaf Area Index* (LAI) tiene la misma tendencia y diferente a la altura de la planta sin embargo, los índices de vegetación se relacionaron más estrechamente con la altura de planta, pues el estrés hídrico influye en el cambio de morfología y la anatomía de las plantas, finalmente se demuestra la viabilidad del uso de índices de vegetación para la detección temprana el estrés hídrico.

Niño & Rodríguez, (2017) en estudios realizados en Colombia ponen de manifiesto la capacidad que poseen los sensores multiespectrales (Parrot Sequoia) para la determinación de la colorimetría de los agroquímicos y la identificación de plagas para el control fitosanitario en el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris*) permitiendo identificar los focos de afectación de plagas.

En el manejo agronómico de los cultivos, es fundamental la determinación de parámetros que permitan indicar el estado de crecimiento de los cultivos y los efectos ocasionados por prácticas agrícolas, uno de ellos es la biomasa por encima del suelo (Han et al., 2019).

Uno de los principales beneficios del uso de los SIG en la AP, haciendo referencia a las imágenes multiespectrales, es la disminución de costes en la producción de los cultivos como lo evidencian: (Schimmelpfennig & Ebel, 2016) al poner a prueba varios escenarios entre adoptantes y no adoptantes de AP, en los resultados ofrecen evidencia de las tendencias de adopción mixtas observadas para diferentes tecnologías de precisión, la tecnología de tasa variable (VRT) mostró ahorros al mapeo de suelos y monitoreo de rendimiento, el ahorro de costos por acre (medida de superficie entre 0,4 y 0,5 ha) aumentó de \$ 13,45/acre a \$ 20,56/acre en este escenario. Los futuros adoptantes pueden realmente beneficiarse con el ahorro



de costos, tanto en términos de insumos usando las tecnologías de AP como las tecnologías que mejor funcionan en diferentes circunstancias.

Si bien estas tecnologías han sido bien aprovechadas por otros países, el nuestro poco a poco va abriéndose paso en el uso y aplicación de estas tecnologías con el objeto de monitorear cultivos, tal es el caso que nos demuestran Godoy & Luna, (2019) que mediante el análisis y caracterización espectral del chocho (*Lupinus mutabilis sweet*) demostraron los efectos de tratamientos de desinfección de semilla mediante la comparación de varios índices, encuentran diferencias entre los estados fenológicos y a su vez los índices son indicadores más sensibles de presencia de estrés en la planta.

En estudios realizados por Andrade & Moncayo, (2017) en donde realizaron un análisis de NDVI contrastando diferentes metodologías de toma de datos espectrales, en cultivos de pastos, al comparar los modelos de NDVI proveniente de un espectro radiómetro con los del sensor Parrot sequoia, este último ofrece mayor rentabilidad, además que su uso en VANT reduce costos.

Rodríguez, J (2017) nos indica como se refleja de manera muy notable en la respuesta espectral la carencia del recurso hídrico en la vegetación, pues ponen en evidencia el comportamiento de varios índices que muestran en los resultados la reducción de la vigorosidad, al comparar dos periodos diferentes también registró cambios en áreas que pasaban de vegetación vigorosa a poco vigorosa por la falta de agua y del incremento de suelos desnudos por actividades de cosecha. Este estudio fue validado con datos satelitales (SENTINEL-2A) sin embargo, para el análisis de coberturas vegetales estas imágenes, satelitales tienen una respuesta espectral mixta de pixeles mientras que los índices generados con VANT para las mismas coberturas



indican más variaciones debido a su alta resolución espacial que les permite detectar de manera más detallada los cambios en la cobertura.

Erazo & Sevilla, (2019) nos dan a conocer un estudio multiespectral del cultivo de tuna al determinar varios índices de vegetación a partir de imágenes SENTINEL 2A en el cantón Guano, se obtuvieron índices aproximados y referenciales sin embargo, para obtener valores más exactos de los índices en el cultivo es recomendable utilizar imágenes de mayor resolución espacial.

### **5.12 Brócoli en Ecuador**

El brócoli es una hortaliza que se originó en el mediterráneo y a través de los años se ha vuelto un vegetal muy apetecible por todos sus nutrientes y vitaminas, por lo que con el pasar del tiempo se ha convertido, en una hortaliza de gran demanda por parte de algunos países (Bastidas, 2015). Debido a esa situación, el Ecuador se ha transformado en un gran productor llegando a ser uno de los países posicionado entre los diez mayores exportadores de brócoli. Hoy en día el brócoli es el segundo producto, no tradicional más importante en el país (Bastidas, 2015).

Según datos del MAG (2017) en el país, el cultivo de brócoli se encuentra distribuido, en las siguientes provincias: Cotopaxi (5.496 ha plantadas), Tungurahua (869 ha), Chimborazo (685 ha), Imbabura (104 ha), Pichincha (32 ha) y finalmente Azuay (5 ha) como las principales provincias productoras de esta hortaliza.

Entre los destinos de mayor exigencia del producto se encuentran: Japón, Canadá, Europa y USA (Bastidas, 2015). Con el propósito de cumplir con la demanda para estos destinos, se ve como una prioridad para obtener una buena producción



del cultivo de brócoli tener en cuenta en el establecimiento, la disposición de suficiente agua para el riego, (Risco y col., 2018).

### **5.13 Generalidades del brócoli**

El brócoli es una hortaliza originaria de las costas del Mediterráneo Oriental y Oriente Próximo, donde actualmente se encuentran Grecia, Turquía o Siria, se establece mejor en zonas de climas templados, los suelos idóneos son aquellos que poseen un Ph cercano a la neutralidad pues es poco tolerante a la acidez además de un buen contenido de materia orgánica, una estructura con alta capacidad para retener agua y de buena profundidad (Ayme, 2016).

El brócoli, posee la raíz principal de tipo pivotante en conjunto con un sistema de raíces secundario muy abundante, su tallo es grueso y erecto de hasta 50 cm de largo, sobre el cual de disponen las hojas que tiene un color verde oscuro festoneadas, con un limbo hendido, presentando en la base de la hoja pequeños fragmentos de peciolo a ambos lados de la nervadura central. Sus flores son actinomorfas de arreglo perfecto con cuatro pétalos de color amarillo y dispuestas en forma de cruz, en algunas ocasiones puede presentarse situaciones de auto incompatibilidad, la polinización es de tipo cruzada realizada por insectos, la inflorescencia está compuesta por los primordios florales tiernos dispuestas en un corimbo primario en el extremo superior de tallo el color de los corimbos puede ser verde o purpura depende del cultivar seleccionado. En su etapa final luego de la floración se forman los frutos (silicuas) y semillas pequeñas de color marrón (Ayme, 2016).



**Figura 6:** Ciclo vegetativo del brócoli.

**Fuente:** Cosmo, 2015.

**Tabla 3:** Fases fenológicas del brócoli. Adaptado de Cosmo, (2015).

	Estado fenológico	Descripción
1	Emergencia	Cuando los cotiledones emergen del suelo
2	Cotiledonar	Los cotiledones comienzan abrirse desplegándose los folíolos ambos lados.
3	Desarrollo	Desde la aparición de las primeras hojas verdaderas hasta el origen de la floración.
4	Floración	Iniciación de la formación de los cojinetes florales y la formación completa de la cabezuela. Hasta la apertura de las flores.
5	Reproducción	Parte desde la floración hasta la maduración completa de las silicuas.
6	Cosecha de semilla	silicuas maduras y secas, antes de la dehiscencia.



### **5.14 Estrés hídrico en el brócoli**

El brócoli es una hortaliza de gran valor nutricional las condiciones del medio en el que se implementa y el manejo del mismo, provocan que el cultivo esté expuesto a episodios de estrés durante su desarrollo (Krizaj, 2014). El estrés, definido como un grupo de respuestas que expresa un organismo bajo un estado diferente al observado en condiciones óptimas (Cornejo y Benavides, 2002).

El estrés hídrico puede provocar que los cambios estructurales y fisiológicos de las plantas se conviertan en pérdidas de agua excesivas de acuerdo con las estrategias de uso del agua específicas de cada especie (Tong, Mu, Zhang, Meng, y Li, 2019).

Es probable que el estrés causado por el déficit hídrico sea uno de los más comunes en los cultivos de hortalizas con fines productivos, la pérdida de agua por el follaje de una planta es un proceso de gran importancia e inevitable, pues este es un mecanismo de enfriamiento, por lo tanto para que las plantas mantengan un buen ritmo de crecimiento es normal la pérdida de una cantidad de agua (Cornejo y Benavides, 2002). Una situación de estrés conlleva a la activación de rutas metabólicas secundarias, como mecanismos de defensa sintetizando compuestos bioactivos (Krizaj, 2014). Tanto la intensidad como la duración de la sequía son un factor importante en la acumulación de metabolitos secundarios (glucosinolatos), que se encuentran principalmente en las Brassicaceae, así como en la etapa de desarrollo, en la que se presente el estrés (Martínez, Moreno, y Carvajal, 2013).

El cultivo de brócoli se ve sujeto a las fluctuaciones del medio en el que se encuentre establecido, además de las actividades pre culturales, culturales y post



culturales que son llevadas a cabo para obtener un buen rendimiento (MAG, 2017). Entre las actividades culturales está el riego, que es de gran importancia para satisfacer las necesidades y evitar el estrés (Krizaj, 2014). Se conoce que el suelo debe contener un rango de humedad volumétrica, comprendido entre 60% de la capacidad de campo (CC) como mínimo y el 80% como máximo, debido a que si desciende al 50% de la CC la producción puede verse comprometida entre un 25 a 30 % (Ayme, 2016).

Bautista, Constante, Gordon, & Mendoza, (2018) mencionan, pruebas realizadas con la cámara espectral SURVEY 2 Red + NIR, se tomaron fotografías espectrales de áreas cultivadas con brócoli en diferentes etapas de desarrollo para ser procesadas en el algoritmo de programación realizado en Matlab. En los resultados se evaluó aspectos cualitativos como; densidad de las plantas, sequía aparente, etc. Los resultados obtenidos del (NDVI) de cultivos de brócoli se ha logrado estimar la calidad, cantidad y desarrollo del mismo mediante la codificación en colores del NDVI.

Hossain y Mohona, (2018) afirman en sus estudios, que las plantas de brócoli sometidas a diferentes horarios de riego (15, 30, 45, 60 DDT, Días Después del Trasplante), en los resultados sugieren, que el riego hasta los 45 y 60 DDT serían suficientes para una buena producción.

Risco y col., (2018) dan a conocer, las respuestas generadas por el brócoli ante la reposición de la evapotranspiración, si presenta diferencias en el rendimiento al obtener mayor producción con una reposición hasta el 150% a la evapotranspiración, lo que sugiere que el momento más adecuado para incrementar el aporte hídrico en el cultivo de brócoli en los Andes ecuatorianos es la época de menores lluvias y mayor evapotranspiración.



El estrés hídrico combinado con estrés por calor comprende un rango de sobrevivencia entre 40-60% en plantas de Arabidopsis la sobrevivencia aumenta si el estrés es generado individualmente (Kumazaki y Suzuki, 2019).

## 6. MATERIALES Y MÉTODOS

### 6.1 Materiales

Para el levantamiento de la información se utilizaron los siguientes instrumentos y materiales:

**Oficina:** Cámara Parrot Sequoia, Batería portátil, Computadora, Software.

**Campo:** Fundas negras, Sustrato, Fertilizante, cuaderno de apuntes, Agua (riego).

**Laboratorio:** Balanza, porómetro, Time Domain Reflectometry (TDR), estufa.

**Biológicos:** plantas de brócoli.

### 6.2 Área de estudio

El estudio fue establecido en un invernadero de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Cuenca, esta ubicación se encuentra a una altura de 2562 m.s.n.m. y en las coordenadas (UTM WGS84) siguientes; **X:** 719596.30 **Y:**9677058.14



**Figura 7:** Mapa de localización de la facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Cuenca.



### 6.3 Características del campo experimental

**Tabla 4:** Características del campo experimental.

<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>
Número de tratamientos	5
Número de repeticiones	3
Número de unidades experimentales	15
Área total del ensayo	30m <sup>2</sup>
Forma de la parcela	Cuadrado
Ancho de parcela	1m
Largo de parcela	1m
Área de parcela	1m <sup>2</sup>
Distancia entre plantas	0,40 m
Distancia entre parcelas	0,50m
Distancia entre bloques	0,50m
Número de plantas por parcela	4
Número total de plantas	120

El diseño experimental que se utilizó fue el Diseño de Bloques Completos al Azar (BCA), con cuatro tratamientos con un testigo (5 Trat.) y tres repeticiones.

#### **Bloques**

Bloque 1: Repetición 1

Bloque 2: Repetición 2

Bloque 3: Repetición 3



Para el análisis funcional se hizo uso de la estadística descriptiva con ANOVAS y correlaciones de Pearson con un valor  $p=0,05$ .

Diagrama del diseño experimental; disposición de los bloques en el invernadero. Cada tratamiento consto de cuatro plantas (4p) sembradas en una funda cada una.

<b>B1</b>	T1 4p	T4 4p	T5 4p	T3 4p	T2 4p
<b>B2</b>	T2 4p	T5 4p	T1 4p	T4 4p	T3 4p
<b>B3</b>	T1 4p	T3 4p	T4 4p	T2 4p	T5 4p

**Figura 8:** Disposición de los bloques y los tratamientos en la parcela experimental.

## 6.4 Metodología

Para empezar, una vez determinado el espacio físico a ocuparse dentro del invernadero se realizó la preparación del sustrato, luego se colocó en fundas negras dejándolo reposar enfundado quince días, para después proceder a sembrar las plántulas, para la fertilización se siguió el calendario mediante el cual nos regimos la dosis por periodo a fertilizar (Ver Tabla 5). Las plantas se mantuvieron bajo óptimas condiciones de riego hasta los periodos de aplicación de estrés, es decir los: 45 y 75 días después del trasplante (DDT) después de llegar a este periodo se induce el estrés hídrico instantáneo durante trece días bajo los siguientes tratamientos: T1 (anegamiento), T2, T3, T4 (25%, 50% y 75% en referencia de la CC respectivamente), y el Testigo los cuales corresponden a las siguientes dosis de riego:  $>0,52$  L/p (T1), 0,13 L/p (T2), 0,26 L/p (T3), 0,39 L/p (T4) y 0,52 L/p (T5-Testigo), los cuales permitieron inducir el estrés hídrico instantáneo. En los periodos mencionados



anteriormente se procedió a recolectar la información correspondiente a variables fisiológicas como; conductancia estomática y contenido relativo de agua, además del seguimiento de la humedad del sustrato. La información espectral fue recolectada a los trece días de inducido el estrés con el sensor Parrot Sequoia, realizando el registro fotográfico de cada repetición de los respectivos tratamientos.

A continuación, se detallan cada actividad realizada en el experimento desde cómo fue elaborado el sustrato, hasta el cómo se realizó la captura de información del cultivo ya sometido a estrés hídrico.

#### **6.4.1 Establecimiento del cultivo**

Para el establecimiento del cultivo de brócoli se utilizó una parte del área de un invernadero de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Cuenca. Se hizo la adquisición de plántulas de brócoli las cuales fueron sembradas en fundas negras de 35 cm de altura, el piso del invernadero fue de cemento con una cubierta plástica relativamente nueva.

El sustrato que fue ocupado estuvo compuesto de 75% tierra y un 25 % de bocashi como materia orgánica, el cual después de haber sido preparado se dejó en reposo durante quince días antes de la siembra. Se sembraron 60 plantas para el primer periodo (45 DDT) y 60 para la segundo (75 DDT). Se sembró dos lotes de plantas porque el estrés aplicado conllevó el riesgo de muerte, entonces el primer lote se destinó a la aplicación de estrés a 45 DDT y el segundo a 75 DDT. Se ocupó un área de total de 30 m<sup>2</sup> en donde se colocó las 120 plantas con un marco de plantación de 0,3 m x 0,4 m.



### 6.4.2 Fertilización

Ubidia, (2014) menciona que la aplicación de 10-30-10 en el trasplante y posteriormente nitrato de amonio se obtiene buenos resultados para el cultivo de brócoli como se cita en (MAG, 2010), por lo cual se tomó los requerimientos identificados en esta investigación antes mencionada para proceder a calcular las cantidades aplicadas en el presente experimento, de modo que se aplicó el fertilizante en fracciones para el periodo del cultivo intervenido.

Siguiendo un modelo base de fertilización, se aplicó 10-30-10 en los periodos desde pre siembra a siembra por la elevada concentración de fósforo, debido a que este macronutriente de liberación lenta es favorable aplicarlo previamente para el cultivo de hortalizas. A los 30 y 60 días después del trasplante se aplicó el fertilizante 15-5-20-2MgO-10S, este fertilizante es una mezcla química dirigida propiamente al cultivo de brócoli según las recomendaciones de la etiqueta del producto.

**Tabla 5:** Etapas y dosis de fertilizante aplicado.

<b>Edad (Días)</b>	<b>Etapas</b>	<b>10-30-10</b>	<b>15-5-20-2MgO-10S</b>
0	Pre siembra	6 gramos	-
15	Siembra	6 gramos	-
30	Siembra- desarrollo	-	5 gramos
60	Desarrollo	-	5 gramos



### 6.4.3 Cálculo de dosis de riego.

Para saber qué cantidad de agua fue requerida por las plantas se procedió a realizar un análisis del sustrato, determinando la capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y la densidad aparente, en el laboratorio del Promas de la Universidad de Cuenca (Ver anexo 5), con esta información se procedió a calcular la dosificación de riego. Cabe recalcar que, si bien la profundidad de la raíz de brócoli es mucho mayor, la que se utilizó fue de 0,35 m por el tamaño de la funda en donde fueron sembradas las plantas.



**Figura 9:** Muestras para el análisis de laboratorio CC y PMP.

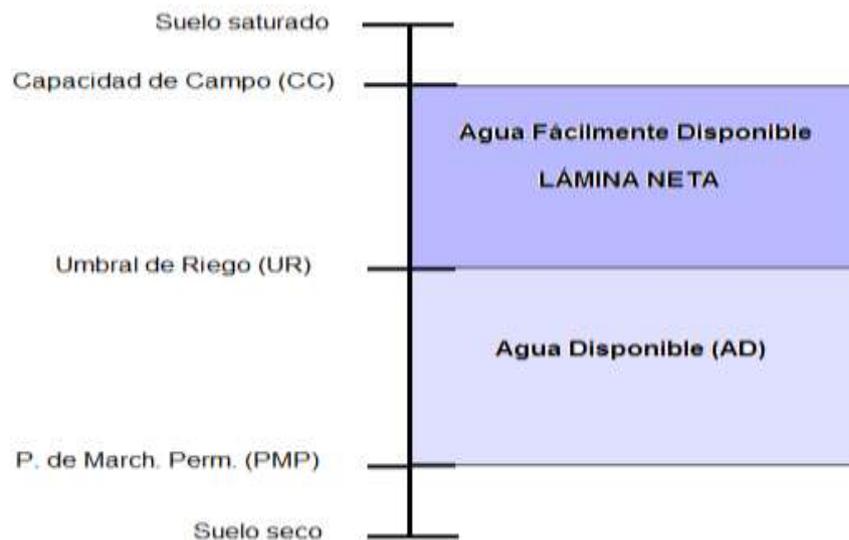
**Tabla 6:** Datos para el cálculo de la lámina de riego.

Descripción	Unidad	valor
Capacidad de Campo (CC)	cc/cc	0,48
Punto de Marchitez Permanente (PMP)	cc/cc	0,29
Densidad aparente (Da)	g/cc	0,84
Profundad radicular (Pr)	m	0,35
Fracción de agotamiento (p)	-	0,45
Evapotranspiración del cultivo (Etc)	mm/día	4,32



Aplicando las fórmulas planteadas por (FAO, 2006) y (Alocén, 2007) se calculó la siguiente lámina de riego:

**Primero**, calculamos la disponibilidad de agua que hace referencia a la capacidad de retener agua en el suelo, para disponibilidad de las plantas y que ya sea después del riego o lluvia se drenará hasta alcanzar la CC.



**Figura 10:** Representación del agua Fácilmente Disponible.

### Agua Disponible Total (ADT)

$$ADT = 1000(\theta_{FC} - \theta_{WP}) Z_r$$

$\theta_{FC}$  = contenido de humedad a capacidad de campo [ $m^3 m^{-3}$ ],

$\theta_{WP}$  = contenido de humedad en el punto de marchitez permanente [ $m^3 m^{-3}$ ],

$Z_r$  = profundidad de las raíces [m].

Por lo que, para el sustrato utilizado en este estudio:

$$ADT = 1000(0,48 - 0,29)0,35m$$

$$ADT = 0,0665 m \Rightarrow 66,5 mm \text{ (FAO, 2006)}$$



**Segundo**, se procedió a calcular el agua fácilmente aprovechable que se refiere a la fracción de ADT, que es extraído sin dificultad por la zona radicular del cultivo sin experimentar estrés hídrico.

### **Agua Fácilmente Aprovechable (AFA)**

$$\text{AFA} = p (\text{ADT})$$

**AFA** agua fácilmente aprovechable (extraíble) de la zona radicular del suelo [mm],

**p** fracción promedio del total de agua disponible en el suelo (ADT) que puede ser agotada de la zona radicular antes de presentarse estrés hídrico (reducción de la ET) [0 - 1].

$$\text{AFA} = 0,45 (0,0665 \text{ mm}) \text{ (Ver tabla 8)}$$

$$\text{AFA} = 0,029 \text{ mm} \Rightarrow 29,9 \text{ mm (FAO, 2006)}$$

$$1 \text{ mm} = 1 \text{ L/m}^2$$

El cálculo para el área de marco de plantación (0,4 m x 0,3 m) que representa el lugar de cada planta. Se obtuvo 0,52 mm/planta esto equivale a 0,52 l/p/d como dosis de riego para la lámina tomada como 100% en referencia a la CC.

El cálculo de la lámina total de riego en referencia de la capacidad de campo, se tomó como el 100% lo cual permitió obtener las láminas para los tratamientos T2, T3, T4 del siguiente modo como se muestra en la tabla 7:

**Tabla 7:** Descripción de las dosis de riego por planta y en la unidad experimental.

Trat	% en ref. a CC	Ln (mm)	Vol./Día (l/m <sup>2</sup> )	MP	Litros/planta/día
1	Anegamiento	-	-	0,12	-
2	25	7,25	1,04	0,12	0,13
3	50	15	2,16	0,12	0,26
4	75	22,5	3,24	0,12	0,39
Testigo	100	30	4,32	0,12	0,52

MP: Marco de Plantación

**Tabla 8:** Representación de los Tratamientos y su proximidad al Umbral de Riego.

ADT=66,5mm		
CC	UR	PMP
AFA-T5 (Ln = 30 mm)		PMP
T4 = Ln 22,5mm		PMP
T3 = Ln 15 mm		PMP
T2 = Ln 7,25mm		PMP

AD=Agua Disponible

Los cálculos se basaron en los resultados del laboratorio acerca de la CC y PMP del sustrato para el cálculo de la lámina total y en referencia aquella se obtuvo las láminas de los otros tratamientos.

El riego se aplicó diariamente con la dosis de riego de 0,52 L/p hasta el día 45 después del trasplante, entonces se regó con las dosis calculadas para cada tratamiento; T2, T3 y T4 con 0,13 L, 0,26 L y 0,39 L por planta respectivamente. El



tratamiento testigo se mantuvo con el riego inicial y el T1 de anegamiento se procedió a inundar con agua las fundas en las que estuvieron las plantas, esto durante los 13 días de estrés inducido instantáneamente. La misma secuencia se aplicó para el periodo de los 75 DDT.

**Tabla 9:** Calendario de seguimiento del riego en el experimento.

Calendario de Riego para el primer grupo (45DDT)								
mes	semanas	DIAS						
		L	M	M	J	V	S	D
septiembre	1	X	X	X	X	X		
	2	X	X	X	X	X		
octubre	3	X	X	X	X	X		
	4	X	X	X	X	X		
	5		X	X	X	X		
	6	X	X	X	X	AE	AE	AE
noviembre	7	AE	AE	AE	AE	AE	AE	AE
	8	AE	AE	FIN.				
Calendario de Riego para el segundo grupo (75DDT)								
mes	semanas	DIAS						
		L	M	M	J	V	S	D
septiembre	1	X	X	X	X	X		
	2	X	X	X	X	X		
octubre	3	X	X	X	X	X		
	4	X	X	X	X	X		
	5	X	X	X	X	X		
	6	X	X	X	X	X		
noviembre	7	X	X	X		X		
	8	X	X	X	X			
	9	X	X	X	X			
	10	X	X	X	X	AE	AE	AE
diciembre	11	AE	AE	AE	AE	AE	AE	AE
	12	AE	AE	FIN.				

AE; Aplicación del estrés hídrico instantáneo con diferentes dosis.  
X; Riego a Capacidad de Campo.

Para la evaluación mediante técnicas espectrales de las respuestas del cultivo de brócoli sometido al estrés hídrico instantáneo, se dispuso de cinco tratamientos: uno de ellos por encima de la capacidad de campo o anegamiento, tres por debajo de la CC y un testigo. experimento se desarrolló usando tres repeticiones por tratamiento.



Como podemos observar en la tabla N° 7 los tratamientos abarcan el estrés hídrico tanto por exceso, así como también por déficit de hídrico: el T1 es un anegamiento, los tratamientos T2, T3 y T4 con una disminución progresiva a la cantidad optima de riego. A cada una de las cuatro plantas se proporcionó, de la lámina descrita en la tabla 10 según el tratamiento.

El riego fue proveído manualmente midiendo cada dosis según el respectivo tratamiento, con una probeta y agregada directamente en cada funda plantada, esta actividad se realizó únicamente después de los 45 y 75 DDT, durante trece días que se aplicó el estrés.

Para el tratamiento uno de anegamiento se procedió inundar la planta con agua hasta el cuello, de modo que al cubrir el agua la funda se produzca una saturación por todos los hoyos de la funda, se cubrió la parte de suelo expuesta junto al tallo con el fin de evitar la evaporación del agua.



**Figura 11:** Anegamiento después de la saturación completa.



## 6.5 Metodología para evaluar el índice de vegetación del cultivo sometido a estrés hídrico.

Una vez que los tratamientos fueron establecidos se procedió a determinar las respuestas que presentaron las plantas de brócoli mediante el uso del sensor multiespectral Parrot Sequoia. La captura de imágenes con el sensor se realizó a los 13 días después de la inducción del estrés hídrico, en dos periodos del desarrollo vegetativo: a los 45 días DDT y a los 75 DDT.



**Figura 12:** Planta de Brócoli de 45 DDT (izquierda) y 75DDT (derecha).

Se hizo el cálculo de **la distancia focal** de la cámara a baja altura, se determinó la huella en piso a de 2 metros sobre las plantas y se obtuvo un área de 4,5 m<sup>2</sup> que fue satisfactoria para obtener una imagen completa para cada tratamiento con una resolución espacial de gran precisión, para obtener mejores resultados se registró datos entre las 11:30 hasta las 13:00 horas, debido a que son los momentos del día con mayor actividad fotosintética por la radiación de mayor intensidad (Berrío, Mosquera, y Alzate, 2015).

Con ayuda del software especializado como ArcMap de ArcGis con licencia para la Universidad de Cuenca y QGis software libre se realizó el ajuste por imagen de las



cuatro bandas (GREEN, RED, REG y NIR) al momento de la captura evitando de esta manera distorsiones en la etapa de procesamiento.

Se realizó el procesamiento para la obtención del índice de vegetación NDVI. Finalmente, mediante la obtención del NDVI de las imágenes de cada tratamiento, se determinó el estado de las plantas según la condición que reflejan los diferentes niveles de estrés.

### **6.5.1 Captura de imágenes multiespectrales del cultivo.**

Las imágenes se capturaron sujetando la cámara en un soporte (Ver Figura 40) cabe aclarar que, si bien las plantas fueron colocadas en la parte interna del invernadero durante su etapa de desarrollo con el único objeto de mantener el control sobre las condiciones de riego.

Para hacer la toma de imágenes se procedió a moverlas a una un sector sin cubierta plástica del mismo espacio físico, el registro fotográfico se hizo *bajo el efecto directo de la radiación del sol para todos los tratamientos de los dos periodos.*

Se realizó la captura de imágenes con las plantas ordenadas, por codificación para cada tratamiento y repetición como se muestra en la tabla 10, es decir se obtuvieron cinco imágenes por tratamiento, haciendo uso de un marco de referencia. El marco de referencia fue una cuadrícula de piolas trazada el piso de cemento y sujeta con clavos, como se observa en la figura 13. El material de fondo fue el piso de cemento sin embargo para el posterior análisis se realizó únicamente del follaje de



las plantas de brócoli, mediante las herramientas de ArcGis es posible hacer el análisis únicamente del área de interés.



**Figura 13:** Plantas de brócoli dentro del marco de referencia.

**Tabla 10:** Registro de captura de imágenes para los periodos estudiados.

Fechas	Bloque	Hora(pm)	Tratamientos	N° Captura	N° Archivos	N° Total
13/11/2019 11/12/2019	Inicio	12:00			<b>GREEN-RED-REG-NIR-RGB</b>	
	B1	12:00-12:15	T1-T2-T3-T4-TEST	5	5	25
	B2	12:15-12:30	T1-T2-T3-T4-TEST	5	5	25
	B3	12:30-12:45	T1-T2-T3-T4-TEST	5	5	25

El número total de imágenes multiespectrales captadas en los periodos estudiados (45 y 75 DDT) fueron 150, es decir 75 del primero y 75 del segundo.

### 6.5.2 Procesamiento de las imágenes multiespectrales.

Un punto foto identificable es una referencia que se encuentra en campo, (en este caso la referencia estuvo situada en el piso en el cual se situó el experimento) y al mismo tiempo en la fotografía. Estos puntos foto identificables fueron coordenadas tomadas en función a los vértices del marco de referencia, en donde cada tratamiento se encontraba enmarcado dentro de un marco de un metro cuadrado.



**Referenciación:** Con ayuda de los puntos foto identificables, se creó un archivo de tipo texto con las cuatro coordenadas necesarias para tener la referencia de un cuadro.

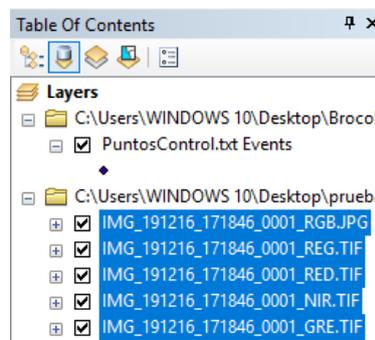
**Tabla 11:** Puntos foto identificables.

ID	X	Y
1	719489,171	9676982,803
2	719488,171	9676982,803
3	719488,171	9676983,803
4	719489,171	9676983,803

En ArcMap se utilizó la herramienta Referenciación, para subir la capa de puntos y referenciar las imágenes.

*Clic en archivo > Agregar datos > Agregar datos XY.*

Una vez que se tuvieron los datos de coordenadas ingresados al programa, se procedió a subir las imágenes captadas por el sensor Parrot Sequoia, se cargaron los cinco archivos procedentes de la cámara, desde el catálogo de ArcMap.

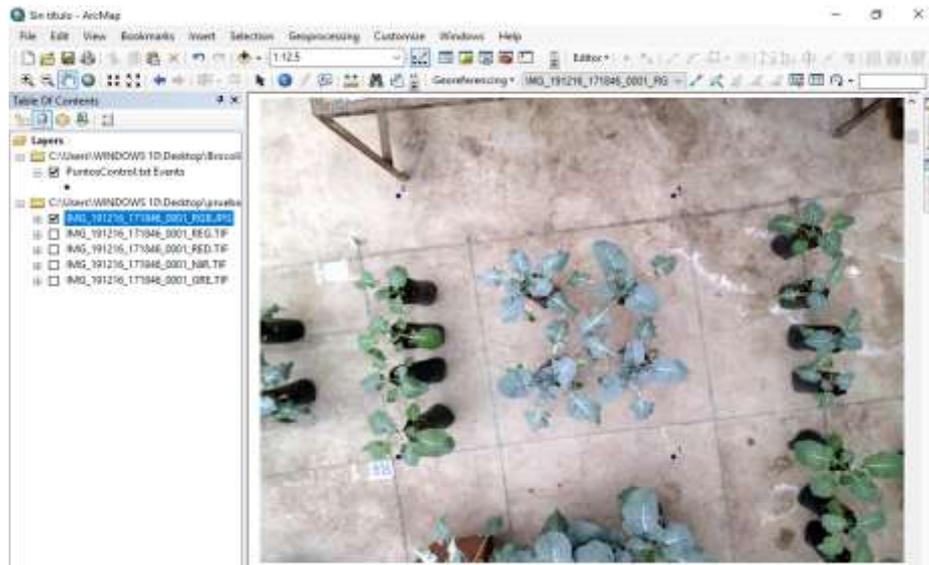


**Figura 14:** Tabla de contenido de ArcMap.



Para poder visualizar las imágenes, se activó un comando denominado: **georeferencing**. Tomar en cuenta que para visualizarlas se debe seleccionar la imagen en la tabla de contenido, así como también en el menú de Georeferencing.

*Clic en Customize > Toolbars > Georeferencing.*

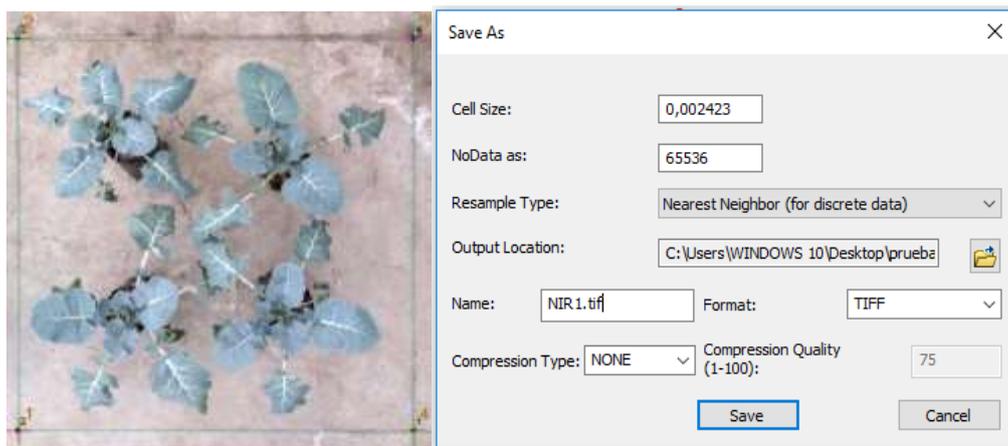


**Figura 15:** Imagen RGB primaria.

Para empezar, se referenció la imagen con; clic en adicionar puntos de control y seguidamente se hizo clic en los vértices de la imagen y luego en el punto de este modo para los cuatro puntos. Lo siguiente fue guardar la imagen referenciada en una carpeta a elección.

*Georeferencing > Rectify > Save*

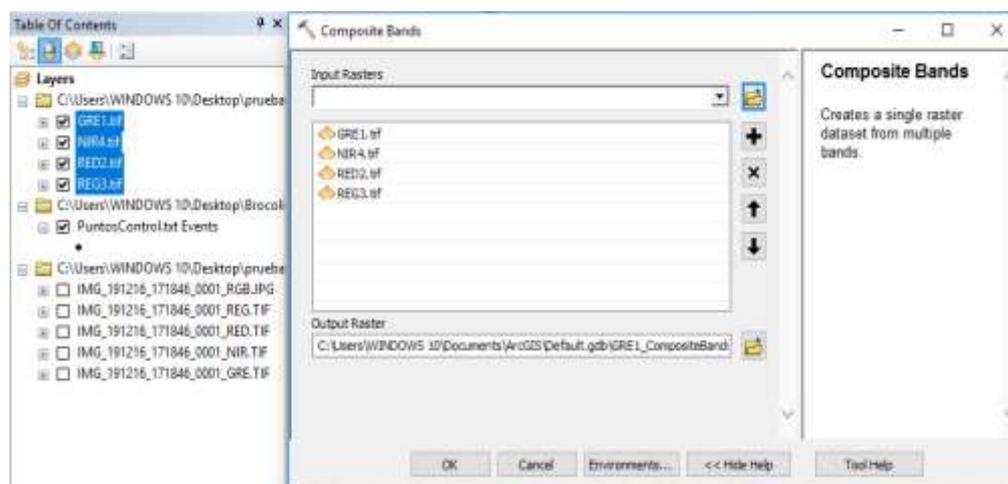
Esta acción se llevó a cabo de manera repetitiva hasta terminar con las cinco imágenes referenciadas.



**Figura 16:** Referenciación de los puntos foto identificables (izquierda) y ventana para guardar bandas referenciadas.

Con todos los archivos referenciados y guardados en una carpeta se procedió a cargarlos nuevamente en la tabla de contenido, lo siguiente fue unir las bandas, con este nuevo archivo fue posible hacer diferentes combinaciones que permitieron visualizar diferentes elementos de la imagen. Se procedió a buscar la herramienta bandas compuestas.

*Clic en Search > Composite Bands*



**Figura 17:** Combinación de bandas.

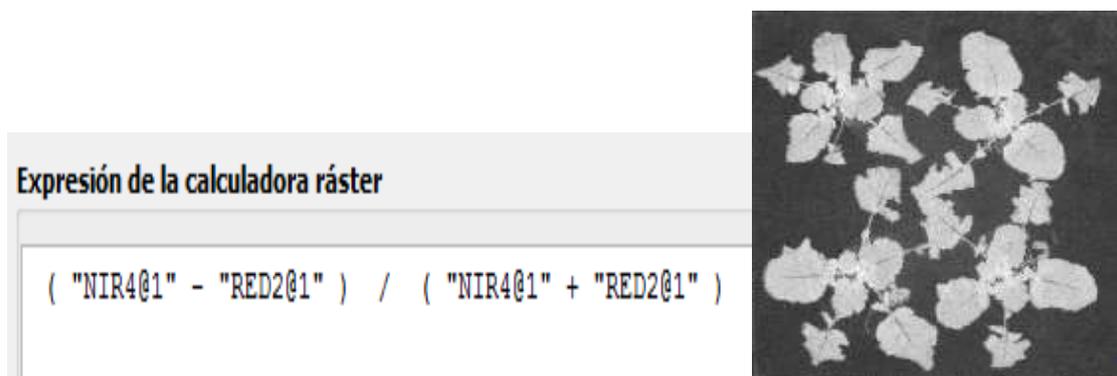


Con el nuevo archivo fue posible hacer diferentes combinaciones de bandas y para un mejor análisis fue posible recortar mediante la herramienta extract by mask (spatial analyst) solo el área de interés.



**Figura 18:** Combinación de falso color (izquierda) y color verdadero (derecha).

Lo siguiente a estos pasos fue la obtención del NDVI, por la mejor adaptación de comandos se decidió realizar en QGis, para lo cual se procedió a cargar las bandas de interés para la fórmula y se mandó a correr la calculadora raster.



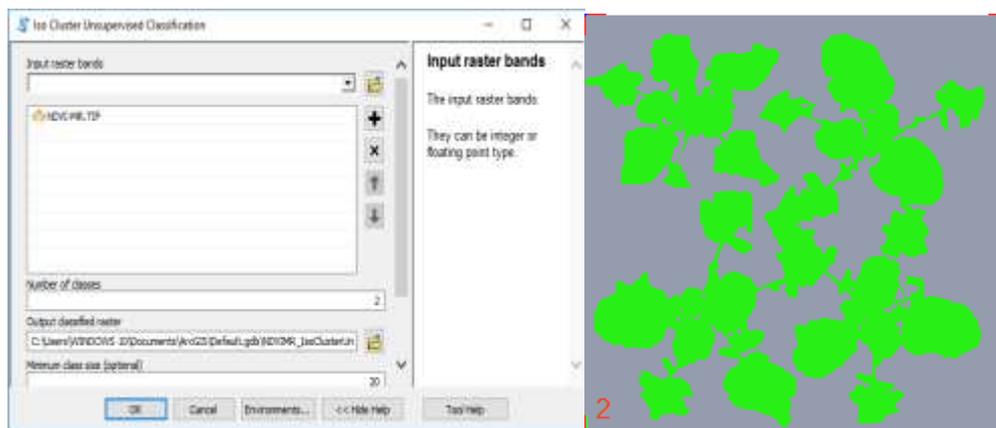
**Figura 19:** NDVI de las plantas y fórmula.

Realizado este paso se continuó en el ArcGis se cargó el ráster del NDVI, se procedió a diferenciar en clases; lo que es suelo y las plantas de brócoli. Para ello se



buscó la herramienta denominada clasificación no supervisada y se eligió dos clases.

*Clic en Search > iso cluster unsupervised classification (spatial analyst).*

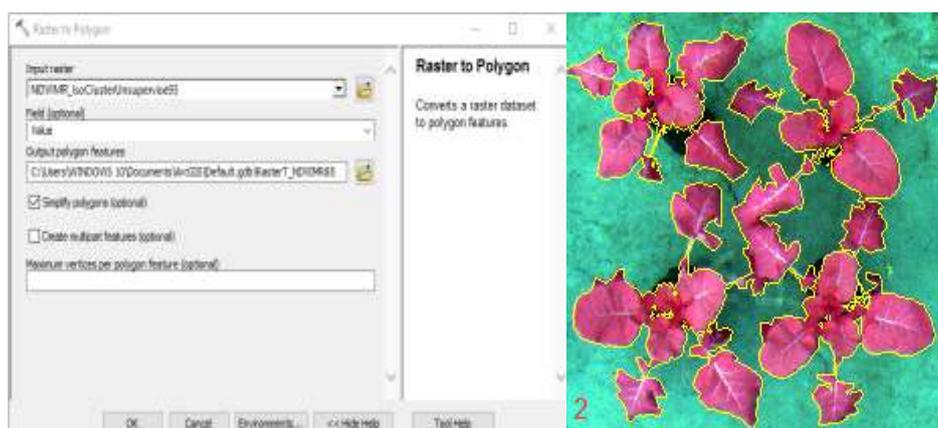


**Figura 20:** Clasificación no supervisada de la imagen.

Una vez obtenido el nuevo archivo con dos clases en donde se pudo ver con claridad la diferenciación entre suelo y plantas de brócoli, se procedió a poligonizar este archivo con la herramienta de conversión de raster a polígono.

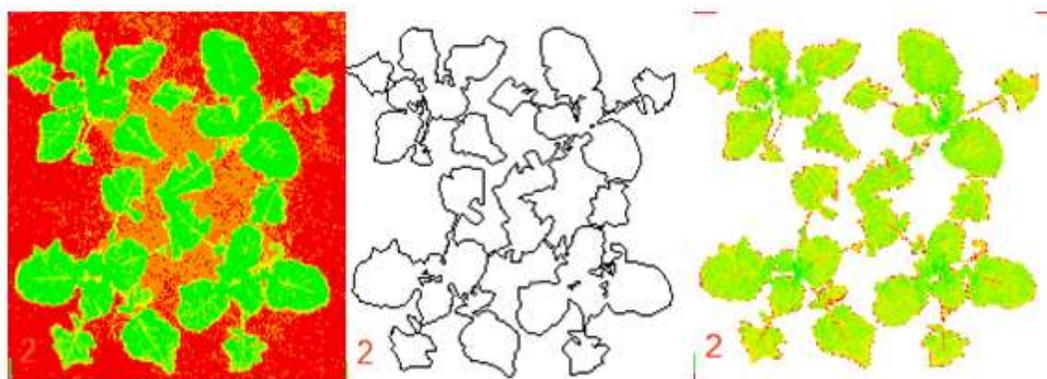
*Clic en Search > raster to polygon (conversión)*

El archivo de salida nuevo es de tipo vector conformado por varios polígonos que conforman las plantas y el suelo se vio en la imagen de líneas de color amarillo y como encierra las partes exactas de las hojas del brócoli (Ver figura 21). Lo que prosiguió fue la extracción de los polígonos de plantas pues lo que es de interés para en análisis son solo las plantas sin el suelo.



**Figura 21:** Extracción del área de cobertura de las plantas.

Una vez obtenido el shapefile de plantas se hizo un corte del NDVI con esta máscara. De modo que el archivo final solo sea el NDVI de las plantas las cuales se analizaron posteriormente.



**Figura 22:** NDVI resultante solo de las plantas.

Finalmente se obtuvo el NDVI únicamente de las plantas, este proceso se realizó para todas las repeticiones de todos los tratamientos pues una vez que estos archivos se han obtenido lo que procede es clasificarlo según las clases de interés en función a los rangos para la clasificación. En este caso se decidió hacer la clasificación en dos clases, para determinar qué cantidad de píxeles corresponden a cada clase es



suficiente con abrir la tabla de atributos y verificar la cantidad, estos valores quedan a criterio del evaluador.

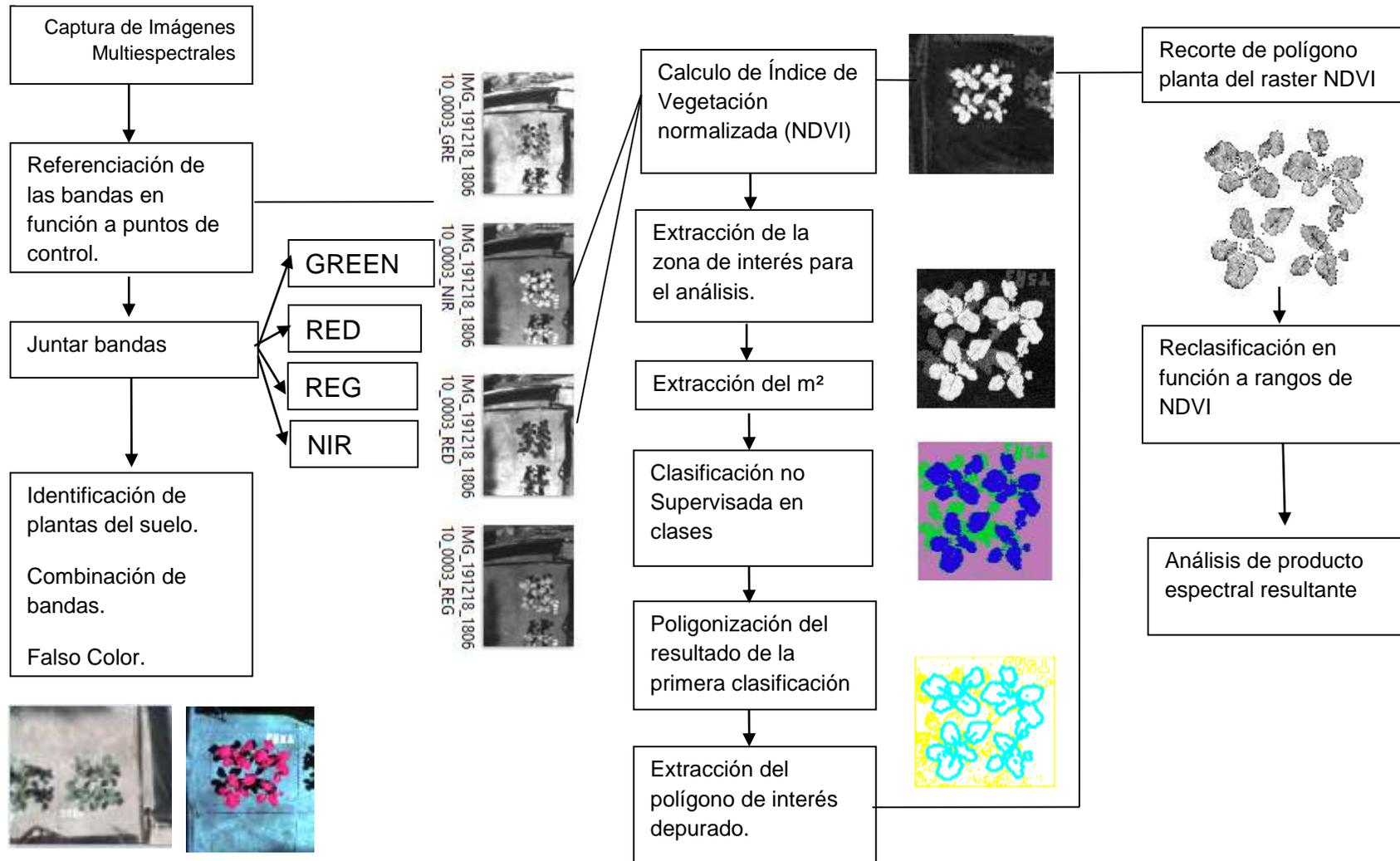
Echevarria, (2010) menciona una clasificación de tres clases para los pixeles resultantes (bajo, medio y alto), según lo que menciona este autor se hizo la clasificación en dos clases para los pixeles resultantes, en donde se los denominó saludables y estresados. Los rangos que se tomaron en cuenta para dicha clasificación fueron; de 0 a 0,4 para vegetación estresada y de 0,4 a 0,9 para la vegetación saludable, estos valores fueron adaptados de estudios de autores como (Ballari et al., 2015) y (Kharuf et al., 2018).

**Tabla 12:** Determinación de rangos de NDVI para la clasificación final.

<b>Criterio</b>	<b>Rango</b>	<b>Descripción</b>
Bajo	0,0 - 0,4	Vegetación Estresada
Alto	0,4 - 0,9	Vegetación Saludable



Figura 23: Diagrama de proceso espectral.





## **6.6 Metodología para la determinación de la relación entre el producto espectral y las respuestas fisiológicas.**

Para la obtención de una relación, entre las respuestas fisiológicas de plantas de brócoli sometidas al estrés hídrico instantáneo y los resultados del producto espectral de las imágenes, se realizó la toma de datos de las siguientes variables; contenido relativo de agua (RWC), conductancia estomática (CE) y humedad de suelo.

### **6.6.1 Contenido Relativo de Agua**

Contenido Relativo de Agua (RWC), se compone de tres datos que son; la masa fresca, masa turgente y masa seca para proceder a obtener esta información del cultivo. Vila, (2011) recomienda realizar el corte de las hojas a medio día, estas se colocan dentro de una funda y se pesan inmediatamente, luego se hidratan durante una noche en agua destilada para alcanzar la turgencia máxima y se pesa nuevamente al siguiente día, finalmente las hojas son secadas en estufa a 80 °C y se vuelven a pesar.

Para este experimento se realizó del mismo modo mencionado en el párrafo anterior, con la diferencia que no se tomó una hoja entera sino una fracción de ella en el caso de las plantas grandes de 75 DDT. Sin embargo, para el grupo de plantas de 45 DDT se registró información de la hoja completa porque se trataba de plantas con hojas pequeñas.

Con estos datos se procedió a remplazar en la fórmula que nos mencionan (Suárez et al., 2015) en uno de sus estudios, la fórmula se expresa del siguiente modo:



$$\text{CRA (\%)} = [(MF - MS) / (MT - MS)] \times 100$$

Dónde:

- MF- Masa fresca
- MS- Masa seca
- MT- Masa turgente.

Es una medida del contenido de agua respecto a la totalidad de agua que se puede almacenar en los tejidos, se expresó como porcentaje y permitió tener una idea del estado hídrico de las plantas de brócoli (Argentel, González, Ávila, & Aguilera, 2006).

### 6.6.2 Conductancia Estomática

Fisiológicamente el comportamiento estomático, constituye un mecanismo de vital importancia para enfrentar situaciones de estrés hídrico, en el caso de déficit se produce el cierre de estomas para evitar la pérdida de agua (Rodríguez y Guevara, 2017). Este parámetro fue medido con un sensor denominado porómetro a medio día, pues en este momento es cuando las plantas se encuentran en su máximo funcionamiento estomático con el objeto de llegar a un equilibrio entre el agua disponible en el suelo y las pérdidas por evapotranspiración.

Para la toma de datos de conductancia estomática primero se seleccionó un día donde las condiciones medioambientales fueron propicias con esto nos referimos a días completamente despejados y soleados, esta situación es idónea para el registro del estado estomático de las hojas. Segundo, se calibró el porómetro y con especial cuidado de no tocar la hoja demasiado se colocó el porómetro en las hojas de las plantas de brócoli, se tomó en cuenta que la hoja seleccionada debía ser una hoja joven madura.



Cabe añadir que, si bien la humedad de suelo no es una variable fisiológica de las plantas, se realizó el seguimiento de este parámetro con el objeto de mostrar los valores de humedad de sustrato de los diferentes tratamientos.

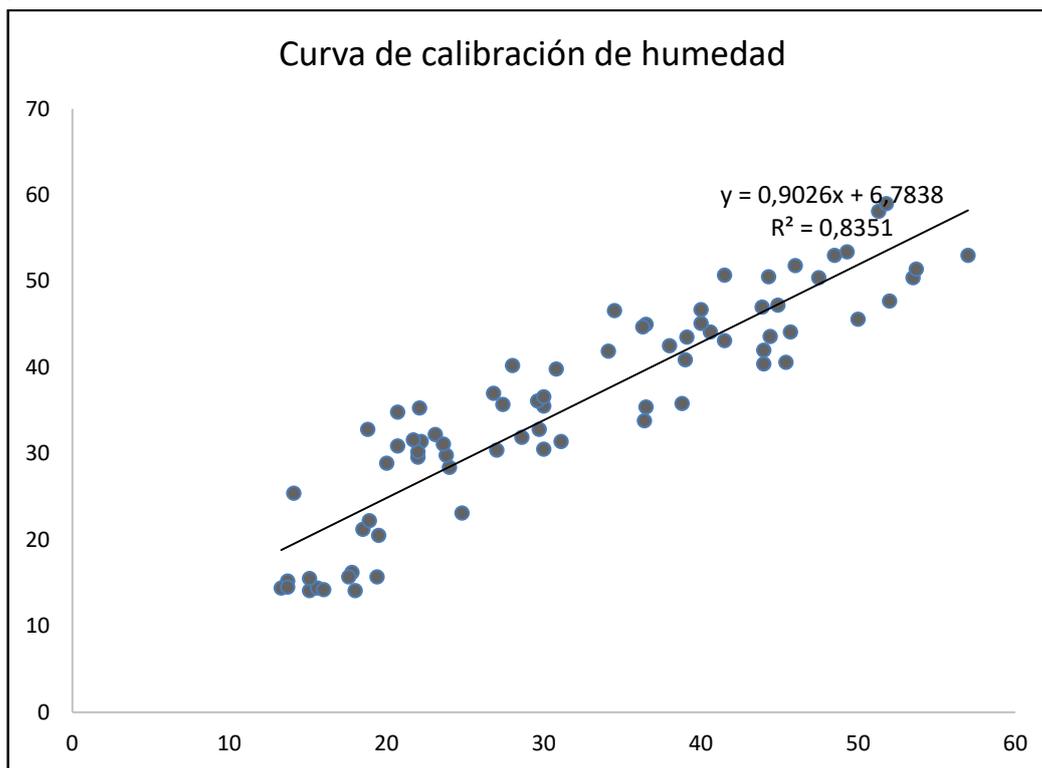
### 6.6.3 Humedad de suelo (Time Domain Reflectometry, TDR)

Se conoce que el TDR es uno de los métodos de medida de la constante dieléctrica del suelo, que se ha demostrado en íntima relación con su contenido de agua. Entre sus principales ventajas esta la precisión de las medidas, la rapidez y facilidad de uso (López, Crende, y Castelao, 2005). Por ello, la medición de esta variable se realizó con el equipo denominado TDR. Los valores obtenidos del TDR fueron calibrados mediante la ecuación que se muestra en la figura 25 usando valores determinados por el método gravimétrico.

En este caso, la humedad del suelo se puede medir a cualquier hora del día, con la precaución de no hacerlo después de haber regado las plantas, puesto que las medidas obtenidas se verían alteradas. Es recomendable medir estos valores al siguiente día de haber regado. La medición se realizó en horas de la mañana antes del mediodía, después de obtenidos los datos se pudo proceder a regar.



**Figura 24:** Registro de la humedad de suelo con el TDR.



**Figura 25:** Curva de calibración para la humedad del sustrato.

### 6.7 Metodología para la elaboración de un protocolo de uso para el sensor *Parrot Sequoia*.

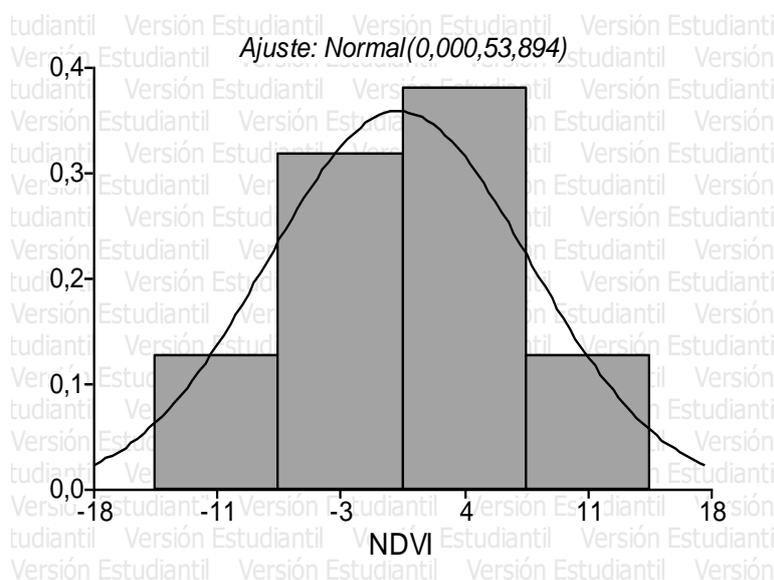
La presente es el resultado de la búsqueda de información secundaria, registro de vivencias en la práctica, verificación de las recomendaciones técnicas del equipo además del trabajo en conjunto con docentes expertos en la materia para llegar a obtener productos de análisis a partir de las imágenes capturadas mediante este sensor, este protocolo tiene como fin servir de manera informativa, dirigido hacia las nuevas investigaciones que se realicen dando un uso adecuado al equipo antes mencionado. Adjunto en la parte de los resultados para tercer objetivo del presente documento **ver las páginas desde la 77 hasta la 84.**



## 7. RESULTADOS

### 7.1 Análisis del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) del cultivo sometido a estrés.

Los datos fueron sometidos a pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk, los cuales presentaron un comportamiento normal para las dos etapas evaluadas.



**Figura 26:** Curva de Normalidad.

Por la normalidad de los datos, se aplicó para el primer objetivo estadística de tipo descriptiva realizando ANOVAS con el test de Duncan, con un nivel p de significancia del 0,05.



## 7.2 Evaluación del NDVI para el periodo de los 45 DDT.

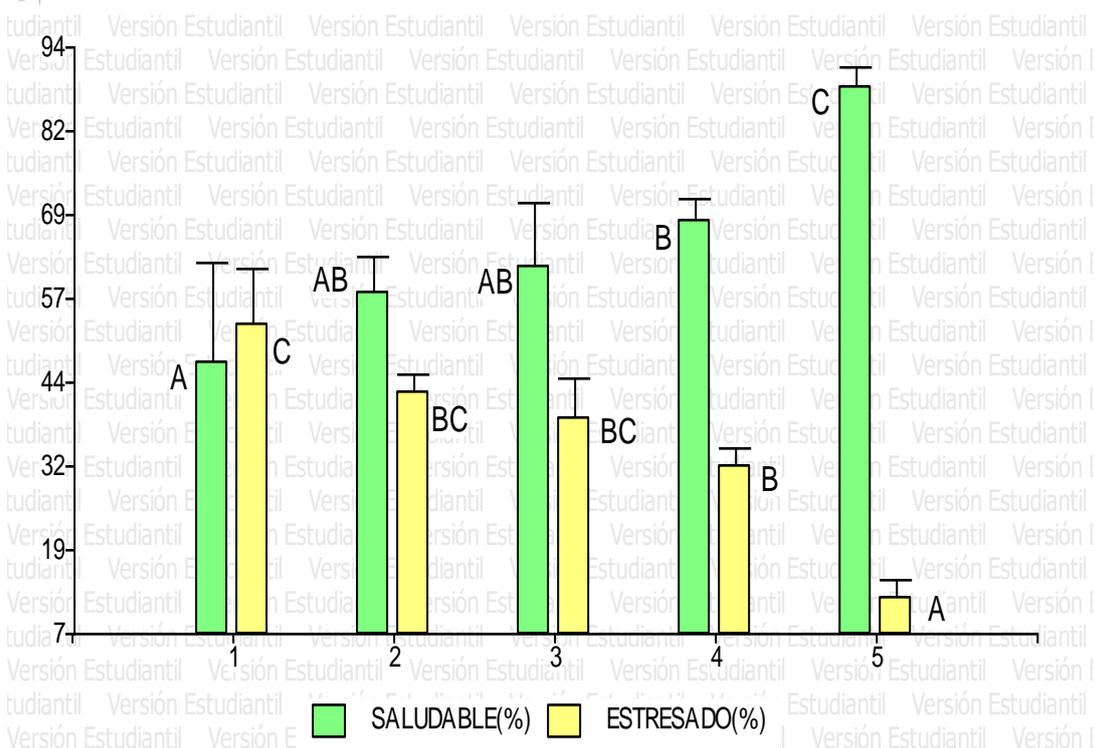
**Tabla 13:** Comparación de porcentajes de NDVI entre tratamientos.

Tratamientos		Dosis de riego (L/p)	NDVI			
			Saludable (%)		Estresado (%)	
1	Anegamiento	>0,52	47,22	A	52,78	C
2	25%	0,13	57,46	AB	42,54	BC
3	50%	0,26	61,25	AB	38,75	BC
4	75%	0,39	68,30	B	31,70	B
Testigo	100%	0,52	87,95	C	12,05	A

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

En los resultados del procesamiento de NDVI se determinó para el T1 el porcentaje más alto de pixeles estresados 52,78% principalmente, debido al estrés por anegamiento, las plantas pequeñas perecen con mayor facilidad perdiendo su actividad fotosintética en las hojas, pues se presentaron diferencias significativas ( $P=0,0022$ ) respecto al tratamiento control T5 que tuvo el porcentaje más bajo de pixeles estresados (12,05%).

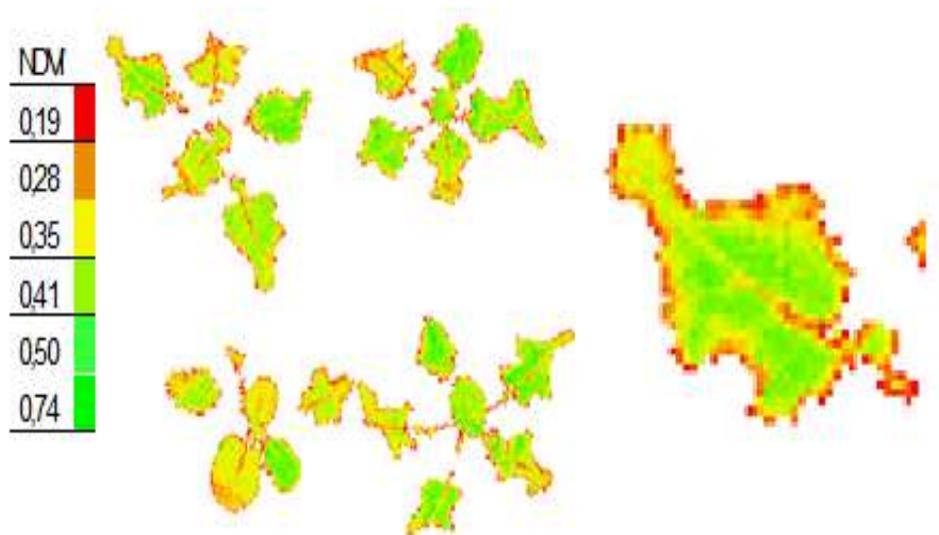
En cuanto a los demás tratamientos sus porcentajes de NDVI de pixeles estresados son para T4 (31,70%), T3 (38,75%) y T2 (42,54%) que corresponden a los tratamientos de déficit hídrico resultaron diferentes al Testigo (T5) (Ver. Figura 27).



**Figura 27:** Promedios de NDVI estresado y saludable para los tratamientos de la etapa de 45 DDT.

Con estos resultados se evidencia que el Testigo (T5) el cual fue regado con la dosis de agua de los 0,52 litros por planta en referencia del 100% de la CC, posee el porcentaje más alto de vegetación sana o pixeles saludables (87,95%) ( $P=0,0022$ ) y el Tratamiento de anegamiento (T1) el porcentaje más bajo de pixeles saludables (47,22%). Los T2 y T3 no son diferentes de los tratamientos uno y cuatro, pero si del testigo (T5).

Es oportuno recalcar el hecho de la intervención de los nervaduras de la hoja de brócoli en el análisis porque se evidenciaron valores bajos de NDVI en estas zonas, esta situación puede deberse a que las nervaduras así como sus extensiones participan activamente en la conducción y almacenamiento de sustancias (Zamora, 2010) limitando sus funciones.



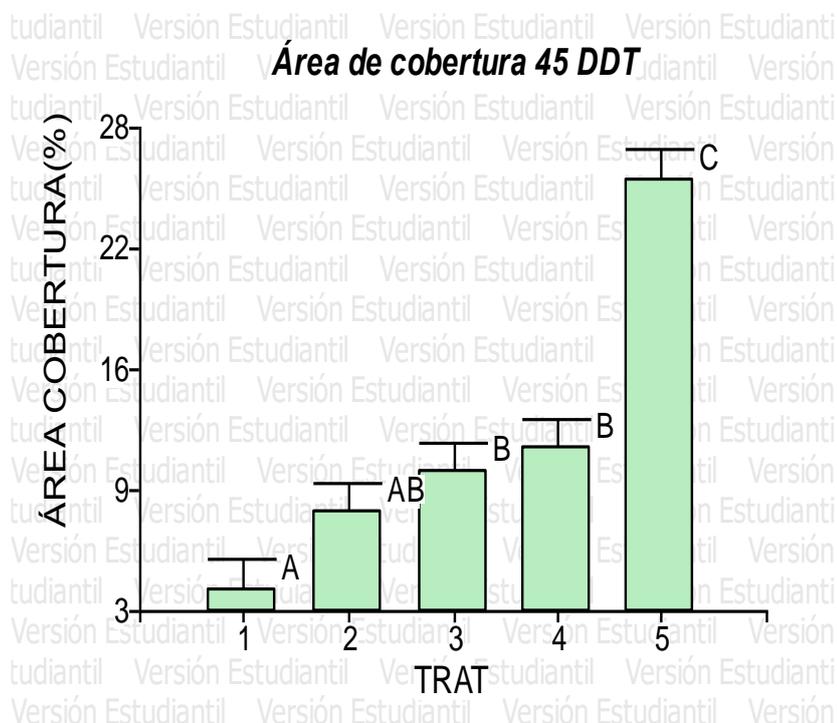
**Figura 28:** NDVI de un tratamiento de 45 DDT, zonas de colores verdes representan pixeles saludables.

Anteriormente se describió como se expresan diferentes niveles de estrés hídrico en el NDVI de las plantas y para complementar el análisis se determinó el área de cobertura de las plantas dentro de un marco de referencia de 1 m<sup>2</sup> a partir de las imágenes, se encontró diferencias significativas  $P < 0,0001$  entre tratamientos por lo cual se determinó para el anegamiento (T1) el porcentaje más bajo en referencia al área de cobertura (4,29%) como se muestra en la figura 29, este bajo valor nos permite afirmar que el estrés hídrico generado a etapas tempranas del cultivo de brócoli se comporta de manera severa provocando la disminución de su crecimiento y desarrollo.

El T3 (10,27%) y T4 (11,50%) tiene valores oscilantes entre sí, sin embargo, se presentan diferencias significativas entre los tratamientos antes mencionados frente al tratamiento Testigo (T5 25,28%). Según estos resultados y bajo las condiciones a las que estuvieron sometidas las plantas a los 45 DDT disminuyeron su crecimiento a esto se debe los bajos porcentajes de área de cobertura en comparación con el testigo



que resultó cubriendo hasta un cuarto del área de referencia (1 m<sup>2</sup>) como se visualiza en la tabla 14.



**Figura 29:** Área de cobertura para cada tratamiento, con su desviación estándar.

**Tabla 14:** Descripción del área de cobertura por tratamientos de plantas de 45DDT.

Tratamientos		Área de cobertura (%)	
1	Anegamiento	4,29	A
2	25% de CC	8,27	AB
3	50% de CC	10,27	B
4	75% de CC	11,50	B
5	Testigo	25,28	C

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



### 7.3 Evaluación del NDVI para el periodo de los 75 DDT.

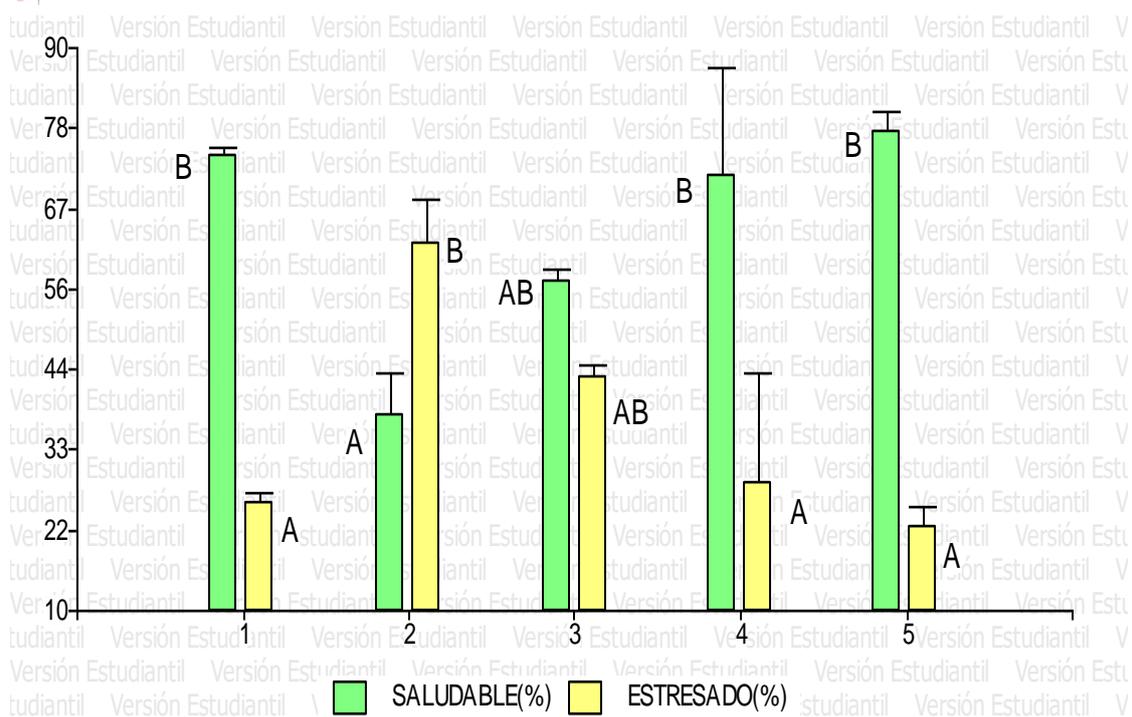
**Tabla 15:** Comparación de NDVI en porcentajes para los diferentes tratamientos.

Tratamientos		Dosis de riego (L/p)	NDVI			
			Saludable (%)		Estresado (%)	
1	Anegamiento	>0,52	74,45	B	25,55	A
2	25%	0,13	37,81	A	62,19	B
3	50%	0,26	56,90	AB	43,10	AB
4	75%	0,39	71,63	B	28,37	A
Testigo (5)	100%	0,52	77,92	B	22,08	A

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

En los resultados del NDVI para los 75 DDT se presentó diferencias significativas ( $P= 0,0204$ ) para el T2 al cual se le aplicó apenas 0,13 litros de agua por planta (25% en referencia a la CC), pues obtuvo el más alto porcentaje de pixeles estresados (62,19%) como se muestra en la figura 30.

T3 con un porcentaje de 43,10% de pixeles estresados, no fue diferente significativamente de los demás tratamientos principalmente porque resulto con un valor intermedio, sin embargo, los tratamientos 5, 4 y 1 con 22,08%, 28,37% y 25,55% de pixeles estresados respectivamente si presenta diferencias significativas  $P= 0,0204$  frente a T2.



**Figura 30:** NDVI estresado y saludable con desviaciones estándar.

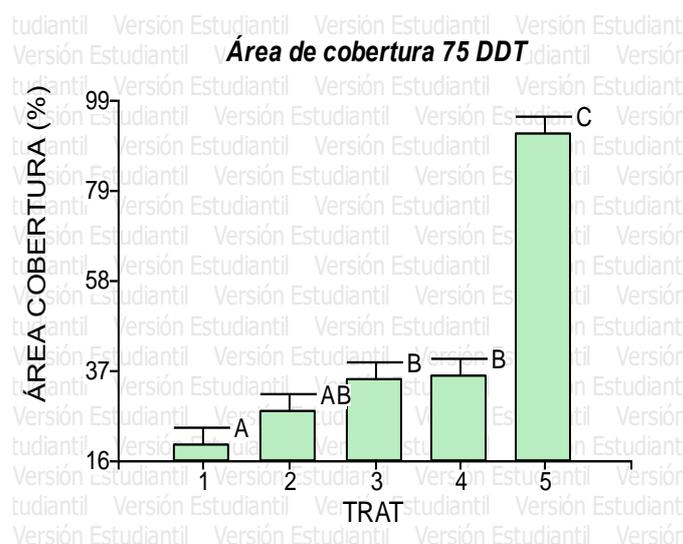
Estos resultados expresan que bajo estas condiciones el estrés hídrico más evidente fue por falta de agua, mas no por el exceso (anegamiento) pues no se encontró diferencias de los otros tratamientos con el testigo como se muestra en la tabla 15. Este suceso pudo deberse a que el estrés hídrico instantáneo en la etapa de los 75DDT no fue tan severo, pues las plantas al tener un tamaño considerable y el estrés al ser aplicado por 13 días no llevó a las plantas a su punto máximo de estrés.

Es decir, mediante el análisis espectral de las imágenes para los diferentes tratamientos los resultados del NDVI tuvieron valores altos, pues las plantas al no perder su funcionamiento en las hojas o llegar a un marchitamiento de las mismas continuaron con clorofila activa en ellas, acción que mediante el sensor Parrot Sequoia se pudo captar.



Mediante estos resultados se pudo determinar que en el caso de pixeles saludables el menor porcentaje se registró para T2 con 37,81%, siendo diferente significativamente ( $P=0,0204$ ) de los demás tratamientos a excepción del T3.

Como se ha descrito anteriormente los diferentes niveles de estrés hídrico en el NDVI de las plantas grandes y para complementar el análisis se determinó el área de cobertura de las plantas dentro de un marco de referencia de  $1\text{m}^2$  a partir de las imágenes, se encontró diferencias significativas en cuanto al área de cobertura de las plantas para la etapa de los 75 DDT. Para el T1 se determinó un área de cobertura del 20,11% este valor es el más bajo respecto a los tratamientos T2, T3 y T4 que tuvieron resultados de 27,80%, 35,19% y 35,99% respectivamente lo cual no permite encontrar diferencias significativas entre estos tres antes mencionados, sin embargo, todos estos tratamientos si son diferentes significativamente ( $P=0,0001$ ) del Testigo (T5) en el cual se obtiene una cobertura casi total del área de referencia (91,45%). Si bien los diferentes niveles de estrés no se evidenciaron en gran medida con el NDVI, si se visualizó la reducción en el desarrollo y crecimiento en los tratamientos.



**Figura 31:** Área de cobertura para los tratamientos de 75 DDT con sus desviaciones estándar.

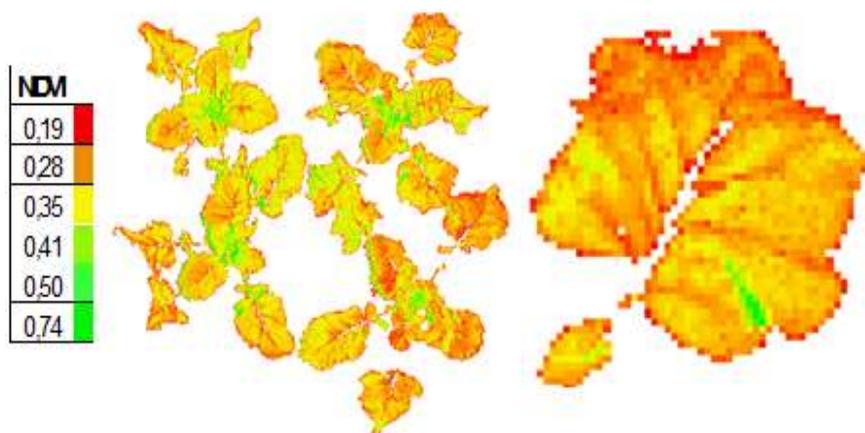


**Tabla 16:** Descripción del área de cobertura por tratamientos de plantas grandes.

Tratamientos		Área de cobertura (%)	
1	Anegamiento	20,11	A
2	25% de CC	27,80	AB
3	50% de CC	35,19	B
4	75% de CC	35,99	B
5	Testigo	91,45	C

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

En el caso de las plantas grandes, las nervaduras al estar más desarrolladas fueron eliminadas de la clasificación por el propio programa, al momento de encontrarse con valores muy bajos e incluso negativos fueron eliminados en todos los tratamientos, razón por la cual se visualizan agujeros en las hojas de las plantas grandes de brócoli (ver figura 32). Esta situación nos da una idea de la capacidad del sensor Parrot Sequia para identificar los diferentes elementos de la estructura de la hoja, al hacer las capturas a baja altura mejora la resolución espacial.



**Figura 32:**NDVI de T2 de la etapa de los 75 DDT, en donde se evidenció estrés (zonas < 0.35).



Las diferencias que se encontraron en cuanto a la reacción frente al estrés entre plantas de 45DDT y 75DDT fue muy evidente, se considera que las plantas pequeñas son más susceptibles a las situaciones de estrés independientemente del cual se trate, una de las razones que permite conocer esta variación podría ser el estado de desarrollo de la raíz, se conoce que las plantas grandes aprovechan de mejor manera la humedad por sus raíces grandes y profundas además de la gran cantidad de raicillas que conforman un gran volumen en la zona radical que aprovecha el riego con más eficiencia.



**Figura 33:** Raíces de planta grande (75 DDT) y pequeña de brócoli (45 DDT).

#### **7.4 Relación entre NDVI y respuestas fisiológicas.**

De los resultados de la clasificación entre pixeles saludables y estresados del NDVI de las imágenes se mostró diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos aplicados, con mayor notoriedad entre los tratamientos del periodo de los 45 DDT que en los 75 DDT. Se determinó que tipo de relación se presenta entre el NDVI y las respuestas fisiológicas como lo es conductancia estomática (CE) y el contenido relativo de agua (CRA) mediante correlaciones de Pearson con un p valor



de 0,05 además como adicional y complementario para la validación del NDVI con las variables antes mencionadas se estableció la relación con la humedad del suelo.

#### **7.4.1 Correlación entre NDVI y conductancia estomática (CE), plantas 45DDT.**

Se encontró una correlación entre los valores de NDVI de pixeles estresados con la conductancia estomática esta fue de  $R = -0,82$  ( $P=0,0002$ ) indicando que representa una relación negativa inversa, es decir que a mayor cantidad de pixeles estresados que se encontró en las imágenes de los diferentes tratamientos, menor fue el valor de la conductancia estomática, pues el hecho de que las hojas cierren sus estomas para evitar pérdidas masivas de agua en especial a medio día, provoca que los valores de conductancia estomática sean inferiores cuando hay situaciones de estrés, en especial si es hídrico.

Para el caso de los valores de NDVI para pixeles saludables se encontró una correlación significativa con  $P = 0,0002$  y de  $R= 0,82$  positivo, lo que se quiere decir es que a mayor cantidad de pixeles saludables encontrados en la imagen, mayor fue el valor de la conductancia estomática, esto se debe a que si las plantas están bajo condiciones óptimas de riego no presentan problemas al momento de transpirar el agua por sus estomas, si la planta tiene suficiente riego no se verá con el mismo nivel de estrés que las plantas que se ven limitadas a este recurso.

#### **7.4.2 Correlación entre NDVI y CRA, plantas 45DDT.**

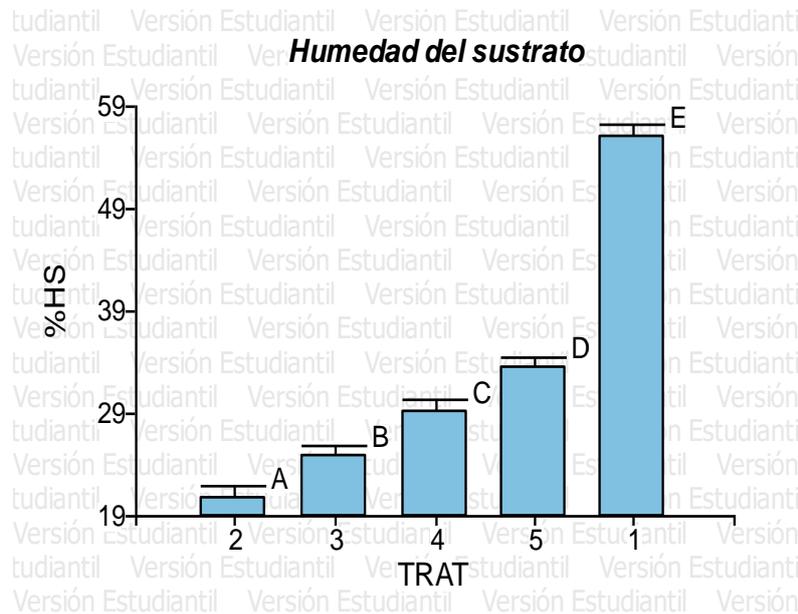
Para conocer como está relacionada esta variable con los pixeles saludables se estableció una correlación, en la cual se obtuvo un valor de  $R = 0,71$  lo que indica una



relación positiva y una significancia de  $P=0,0032$ , entonces el resultado de este experimento permite decir que al encontrar una mayor cantidad de pixeles saludables en las imágenes mayor fue el CRA. En el caso de los pixeles estresados presentaron un valor  $R = -0,71$  ( $P=0,0032$ ), lo que indica un comportamiento inverso es decir se encontró un menor valor del CRA frente a un mayor porcentaje de pixeles estresados.

### 7.4.3 Correlación entre NDVI y Humedad de sustrato 45 DDT.

Para demostrar las diferencias entre tratamientos en referencia a la humedad del sustrato registrada en la etapa de los 45 DDT se realizó un ANOVA en donde se encontró diferencias significativas ( $P<0,0001$ ) entre sí. En cuanto a la relación entre NDVI y humedad del sustrato, no se pudo encontrar una correlación ( $P=0,2492$ ).



**Figura 34:** Humedad del sustrato para los diferentes niveles de estrés (tratamientos).



## **7.5 Análisis de la etapa de los 75 DDT.**

### **7.5.1 Correlación entre NDVI y conductancia estomática, plantas 75DDT.**

La conductancia estomática resultó con un valor de correlación  $R = 0,45$  considerando que se trató de una correlación no significativa ( $P=0.0953$ ), entonces no se pudo establecer una correlación entre NDVI con CE, esto se debió principalmente porque en la etapa de los 75DDT las plantas no fueron gravemente afectadas por el estrés hídrico instantáneo, en este caso las plantas de los diferentes tratamientos tuvieron un comportamiento parecido como reacción, haciéndose difícil diferenciar efectos entre tratamientos.

### **7.5.2 Correlación entre NDVI con el CRA, plantas 75DDT.**

El CRA no se correlacionó con los valores NDVI de las imágenes multiespectrales pues se determinó un valor  $P=0,2008$  es decir, el CRA no demostró efecto en los tratamientos visualizados mediante el NDVI en la imagen, esto para las plantas de brócoli de la etapa de los 75 DDT.

### **7.5.3 NDVI y Humedad del sustrato 75 DDT.**

La humedad del sustrato fue registrada con diferencias significativas ( $P<0,0001$ ) entre tratamientos al igual que en el caso anterior (45 DDT) (Ver figura. 34) sin embargo, presentó una correlación significativa ( $R=0,56$ ) ( $P=0,0289$ ) con la humedad del sustrato, esta situación es resultado del poco efecto que se evidenció del estrés hídrico en plantas grandes de brócoli, pues si recordamos en la etapa de 45DDT en donde si fue evidente el estrés, no se estableció relación alguna con la humedad del sustrato. Lo que se hubiera esperado fue que, si el suelo estaba con la humedad necesaria este mantendría a la planta menos estresada sin embargo se debe tomar



en cuenta aspectos como la profundidad de la raíz, que es diferente en las dos etapas de cultivo (Ver Figura. 33) lo cual proveería a las plantas una ventaja en cuanto al aprovechamiento de la humedad en las partes más profundas de las fundas lo que se traduce en un menor efecto de los tratamientos.

**Tabla 17:** Correlaciones de Pearson ( $P < 0,05$ ) entre variables de NDVI, Conductancia Estomática y Contenido Relativo de Agua, en ambos periodos del desarrollo foliar del cultivo de brócoli.

Relaciones entre variables	45DDT		75DDT	
	R	P	R	P
NDVI(Pixeles saludables)- Conductancia estomática.	0,82	0,0002	0,45	0,0953
NDVI(Pixeles estresados)- Conductancia estomática.	-0,82	0,0002	-0,45	0,0953
NDVI(Pixeles saludables)- Contenido Relativo de Agua.	0,71	0,0032	0,35	0,2008
NDVI(Pixeles estresados)- Contenido Relativo de Agua.	-0,71	0,0032	-0,35	0,2008
NDVI- Humedad del sustrato	-0,32	0,2492	0,56	0,0289



## 7.6 Protocolo de uso del sensor Parrot Sequoia.

### 7.6.1 Descripción del equipo

La cámara multiespectral Parrot Sequoia, diseñada para el estudio de la vegetación en la agricultura de acuerdo con tres criterios principales: precisión sobresaliente, tamaño mínimo y facilidad de uso (Sequoia, 2019). Conformada por 4 sensores monocromáticos, verde (530 – 570 nm), rojo (640 – 680 nm), borde rojo (730 – 740 nm) e infrarrojo cercano (770 – 810 nm) estos sensores tienen la capacidad de captar longitudes de onda diferentes dentro del espectro electromagnético y el Sensor de brillo “Sunshine”, el cual capta la intensidad de la luz que irradia el sol en estas mismas 4 bandas espectrales. Estos sensores permiten obtener imágenes, con las cuales se puede hacer diversos análisis desde la obtención de ortofotos de grandes áreas, así como también el cálculo de índices de vegetación. Para ello son de gran utilidad las bandas que capta cada sensor monocromático. El sensor Sequoia puede ser adaptado en todo tipo de drones, aquellos con alas fijas y multirrotores (Sequoia, 2019).

El equipo está compuesto por ciertos elementos, los mismos que en conjunto conforman un sensor altamente especializado en la captura de imágenes multiespectrales. Es necesario hacer la revisión previa al uso del sensor puesto que cada elemento del mismo es vital para su correcto funcionamiento en campo.

### 7.6.2 Partes de equipo

**Cámara multiespectral:** elemento compuesto por cinco sensores RED, GREEN, NIR, REG y RGB.



**Figura 35:** Archivos de cada sensor de la cámara.

**Sensor de brillo:** reacciona ante la intensidad luminosa, a la cual se registra información por la cámara. Es esencial tener la precaución de ser muy meticuloso al momento de usar el equipo, pues estos elementos son sensibles al tacto, en especial el sensor de brillo y las lentes de la cámara, es preciso evitar el contacto en esas zonas.

Las dimensiones se visualizan en la figura 36, las cuales están representando al sensor de brillo y a la cámara multispectral. Con un peso de 72 gr. cámara y 35 gr. el sensor se considera como un equipo pequeño, el mismo es bien adaptado a diferentes drones. Identificación de los diferentes canales y el rango del espectro al cual registran información al momento de capturar las imágenes.



**Figura 36:** Dimensiones del equipo.

**Fuente:** tycgis.com

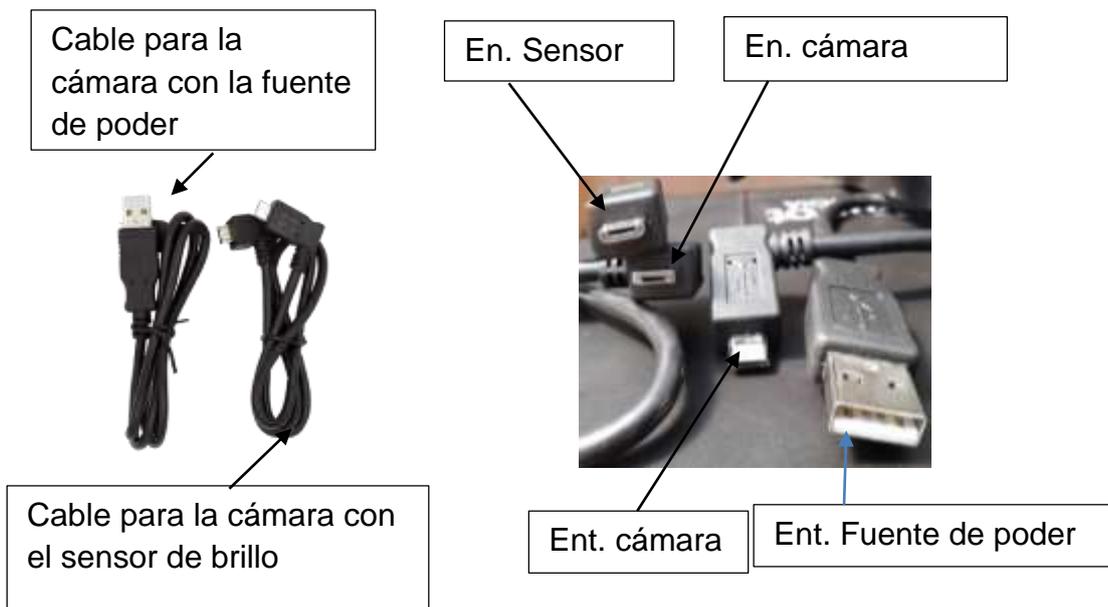


**Calibrador de color:** es un cuadro pequeño, cada calibrador mide 19x13,5 cm y es muy fácil de transportar, permite realizar la calibración radiométrica antes de realizar la captura de imágenes.



**Figura 37:** Calibrador de color.

**Cables de conexión USB:** esta sigla corresponde a Universal Serial Bus, son cordones compuestos por diferentes conductores, aislados entre ellos y permiten vincular diferentes elementos (Wikipedia 2020).



**Fuente de poder:** elemento que sirve como alimentador de energía para diversos equipos electrónicos, en este caso se utilizó como fuente de energía para la cámara. Para el sensor Parrot Sequoia se requiere un banco de batería de cinco voltios.



**Tarjeta de memoria:** es un elemento tipo SD (Secure Digital), es muy actualmente es utilizado en la mayoría de dispositivos, gracias a ella se puede liberar espacio en la memoria interna y almacenar todo tipo de archivos, estas tarjetas permiten una buena relación precio/espacio, además de ventajas como la fiabilidad, duración y comodidad (Wikipedia, 2020).

### 7.6.3 Instalación del equipo

Para poner en funcionamiento al sensor multiespectral Parrot Sequoia, es importante tener en cuenta la presencia de todos los elementos y entre ellos los cables que se convierten el conector principal para todo el equipo y a la vez permiten la comunicación entre el sensor-cámara y cámara-fuente de poder.

**Montaje del Equipo:** son dos cables, el primero que nos permite la conexión entre la cámara y en sensor de brillo, hay que tener en cuenta que la primera conexión que debe hacerse es: la cámara con el sensor de brillo, esto evitará y protegerá al equipo de sobrecargas de energía proveniente de conexiones erróneas. La segunda conexión es la cámara con la fuente de poder.

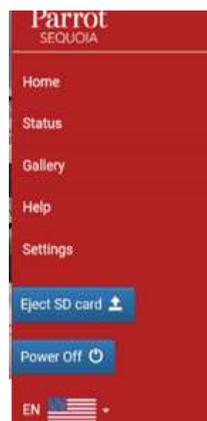
- Conectar el sensor multiespectral al sensor de luz solar utilizando el cable host USB.
- Conecte el sensor multiespectral a la batería usando el USB con el cable del dispositivo (Sequoia, 2019).



**Figura 38:** Montaje del sensor

**Encendido:** en el momento que se establezca la conexión entre la cámara con la fuente de poder, se encenderá automáticamente entonces se procede a conectar la cámara con un dispositivo (computador, celular, Tablet) que tenga la capacidad de enlazarse mediante una señal de wifi que procede de la cámara.

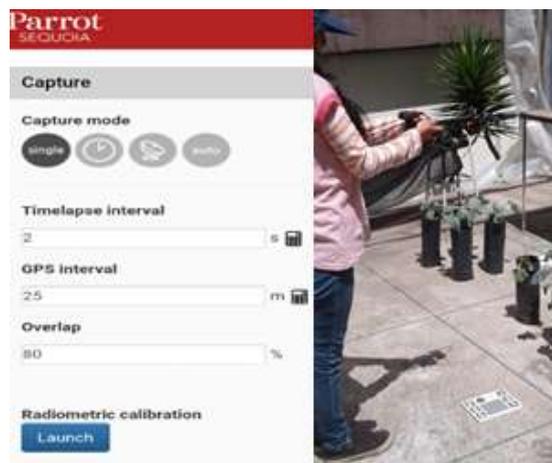
**Configuración:** en el dispositivo en mano se ingresa a la red wifi de la cámara según su nombre de usuario (Sequoia, 2019). Esta acción nos permite ingresar hacia la página de Parrot Sequoia, en donde se hace posible manejar la cámara desde dicho dispositivo. La interfaz de configuración de Sequoia consta de tres pantallas principales: home, status, gallery (sequoia, 2019).



**Figura 39:** Menú principal de Parrot Sequoia.



**Calibración:** antes de poner en uso el equipo Parrot Sequoia, es vital hacer la calibración esta actividad se realiza con el calibrador, basta con colocarla en el suelo y sostener el sensor sobre la misma y mandar a correr la calibración desde el dispositivo del cual se esté manejando la cámara. Es importante tener en cuenta que, si la calibración ya ha sido realizada y de repente se presenta una nubosidad espontanea, se debe realizar nuevamente la calibración bajo esas condiciones.



**Figura 40:** Programación de captura de imágenes y calibración (derecha).

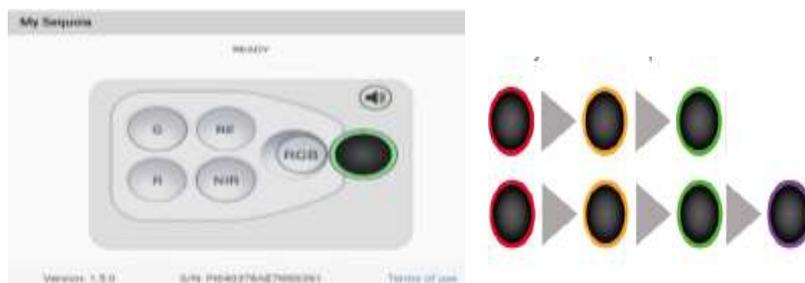
La cámara multispectral y el sensor de brillo poseen luces led que presentan diferentes colores según sea la necesidad que presente el equipo.



**Figura 41:** Luces en el equipo Parrot Sequoia.



Al momento del encendido esta se torna de color verde, cuando requiere calibración se pone color purpura, naranja cuando se apaga y rojo en caso de haber algún mal funcionamiento interno.



**Figura 42:** Tipos de luz, en el sensor.

**Fuente:** (Sequoia, 2019)

Cuando el equipo ha sido adaptado a la plataforma que se decida usar, este debe estar bien sujetado de no ser así se arriesga la cámara a infortunios en campo. Para sujetarla se pueden usar ligas, estas son de gran utilidad, elásticas, bajo costo y desechables.



**Figura 43:** Ajuste del equipo con ligas.



#### 7.6.4 Obtención de información

Una vez calibrada la cámara para capturar las imágenes se puede programar el intervalo de segundos para que registre las capturas. Antes de empezar a registrar información hay que asegurarse que el lugar en donde se guarde sea la tarjeta de memoria SD, de no ser el caso se guardará en la memoria interna, esto no es un problema simplemente que al momento de recuperar la información es más fácil hacerlo desde la tarjeta de memoria SD, pues si se realizara de la memoria interna se debería tener encendida la cámara para extraer la información de ella.



**Figura 44:** Opciones de almacenamiento.

**Visualización:** Para visualizar las fotografías capturadas se hace el ingreso en la galería, en ella nos dirigimos hacia la tarjeta de memoria y se desplegarán las carpetas que se hayan creado con las imágenes basta con elegir la correcta y nos permitirá verlas, también si se desea ver por canal como: RGB, NIR, RED y REG.

**Recuperación de información:** es suficiente con retirar la tarjeta del sensor de brillo y llevarla hacia un computador que nos permita extraer las fotografías, veremos que por cada captura se han registrado cinco archivos los mismos que corresponden a las bandas de la cámara, es necesario sacar todos estos archivos en conjunto para que en el posterior análisis no haya ausencia de información.



## 8. DISCUSIÓN

La relación entre los valores del NDVI del tratamiento testigo (T5) fue significativamente diferente al de los otros tratamientos, esto para la etapa de los 45 DDT, hecho que concuerda con lo obtenido por Shikha et al.,(2007) en donde evidencian diferencias significativas entre los valores del IV por la baja aplicación de agua y nitrógeno en plantas de 95 DDT al obtener valores bajos de NDVI en comparación con el control, suceso que también fue evidente en los resultados obtenidos de este experimento en donde fue posible evidenciar el estrés tanto por exceso y déficit hídrico.

Se determinó diferencias muy notables entre el tratamiento testigo y el anegamiento, debido a que las plantas de 45DDT evidenciaron un marchitamiento y posterior muerte de las hojas como indica Pardos, (2004) la carencia de oxígeno en la raíz provoca el descenso de la transpiración provocando el marchitamiento y senescencia precoz de las hojas. El cultivo de brócoli al igual que el cultivo de otras brasicáceas como la colza no tolera el anegamiento en etapas tempranas del cultivo (Gómez, Miralles, Mantese, Menéndez, & Rondanini, 2018). Este resultado reafirma que se debe evitar el estrés hídrico o excesos de humedad entre los 30 y 50 DDT pues es el momento en el que se desarrolla el mayor porcentaje de follaje (Martinez, Arguello, Forero, & Cardona, 2016).

Las diferencias entre niveles de estrés hídrico que se proporcionó en este experimento tuvieron influencia directa en el área de cobertura y los valores bajos de NDVI, pues el estrés hídrico provoca menor masa foliar y altura retrasando su desarrollo (Hossain & Mohona, 2018) al encontrar la disminución del crecimiento en



las plantas, situación que concuerda con los resultados obtenidos por Mamani et al., (2019) en donde afirman que los índices de vegetación se relacionaron más estrechamente con variables que involucran el desarrollo de las plantas como la altura, en plantas de arroz sometidas a estrés hídrico.

En el caso de las plantas de brócoli para el periodo de los 75 DDT se encontró únicamente la diferencia significativa del T2 frente a los demás tratamientos, si bien no se encontró más diferencias como en el caso de las plantas del periodo de 45 DDT, se determinó que las plantas al ser sometidas a un estrés hídrico instantáneo a los 75 DDT durante 13 días no expresaron un nivel elevado de estrés. Pues el efecto del estrés depende de la duración, el periodo en el que se presente y a la influencia otros factores; ambientales, fisiológicos como el estado de la raíz y/o cutícula (Tafolla, González, Tiznado, & Zacarías, 2013).

Bautista et al.,(2018) al igual que en este estudio, demostraron que mediante el análisis de imágenes multiespectrales se puede detectar el estrés en el cultivo de brócoli de doce semanas, si bien en este caso para la etapa de 75DDT no se evidenció efectos del estrés hídrico entre los tratamientos (T3 y T4) con el testigo incluido el anegamiento esto podría significar que en plantas grandes, el efecto de estrés es toma más tiempo en evidenciarse, pues ninguna planta superior puede sobrevivir más de unas horas, días o semanas sin acceso a oxígeno molecular (Pardos, 2004) sin embargo si se logró observar en un nivel severo (T2).

En cuanto a la relación que presentan los valores de NDVI con la conductancia estomática, se registró una correlación negativa fuerte es decir se encontró que los tratamientos con mayores niveles de estrés están relacionados con los menores



valores de conductancia estomática esto haciendo referencia a las plantas del periodo de los 45 DDT en las cuales el estrés fue más evidente, esto se confirma con el estudio realizado por Kałużewicz, Krzesiński, Spiżewski, & Zaworska, (2017) donde mencionan que bajo condiciones de estrés hídrico las plantas de brócoli reducen la CE con el objeto de tener un efecto ahorrador y de mejor eficiencia en el uso del agua disponible. Además Espinoza, Khot, Sankaran, & Jacoby, (2017) mediante sus estudios encontraron una relación similar entre conductancia estomática y un alto nivel de riego en el testigo para plantas de uva y esto a su vez reflejado en el NDVI, caso que concuerda con este estudio en el que se encontró la relación no solo por bajas cantidades de agua sino también por exceso.

La relación entre el CRA y los resultados del NDVI para la etapa de 45 DDT se vieron altamente correlacionadas, donde los valores altos de NDVI (pixeles saludables) aumentaban al igual que el CRA. Nuestros resultados se corroboran con el hecho de que en la región del infrarrojo medio, el contenido de agua de la hoja es el principal determinante de la reflectancia (Danson, Steven, Malthus, & Clark, 2007). En el caso de las plantas del periodo de los 75 DDT, en donde el estrés tuvo efectos poco evidentes no se obtuvo una correlación pues al no presentar diferencias se asumió que el CRA fue semejante en casi todos estos casos, evidenciándose en los resultados de NDVI. Un severo estrés hídrico podría no tener un impacto inmediato en el contenido de clorofila sin embargo podría afectar la reflectancia espectral de la hoja (Schlemmer, Francis, Shanahan, & Schepers, 2005).

En los resultados de este experimento se evidencia la relación entre el NDVI y el CRA, confirmando lo mencionado por Gilabert et al., (2010) en donde se dice que



independientemente del factor ya sea interno o externo que llegue a tener efectos en el contenido de sustancias y estructura interna de las hojas afectará su reflectancia, entre los factores principales están: edad, tensiones ambientales, minerales, etc. Echo que podría explicar la influencia de la edad en el efecto de los tratamientos en plantas grandes de brócoli.

Peñuelas, Filella, Biel, Serrano, & Savé, (2007) mencionan que los efectos del CRA en las hojas es más evidente si el estrés está en un estado avanzado, pues tiene un comportamiento paralelo a la disminución de la elasticidad de la pared celular. Esto explica por qué no se encontró una correlación con plantas grandes y si en plantas pequeñas (45DDT) en las cuales se evidenció el estrés hídrico. Demostrándose la utilidad del análisis espectral en relación con este parámetro porque es útil como indicador del estado del agua, especialmente cuando no hay cambios importantes de LAI y cuando las plantas cubren completamente el suelo.

## **9. CONCLUSIONES**

El análisis de imágenes multiespectrales captadas con el sensor Parrot Sequoia mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, si permitió detectar el estrés hídrico en plantas de brócoli en los dos periodos estudiados, tanto para los 45 y 75 días después del trasplante, con mayor impacto en plantas pequeñas que en las grandes, esta situación pudo deberse a fuertes influencias medioambientales, micro ambientales de la planta, el estado de desarrollo de la raíz y otras propiedades fisiológicas.

Las variables fisiológicas si permitieron encontrar correlación con el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, pues el contenido relativo de agua y la



conductancia estomática mostraron fuertes correlaciones con el NDVI, validando los resultados espectrales de las imágenes que se analizaron, parámetro apreciado por el sensor Parrot Sequoia. La humedad del sustrato no presentó correlación con el NDVI de las plantas pequeñas, en el caso de plantas grandes pudo verse con una leve relación sin embargo esto se debió a otras propiedades de las plantas.

Con el registro de la información secundaria y práctica de campo se elaboró el protocolo de uso para el sensor Parrot Sequoia el mismo que tiene como fin ser un elemento de utilidad para futuros investigadores de la temática.

## **10.RECOMENDACIONES**

Realizar estudios en áreas grandes y a campo abierto en donde se puede aprovechar de mejor manera el potencial del sensor multiespectral Parrot Sequoia, para captar más rápido y de mejor manera las imágenes del cultivo sin exponer demasiado tiempo el equipo.

Considerar el efecto de otras variables fisiológicas de las plantas y cómo estas influyen en el estrés que revela una imagen multiespectral.



## 11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alocén, J. (2007). *Manual práctico para el diseño de sistemas de minirriego*. Honduras.  
Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-at787s.pdf>
- Andrade, B., & Moncayo, L. (2017). *Análisis de NDVI contrastando diferentes metodologías de toma de datos espectrales, en cultivos de pastos en etapa previa al pastoreo*. Universidad de las Fuerzas Armadas.
- Antognelli, S. (2020). índices de vegetación ndvi y ndmi: instrucciones de uso. boletín informativo. recuperado de: [www.agricolus.com](http://www.agricolus.com) 10/05/2020.
- Argentel, L., González, L., Ávila, C., & Aguilera, R. (2006). Comportamiento del Contenido Relativo de Agua y la Concentración de Pigmentos Fotosintéticos de Variedades de Trigo cultivadas en condiciones de salinidad. *Redalyc.Org*.  
Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=1932/193215825008>
- Assamann, J., Kerby, J., Cunliffe, A., & Smith, I. (2018). Vegetation monitoring using multispectral sensors – best practices and lessons learned from high latitudes. *NRC Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 1–51. <https://doi.org/10.1139/juvs-2018-0018>
- Ayme, J. (2016). *Evaluación de la eficacia del fertilizante orgánico cistefol en el rendimiento del cultivo de Brassica oleracea L., var. Avenger (brócoli)*. Retrieved from <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/5418>
- Ballari, D., Acosta, E., Espinoza, Á., Orellana, D., Morocho, V., Martín, M., & Hardter, T. (2015). Análisis de imágenes UAV de las Islas Galápagos. *Reevista*



GEOESPACIAL, 13. Retrieved from  
[https://www.researchgate.net/publication/299283440\\_Analisis\\_de\\_imagenes\\_UAV\\_de\\_las\\_Islas\\_Galapagos](https://www.researchgate.net/publication/299283440_Analisis_de_imagenes_UAV_de_las_Islas_Galapagos)

Bastidas, M. (2015). *Importancia de la producción y exportación de brócoli de la provincia de cotopaxi: estrategias de comercialización hacia los mercados no tradicionales años 2010 - 2014*. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.90.4.644>

Bautista, R., Constante, P., Gordon, A., & Mendoza, D. (2018). Diseño e implementación de un sistema de visión artificial para análisis de datos NDVI en imágenes espectrales de cultivos de brócoli obtenidos mediante una aeronave pilotada remotamente Design and implementation of an artificial vision system for NDVI da. *Revista Infociencia*, 12(Figura 1), 30–35.

Bayat, B., van der Tol, C., Yang, P., & Verhoef, W. (2019). Extending the SCOPE model to combine optical reflectance and soil moisture observations for remote sensing of ecosystem functioning under water stress conditions. *Remote Sensing of Environment*, 221(November 2018), 286–301. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.021>

Berrío, V., Mosquera, J., & Alzate, D. (2015). Uso de drones para el analisis de imágenes multiespectrales en agricultura de precisión. *@LIMENTECH CIENCIA Y Tecnología Alimentaria*, (1), 28–40. <https://doi.org/https://doi.org/10.24054/16927125.v1.n1.2015.1647>

Cornejo, E., & Benavides, A. (2002). Ecofisiología y bioquímica del estrés en plantas. *ResearchGate*, (July). Retrieved from



<https://www.researchgate.net/publication/305346608>

Cosmo, R. (2015). Ciclo vegetativo del brócoli. Retrieved from [www.google.com](http://www.google.com)

Danson, F., Steven, M., Malthus, T., & Clark, J. (2007). International Journal of Remote Sensing High-spectral resolution data for determining leaf water content. *Remote Sensing*, (April 2013), 37–41.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1080/01431169208904049>

Díaz, J. (2015). Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión. *Universidad Complutense de Madrid*, 78. Retrieved from [http://eprints.ucm.es/31423/1/TFM\\_Juan\\_Diaz\\_Cervignon.pdf](http://eprints.ucm.es/31423/1/TFM_Juan_Diaz_Cervignon.pdf)

Echevarria, N. (2010). *Evaluación del interés del Índice Vegetativo Diferencial Normalizado (NDVI) para la definición de Unidades de Manejo Diferenciado del Viñedo en la Rioja Alavesa*. Universidad Pública de Navarra.

Erazo, A., & Sevilla, H. (2019). Estudio multiespectral del cultivo de tuna para determinar SENTINEL 2A , en el cantón Guano , provincia de Chimborazo , Ecuador, 55–66. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.29019/enfoque.v10n3.453>

ESPAC. (2018). Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua. Retrieved from [http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas\\_agropecuarias/espac/espac-2018/Presentacion de principales resultados.pdf](http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac-2018/Presentacion_de_principales_resultados.pdf)

Espinoza, C., Khot, R., Sankaran, S., & Jacoby, P. (2017). High Resolution Multispectral and Thermal Remote Sensing-Based Water Stress Assessment in



Subsurface Irrigated Grapevines. *Remote Sensing*, 9,961.

<https://doi.org/10.3390/rs9090961>

FAO. (2006). Evapotranspiración del cultivo. In *Evapotranspiración del cultivo, Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. (pp. 161–165). Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-x0490s.pdf>

Gilabert, M., González, P., & Martínez, B. (2010). *Theory and applications of vegetation indices* (Vol. 661). Kerala.

Godoy, L., & Luna, G. (2019). *Análisis y caracterización espectral del chocho (lupinus mutabilis sweet) por los efectos de tratamientos de desinfección de semilla*. Universidad de las Fuerzas Armadas.

Gómez, N., Miralles, D., Mantese, A., Menéndez, Y., & Rondanini, D. (2018, March). Rapeseed : a crop with history in the fauba. *Revista de La Facultad de Agronomía UBA*, 38(1), 23–36. Retrieved from [https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/97773/CONICET\\_Digital\\_Nro.1b86a9fe-087c-48c1-8116-e614af8de2f5\\_D.pdf?sequence=5&isAllowed=y](https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/97773/CONICET_Digital_Nro.1b86a9fe-087c-48c1-8116-e614af8de2f5_D.pdf?sequence=5&isAllowed=y)

Granados, F. (2013). *Uso de Vehículos Aéreos no tripulados ( UAV ) para la evaluación de la producción agraria*. Retrieved from [http://www.ias.csic.es/wp-content/uploads/2019/01/Ambienta\\_2013\\_105\\_40\\_52.pdf](http://www.ias.csic.es/wp-content/uploads/2019/01/Ambienta_2013_105_40_52.pdf)

Han, L., Yang, G., Dai, H., Xu, B., Yang, H., Feng, H., ... Yang, X. (2019). Modeling maize above-ground biomass based on machine learning approaches using UAV remote-sensing data. *Plant Methods*, 15(1), 1–19. <https://doi.org/10.1186/s13007-019-0394-z>



Hernández, S. (2017). *Metodología para discriminación de malezas basada en la respuesta espectral de la vegetación*. Universidad Nacional de Colombia.

Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/57544/>

Hossain, M., & Mohona, M. (2018). Shoot-root traits of broccoli ( *Brassica oleracea* var . *italica* L .) as influenced by different irrigation schedules. *International Journal of Horticultural Science and Technology*, 5(1), 11–18.

<https://doi.org/10.22059/ijhst.2018.256331.235>

Jiménez, E. (2016). *Trabajo de diploma*. Universidad central “ Marta Abreu” de las Villas. Retrieved from

[http://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/6355/Ernesto Jiménez.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/6355/Ernesto%20Jim%C3%A9nez.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Jones, G., Serraj, R., Loveys, B., Xiong, L., Wheaton, A., & Price, A. (2009). Thermal infrared imaging of crop canopies for the remote diagnosis and quantification of plant responses to water stress in the field. *Functional Plant Biology*, 978–989.

<https://doi.org/10.1071/FP09123>

Kalischuk, M., Paret, M., Freeman, J., Raj, D., Dasilva, S., Wiggins, D., ... Das, J. (2019). An improved crop scouting technique incorporating UAV-assisted multi-spectral crop imaging into conventional scouting practice for gummy stem blight in watermelon. <https://doi.org/https://doi.org/10.1094/PDIS-08-18-1373-RE>

Kałużewicz, A., Krzesiński, W., Spizewski, T., & Zaworska, A. (2017). Effect of Biostimulants on Several Physiological Characteristics and Chlorophyll Content in Broccoli under Drought Stress and Re-watering. *Notulae Botanicae Horti*



- Kharuf, S., Hernández, L., Orozco, R., Aday, O., & Mora, I. (2018). Análisis de imágenes multiespectrales adquiridas con vehículos aéreos no tripulados. *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, XXXIX, 79–91. Retrieved from <http://rielac.cujae.edu.cu/index.php/rieac/article/view/669/336>
- Krizaj, C. (2014). La producción de brócoli (*Brassica oleraceae* L.) como biofábricas en condiciones de ambientes de estrés. *Facultad de Ciencias Agrarias-Universidad Nacional Del Litoral*, 1–11.
- Kumazaki, A., & Suzuki, N. (2019). Enhanced tolerance to a combination of heat stress and drought in *Arabidopsis* plants deficient in ICS1 is associated with modulation of photosynthetic reaction center proteins. *Physiologia Plantarum*, 165(2), 232–246. <https://doi.org/10.1111/ppl.12809>
- Lara, E. (2017). *Clasificación y cuantificación de maleza en cultivos de hortalizas por medio de procesamiento de imágenes digitales multiespectrales*. Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/62315/>
- López, A., Crende, P., & Castelao, A. (2005). Uso del tdr en ensayos de movimiento de agua sobre columnas de suelo inalterado, VII(1969), 95–100. Retrieved from [http://www.zonanosaturada.com/zns05/publications\\_files/area\\_1/18.pdf](http://www.zonanosaturada.com/zns05/publications_files/area_1/18.pdf)
- MAG. (2017). MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA. Retrieved from <http://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/sipa-estadisticas/sipa-estadisticas-productivas>



- Mamani, J., Ramos, L., Ontiveros, R., Bustamante, W., & Porras, Z. (2019). Relación de la altura de planta del cultivo de arroz bajo estrés hídrico con índices de vegetación obtenidas de imágenes de dron. *COMEII-19043*. Retrieved from <http://www.comeii.com/comeii2019/docs/ponencias/extenso/COMEII-19043.pdf>
- Martinez, A., Arguello, O., Forero, C., & Cardona, C. (2016). *Modelo tecnológico para el cultivo de brócoli en el departamento de Antioquia Brassica olerácea L . var . Itálica Ingeniera Agropecuaria*. Colombia. <https://doi.org/10.21930/978-958-740-212-4>
- Martínez, M., Moreno, D., & Carvajal, M. (2013). The physiological importance of glucosinolates on plant response to abiotic stress in Brassica. *International Journal of Molecular Sciences*, 14(6), 11607–11625. <https://doi.org/10.3390/ijms140611607>
- Martínez, R. (2017). *Trabajo de diploma*. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Retrieved from [http://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/7971/Rolando Yunior Martínez Valdés.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/7971/Rolando%20Yunior%20Martínez%20Valdés.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Mayorga, D., Roldan, M., & Uvidia, M. (2019). Uso del índice normalizado de vegetación para la elaboración de planos de cultivo. *Opuntia Brava*, 11, 261–265. <https://doi.org/https://doi.org/10.35195/ob.v11i2.760>
- Milas, A., Sousa, J., Warner, T., Teodoro, C., Peres, E., Gonçalves, J., ... Woodget, A. (2018). Unmanned Aerial Systems ( UAS ) for environmental applications special issue preface. *International Journal of Remote Sensing*, 39(15–16), 4845–



4851. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1491518>

Mora, M., & Cañarte, D. (2017). *Departamento de ciencias de la tierra y la construcción*. Retrieved from <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/13713>

Niño, J., & Rodríguez, A. (2017, August). Determinación de la colorimetría de agroquímicos aplicados al cultivo de frijol , para el control fitosanitario a través de agricultura de precisión , en la finca Buena Vista del municipio de Cabrera , Cundinamarca. *Revista Tecnología Y Productividad*, 3, 9–19. <https://doi.org/https://doi.org/10.23850/24632465.1551>

Olaya, V. (2014). Procesado de Imágenes. In *Sistemas de Información Geográfica* (p. 445). Retrieved from <http://www.osgeo.org/journal>

Pardos, J. (2004). *Respuestas de las plantas al anegamiento del suelo Factores edáficos y climáticos*. Retrieved from [http://www.inia.es/gcontrec/pub/101-107-\(05\)-Respuestas\\_1162210193281.pdf](http://www.inia.es/gcontrec/pub/101-107-(05)-Respuestas_1162210193281.pdf)

Peñuelas, J., Filella, I., Biel, C., Serrano, L., & Savé, R. (2007). The reflectance at the 950 – 970 nm region as an indicator of plant water status. *International Journal of Remote Sensing*, (August 2013), 37–41. <https://doi.org/10.1080/01431169308954010>

Planas, S. (2019). Agricultura de precisión y protección de cultivos. *Revista de Ingeniería 47 Agricultura e Ingeniería, Cultivando Futuro*, 47, 10–19. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.16924%2Friua.v0i47.985>

PROECUADOR. (2018). Boletín Mensual de Inteligencia de Mercados. Retrieved from <https://www.proecuador.gob.ec/estudios-de-inteligencia-comercial/>



Risco, D., Gutiérrez, A., Val, J., León, J., Díaz, A., Benalcázar, P., & Prieto, H. (2018).

Programación de riego en brócoli (*Brassica oleracea* L. cv. *italica*) en los Andes ecuatorianos. *IDESIA (Chile)*, 36, 57–63.

Rodríguez, A., & Guevara, D. (2017). Comportamiento De La Conductancia

Estomática De Dos Variedades De Tomate Cubanas En Condiciones De Campo

Y Riego Limitado. *Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas*, 38(2), 137–144.

Retrieved from <http://scielo.sld.cu/pdf/ctr/v38n2/ctr200217.pdf>

Rodríguez, J. (2017). *Índices de vegetación a partir de datos obtenidos mediante*

*sistemas VANT*. UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA. Retrieved

from <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/20.500.11962/20670>

Schimmelpfennig, D., & Ebel, R. (2016). Sequential adoption and cost savings from

precision agriculture. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 41(1), 97–

115. Retrieved from [https://tind-customer-agecon.s3.amazonaws.com/3ec83bf1-](https://tind-customer-agecon.s3.amazonaws.com/3ec83bf1-147c-4141-9c14-d505e151f5ac?response-content-disposition=inline%3Bfilename%2A%3DUTF-8%27%27JARE_January2016__6_Schimmelpfennig_pp97-115.pdf&response-content-type=application%2Fpdf&AWSAccessKeyId=AKIA)

[147c-4141-9c14-d505e151f5ac?response-content-disposition=inline%3B](https://tind-customer-agecon.s3.amazonaws.com/3ec83bf1-147c-4141-9c14-d505e151f5ac?response-content-disposition=inline%3Bfilename%2A%3DUTF-8%27%27JARE_January2016__6_Schimmelpfennig_pp97-115.pdf&response-content-type=application%2Fpdf&AWSAccessKeyId=AKIA)

[filename%2A%3DUTF-](https://tind-customer-agecon.s3.amazonaws.com/3ec83bf1-147c-4141-9c14-d505e151f5ac?response-content-disposition=inline%3Bfilename%2A%3DUTF-8%27%27JARE_January2016__6_Schimmelpfennig_pp97-115.pdf&response-content-type=application%2Fpdf&AWSAccessKeyId=AKIA)

[8%27%27JARE\\_January2016\\_\\_6\\_Schimmelpfennig\\_pp97-115.pdf&response-](https://tind-customer-agecon.s3.amazonaws.com/3ec83bf1-147c-4141-9c14-d505e151f5ac?response-content-disposition=inline%3Bfilename%2A%3DUTF-8%27%27JARE_January2016__6_Schimmelpfennig_pp97-115.pdf&response-content-type=application%2Fpdf&AWSAccessKeyId=AKIA)

[content-type=application%2Fpdf&AWSAccessKeyId=AKIA](https://tind-customer-agecon.s3.amazonaws.com/3ec83bf1-147c-4141-9c14-d505e151f5ac?response-content-disposition=inline%3Bfilename%2A%3DUTF-8%27%27JARE_January2016__6_Schimmelpfennig_pp97-115.pdf&response-content-type=application%2Fpdf&AWSAccessKeyId=AKIA)

Schlemmer, M., Francis, D., Shanahan, J., & Schepers, J. (2005). Remotely Measuring

Chlorophyll Content in Corn Leaves with Differing Nitrogen Levels and Relative

Water Content. *Agronomy Journal*, 112(May 2004), 106–112.

[https://doi.org/10.2134 / agronj2005.0106](https://doi.org/10.2134/agronj2005.0106)

Sequoia, P. (2019). Parrot Sequoia. Retrieved from



<https://www.parrot.com/soluciones-business/profesional/parrot-sequoia>

- Shikha, D., Waller, P., Hunsaker, D., Clarke, T., & Barnes, E. (2007). Ground-based remote sensing for assessing water and nitrogen status of broccoli. *Agricultural Water Management*, 92(3), 183–193. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.05.020>
- Soca, L. (2017). *Detección de Roya Naranja y Roya Parda en la caña de azúcar mediante imágenes multiespectrales*. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Retrieved from <http://dspace.uclv.edu.cu:8089/handle/123456789/7901>
- Suárez, L., Fonseca, A., Fernandez, R., Infante, S., Castro, L., García, B., ... Arias, M. (2015). Efecto de la salinidad sobre el contenido relativo de agua y la concentración de pigmentos en tres genotipos de frijol ( *Phaseolus vulgaris* L .). *Centro Agrícola*, 42(3), 19–24.
- Tafolla, J., González, A., Tiznado, M., & Zacarías, L. (2013). Composición , fisiología y biosíntesis de la cutícula en plantas composition , physiology and biosynthesis of plant cuticle. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36(1), 3–12. Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-73802013000100001&lng=es&tlng=en](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802013000100001&lng=es&tlng=en).
- Tong, X., Mu, Y., Zhang, J., Meng, P., & Li, J. (2019). Water stress controls on carbon flux and water use efficiency in a warm-temperate mixed plantation. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.014>
- Ubidia, M. (2014). “ *Evaluación de la eficacia de fertilizantes de liberación controlada (crf) en el cultivo de brócoli ( Brassica oleracea var. Itálica)*. Universidad Técnica de Ambato.



Vila, H. (2011). *Regulación de la hidratación y la turgencia foliares por mecanismos evitadores del estrés, y resistencia a déficit hídrico en vid. Modelo vs. experimentos.* Retrieved from [http://m.bdigital.uncu.edu.ar/objetos\\_digitales/4367/vila-regulacionhidratacion.pdf](http://m.bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/4367/vila-regulacionhidratacion.pdf)

Zamora, P. (2010). *Anatomía de la hoja.* Retrived from: <https://es.calameo.com/books/0051302536608fcc030c0>



## 12. ANEXOS

**Anexo 1:** Plantas de 45DDT (izquierda) y de 75 DDT (derecha).



**Anexo 2:** Fertilización, Tratamiento1 anegamiento, muestras de sustrato para CC.





**Anexo 3:** Registro de datos de Conductancia estomática, Contenido relativo de agua y humedad de suelo.



**Anexo 4:** muestras de sustrato intervenidas con el método gravimétrico para la calibración de humedad.



**Anexo 5:** Tabla de valores de NDVI obtenidos por tratamiento para las dos etapas evaluadas.

TRAT	45-DIAS		75-DIAS	
	% DE NDVI			
	SALUDABLE	ESTRESADO	SALUDABLE	ESTRESADO
1	46,72	53,28	76,21	23,79
1	33,05	66,95	74,97	25,03
1	61,90	38,10	72,17	27,83
2	53,88	46,12	27,88	72,12
2	62,73	37,27	48,70	51,30
2	55,76	44,24	36,86	63,14
3	50,49	49,51	55,56	44,44
3	62,51	37,49	60,27	39,73
3	70,74	29,26	54,88	45,12
4	71,56	28,44	89,81	10,19
4	63,10	36,90	84,11	15,89
4	70,24	29,76	40,98	59,02
5	91,09	8,91	81,89	18,11
5	82,45	17,55	79,50	20,50
5	90,30	9,70	72,36	27,64



**Anexo 6:** Informe de laboratorio de pruebas de CC y PMP del sustrato.

## **INFORME DE ENSAYOS DEL PROMAS**

**Laboratorio:** Hidrofísica de Suelos PROMAS

**Dirección:** Av 12 de abril y Loja PROMAS Universidad de Cuenca

**Informe N°:**1      **Fecha:** diciembre 2019

**Cliente:** TESISISTA

**Dirección del cliente:** FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

**Ensayos solicitados:** Densidad Aparente, Curva pF

**Responsable del Muestreo:** Cliente

**Análisis realizados:** Densidad Aparente, Curva pF

### **Descripción de Métodos:**

Densidad: Método del Cilindro con volumen conocido (Kopecky)

Curva pF: Multistep, Aparato de Membrana a Presión

### **Responsables de los ensayos y cargos:**

Ing. Pedro Cisneros,                      Jefe de Laboratorio

Ing. Oscar Morales,                      Encargado de Laboratorio

**Declaratoria:** Los resultados emitidos en el presente informe corresponden únicamente a las muestras analizadas en **el Laboratorio del PROMAS.**

### **Resultados:**

#### **1. Densidad Aparente**

Para la determinación de densidad aparente en el sitio de estudio, se tomó la muestra del sustrato preparado (75% tierra, 25% bocashi) y se la llenó en el anillo de Kopecky.



En el Cuadro I, se indica los valores obtenidos para los suelos analizados:

Cuadro I. Densidad Aparente para muestras de suelo provenientes de los sitios de monitoreo implementados.

Sitio	Repetición	D. Aparente g/cc
TESIS	1	0.90
	2	0.79

## 2. Curva pF

Con el propósito de obtener la curva de retención de agua en el suelo (pF) para los diferentes suelos en estudio, se ha utilizado en laboratorio el método denominado Multistep (para el rango de presiones bajas) y el Aparato de Membrana a presión (para el rango de presiones altas). Los datos de puntos de retención obtenidos en laboratorio sirven de insumo para el programa SHYPFIT (Soil Hydraulic Properties Fitting) el cual usa los modelos de Van Genuchten y Mualem para la descripción de la curva de Retención de Agua en el suelo y de Conductividad Hidráulica relativa.

En el Cuadro II se presenta un resumen de los parámetros del modelo de van Genuchten para la obtención de la curva de retención de agua en el suelo; así como también los puntos de retención de agua y curvas pF resultantes para cada suelo analizado:

Cuadro II.- Parámetros del Modelo de Van Genuchten obtenidos con el programa Shypfit para la obtención de curvas de retención de agua en las muestras del sustrato.



---

Sitio	Horizonte	Muestra	$\Theta_s$	$\Theta_r$	$\alpha$	n	m
			cc/cc	cc/cc	1/cm		
TESIS	1	1-2	0.5320	0.0000	0.0167	1.1645	0.1413

---

Tabla 18. Puntos de Retención TESIS

---

$pF$	Hum. Volumétrica (cc/cc)	
	Muestra 1	Muestra 2
0	0.508	0.544
1.48	0.506	0.529
1.78	0.482	0.484
2.01	0.448	0.443
3.48	0.292	0.292
4.17	0.205	0.205

---

Figura 1. Curva de retención de agua en el suelo sitio TESIS

