

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHIHUAHUA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

***“ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS
TÉRMICAS EN PLANTAS DE LECHUGA COMÚN
(LACTUCA SATIVA)”***

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

***MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA***

PRESENTA:

FRANCISCO ERASMO PÉREZ HERMOSILLO

**DIRECTOR DE LA TESIS:
*DR. LUIS FRANCISCO CORRAL MARTÍNEZ***

CHIHUAHUA, CHIH., AGOSTO 2020



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO





Chihuahua, Chih. 18 de agosto de 2020

**C. FRANCISCO ERASMO PÉREZ HERMOSILLO
PRESENTE**

Por este conducto le comunico que a propuesta del Jurado de Examen, la División de Estudios de Posgrado e Investigación ha concedido autorización para la impresión de su tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica, cuyo título es:

"Estudio de las características térmicas en plantas de lechuga común (Lactuca Sativa)"

La tesis presenta el siguiente contenido de capítulos:

- I Introducción
- II Fundamento teórico
- III Pruebas de termografía pulsada
- IV Procesamiento y análisis de información
- V Resultados y análisis de resultados
- VI Conclusiones y trabajo futuro

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica®
"La técnica por el Engrandecimiento de México"*

**MTRO. ROGELIO ENRIQUE BARAY ARANA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**





Chihuahua, Chih. 18 de agosto de 2020

MTRO. ROGELIO ENRIQUE BARAY ARANA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
PRESENTE

Por medio de la presente notificamos a usted que en cumplimiento de los requerimientos para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica, el documento de tesis del **C. FRANCISCO ERASMO PÉREZ HERMOSILLO**, ha sido aprobado y aceptado para su impresión. El título de la tesis es:

"Estudio de las características térmicas en plantas de lechuga común (Lactuca Sativa)"

Por lo que proponemos, le sea concedida la autorización de impresión correspondiente.

Agradeciendo la atención a la presente, quedamos de usted:

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
"La Técnica por el Engrandecimiento de México"



DR. LUIS FRANCISCO CORRAL MARTÍNEZ
DIRECTOR DE TESIS

DR. GERARDO TRUJILLO SCHIAFFINO
MIEMBRO DEL JURADO DE EXAMEN

DRA. DIDIA PATRICIA SALAS PEIMBERT
MIEMBRO DEL JURADO DE EXAMEN

DR. JAVIER VEGA PINEDA
MIEMBRO DEL JURADO DE EXAMEN





CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la ciudad de Chihuahua el día 18 de agosto de 2020, el que suscribe C. FRANCISCO ERASMO PÉREZ HERMOSILLO de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, con número de control G17061500, adscrito a la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Chihuahua, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Luis Francisco Corral Martínez y cede los derechos del trabajo titulado "Estudio de las características térmicas en plantas de lechuga común (Lactuca Sativa), al Tecnológico Nacional de México y/o Instituto Tecnológico de Chihuahua para su difusión, divulgación, transmisión, reproducción, así como su digitalización con fines académicos y de investigación.

FRANCISCO PÉREZ

C. FRANCISCO ERASMO PÉREZ HERMOSILLO





DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

En la ciudad de Chihuahua el día 18 de agosto de 2020, el que suscribe C. FRANCISCO ERASMO PÉREZ HERMOSILLO de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, con número de control G17061500, adscrito a la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Chihuahua, manifiesta que es autor intelectual de la tesis titulada "Estudio de las características térmicas en plantas de lechuga común (Lactuca Sativa)" bajo la dirección del Dr. Luis Francisco Corral Martínez; que el contenido es original y que las fuentes de información consultadas para su fundamentación están debidamente citadas y referenciadas.

FRANCISCO PÉREZ

C. FRANCISCO ERASMO PÉREZ HERMOSILLO



Chihuahua, Chih., A 26 de agosto del 2020

Dra. María Elena Álvarez-Buylla

Directora de CONACYT

Presente. –

Le saludo cordialmente por este medio y deseo informarle que he concluido la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica en la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Chihuahua, obteniendo el grado de Maestro en Ciencias. Agradezco al CONACYT y a usted como su representante por el apoyo otorgado durante este proceso, lo cual me permitió dedicarme de tiempo completo para lograr este objetivo.

Reitero mi agradecimiento y sin más por el momento queda de usted un servidor.

Atentamente

Francisco Erasmo Pérez Hermosillo
Exbecario de CONACYT No. 845381

c.c.p. M.C. Rogelio Enrique Baray Arana
Jefe de la División de Estudios de Posgrado e Investigación

AGRADECIMIENTOS

El trabajo de tesis realizado es una combinación de esfuerzo, en el cual, participaron personas con sus ideas, opiniones, correcciones, ánimos y sobre todo que permanecieron a mi lado en momentos difíciles.

En primer lugar, agradezco a mi director de tesis, Dr. Luis Francisco Corral Martínez por confiar en mi en este proyecto. Por el valioso conocimiento que aportó en el proyecto, su liderazgo, tiempo y su apoyo para dirigir el trabajo, muchas gracias.

De igual manera, agradezco a mis compañeros y miembros del comité por los consejos que me dieron durante el desarrollo de la tesis. De igual manera, agradezco a los colaboradores del departamento de investigación por su facilidad al realizar los tramites y siempre estar pendiente de los procesos necesarios para culminar el proyecto.

Por último, agradezco a mi familia por estar conmigo en todo momento y tener paciencia en los momentos más difícil. A mi papá, por siempre ser una inspiración, a mi mamá por siempre creer en mi y mi hermano estar pendiente de mi y mi trabajo. A mi pareja, un agradecimiento por sufrir conmigo los momentos difíciles y festejar en los momentos de felicidad.

RESUMEN

ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS EN PLANTAS DE LECHUGA COMÚN (LACTUCA SATIVA)

Ing. Francisco Erasmo Pérez Hermosillo
Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica
División de Estudios de Posgrado e Investigación
Instituto Tecnológico de Chihuahua
Chihuahua, Chih., 2020.
Director de Tesis: Dr. Luis Francisco Corral Martínez

En los últimos años se ha incrementado la demanda de alimentos, lo que ha llevado a la sobreexplotación del suelo agrícola. La necesidad recae en alimentar a más de 8,000 millones de personas. Los cultivos de hoy en día deben tener una eficiencia y calidad mayor. Algunas soluciones han sido administrar adecuadamente los nutrientes, evitando la deficiencia en las plantas.

El objetivo de este proyecto fue desarrollar un estudio que permita relacionar el comportamiento térmico de las plantas cultivadas por medios hidropónicos con sus características nutricionales. La hipótesis fue que, el suministro controlado de nutrientes durante la etapa de crecimiento de plantas cultivadas en un ambiente de hidroponía afecta la respuesta térmica de estas plantas permitiendo conocer sus diferencias.

Para realizar el estudio se utilizaron técnicas de termografía activa aplicadas a un lote de lechugas *great lakes*, las cuales fueron cultivadas en un sistema de hidroponía de cama flotante con un control de nutrientes suministrados (potasio y azufre más magnesio) en distintas concentraciones. Además, se cultivó un lote de lechugas con nutrientes balanceados. Las pruebas consistieron en dar un impulso de calor a las plantas y tomar imágenes térmicas del proceso de enfriamiento. Después se analizaron los datos obtenidos mediante los métodos de reconstrucción de señales térmicas y termografía de fase pulsada.

Los resultados indican que la deficiencia de potasio afecta la absorción y retención de la temperatura de las lechugas, ya que alcanzaron temperaturas superiores al resto de éstas. Los dos métodos arrojaron resultados similares.

ABSTRACT

STUDY OF THERMAL CHARACTERISTICS IN PLANTS OF LETTUCE (LACTUCA SATIVA)

In past years there has been an increment in the demand of food, which has led to the overexploitation of agricultural lands. This is due to the necessity of having to feed more than 8,000 billion people. The crops that are being grown today should be of better quality, as well as more efficient in carrying the required nutrients. A solution to this has been to adequately administer the nutrients and avoid nutrition deficiency in plants.

The purpose of this project was to develop a study that would show the relationship between the thermal behavior of plants grown by hydroponic techniques and their nutritional characteristics. The hypothesis was that the controlled supply of nutrients during the growth stage of plants grown in a hydroponic environment affects the thermal response, allowing us to know their differences.

To perform the study, active thermography techniques were applied to a batch of Great Lakes lettuce. Which were cultivated in a floating hydroponics garden that included a control in the supplied nutrients. Those nutrients being potassium, sulfur, and magnesium. In addition, a batch of lettuce with a balanced amount of same nutrients, was also grown. The experiment consisted in giving a heat impulse to all the plants and taking thermal images of the cooling process. Afterwards, the data obtained was analyzed using thermal signal reconstruction and pulsed phase thermography.

The results indicated that a potassium deficiency affected the absorption and retention of the lettuce temperatures making them reach a higher temperature, as compared to those that were administered a balanced amount of nutrients.

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABLAS.....	xii
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	6
2.1 Plantas.....	6
2.1.1 Nutrientes de las plantas	6
2.1.2 Diagnóstico de nutrientes.....	8
2.1.2.1 Diagnóstico visual.....	8
2.1.2.2 Análisis de plantas.....	9
2.1.2.3 Análisis cuantitativo.....	9
2.1.2.4 Prueba de tejido	9
2.1.2.5 Pruebas bioquímicas	10
2.1.2.6 Prueba del suelo	11
2.1.3 Temperatura de las hojas	11
2.1.4 Nutrientes relacionados con la temperatura.....	12
2.2 Hidroponía.....	12
2.3 Termografía infrarroja	14
2.3.1 Radiación del cuerpo negro	14
2.3.1.1 Ley de Planck	15
2.3.1.2 Ley de desplazamiento de Wien.....	15
2.3.1.3 Coeficiente de emisividad	16
2.3.2 Infrarrojo	17
2.3.3 Cámara térmica	17
2.3.4 Clasificación de la termografía	18
2.3.4.1 Termografía pulsada.....	19
2.3.4.2 Termografía modulada.....	20
2.3.4.3 Termografía de fase pulsada.....	21
CAPÍTULO III. PRUEBAS DE TERMOGRAFÍA PULSADA	23
3.1 Arreglo experimental.....	23

3.2 Pruebas de termografía.....	26
3.3 Pruebas de termografía a muestras vegetales	30
3.3.1 Sistema de hidroponía y soluciones nutritivas	31
3.3.2 Siembra de lechugas	33
3.3.3 Conductividad.....	35
3.3.4 Pruebas de termografía a lechugas	36
CAPÍTULO IV. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN	38
4.1 Preprocesamiento de datos en MATLAB®	38
4.2 Reconstrucción de señales térmicas	41
4.3 Termografía de fase pulsada (PPT)	43
CAPÍTULO V. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	46
5.1 Resultados.....	46
5.2 Análisis de resultados	50
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	52
6.1 Conclusiones.....	52
6.2 Recomendaciones y trabajo futuro	53
REFERENCIAS	55
ANEXOS	61
Anexo A. Código de MATLAB® del preprocesamiento de datos.....	61
Anexo B. Código de los métodos de análisis	64
Anexo C. Temperatura promedio de las plantas	65

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO II. FUNDAMENTO TEÓRICO

Figura 2.1. Partes de hoja.	10
Figura 2.2. Cultivo hidropónico con ambiente controlado.	13
Figura 2.3. Radiación infrarroja emitida por la parte superior del cuerpo humano mapeada en una imagen.	14
Figura 2.4. Espectro de emisión de cuerpos a diferentes temperaturas.	16
Figura 2.5. Elementos que se utilizan en termografía pulsada.	20
Figura 2.6. Sistema típico de la termografía modulada.	21

CAPÍTULO III. PRUEBAS DE TERMOGRAFÍA PULSADA

Figura 3.1. Arreglo experimental de termografía pulsada.	24
Figura 3.2. Curva de emisión de la fuente seleccionada.	25
Figura 3.3. Programa de LabVIEW® para controlar el impulso térmico.	26
Figura 3.4. Dimensiones de los objetos propuestos.	27
Figura 3.5. Arreglo experimental utilizado en las pruebas de termografía.	27
Figura 3.6. Gráfica de la evolución de temperatura de un objeto en dos zonas distintas.	29
Figura 3.7. Gráfica del comportamiento de dos materiales distintos ya linealizadas las ecuaciones.	30
Figura 3.8. Gráfica con los coeficientes de los cuatro materiales.	30
Figura 3.9. Inicio del sistema de hidroponía.	34
Figura 3.10. Sistema de hidroponía 15 días después del trasplante de las lechugas de variedad romana.	35
Figura 3.11. Arreglo experimental que se utilizó para las pruebas a muestras vegetales.	36

CAPÍTULO IV. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Figura 4.1. Diagrama de flujo del preprocesamiento de datos.	39
Figura 4.2. Gráfica de las temperaturas de la planta que se forma con la función <i>surf</i>	40
Figura 4.3. Imagen de referencia.	40
Figura 4.4. Proceso con el cual se seleccionan las temperaturas de la planta.	41

Figura 4.5. Comparativa de dos respuestas térmicas distintas ante el mismo impulso.	42
Figura 4.6. Reconstrucción de las señales sin ruido	43
Figura 4.7. Curvas obtenidas por el análisis de termografía de fase pulsada.	44
Figura 4.8. Comparativa de respuestas térmicas.	45

CAPÍTULO V. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Figura 5.1. Sistema de hidroponía con 15 días de trasplante.	46
Figura 5.2. Comparativa entre la temperatura del peciolo y el resto de la hoja.	47
Figura 5.3. Comparativa de la respuesta al análisis por PPT.	48
Figura 5.4. Selección automática de la hoja.	49
Figura 5.5. Reconstrucción de señales.....	50
Figura 5.6. Respuesta de la fase de los resultados por PPT.	50

LISTA DE TABLAS

CAPÍTULO III. PRUEBAS DE TERMOGRAFÍA PULSADA

Tabla 3.1. Aportación de macronutrientes por cada compuesto químico.	32
Tabla 3.2. Contenido nutricional de las distintas soluciones que se realizaron.....	33
Tabla 3.3. Distribución de las plantas en las soluciones nutritivas.	34
Tabla 3.4. Conductividad de las soluciones nutritivas.	36

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

La agricultura afronta retos importantes y difíciles en la actualidad, las aplicaciones más comunes son: usos alimentarios, medicinales, forestales, industriales y ornamentales. Según la aplicación, las plantas cultivadas tienen distintos estándares de calidad, diferentes ambientes (ya sea en invernaderos o campos de cultivo), distintas técnicas de cultivo, entre otros factores que afectan las condiciones de las plantas. En el aspecto ambiental, cada planta debe tener condiciones específicas según su tipo; las principales variables que se manipulan o se deben considerar son: la temperatura, porcentaje de humedad y cantidad de radiación.

En los últimos años, se ha incrementado la necesidad de plantas gracias a que la producción de comida ha aumentado significativamente. Sin embargo, no ha sido suficiente para acabar con el hambre alrededor del mundo, ya que se debe de alimentar a más de 8,000 millones de personas. Lo que provoca un aumento no sólo en cultivos, sino también en la necesidad de agua, energías y cría de animales [1], [2].

Gracias al aumento de las necesidades, la agricultura enfrenta grandes retos que requieren mejoras en las técnicas de cultivo. No sólo en el sector de seguridad alimentaria, sino también en la identificación de eficiente y adecuada materia prima para biocombustible. Por ejemplo, solamente los cereales deben de tener un crecimiento del 70 % antes del 2050. Entre la necesidad de comida y de materia prima para biocombustibles se provocará una alta demanda de suelos cultivables [3].

Holly J. Butler [4] define la seguridad alimentaria como proveer un suministro constante de nutrición para todos, con el fin de vivir con un estilo de vida saludable sin importar las circunstancias sociales, económicas y físicas. La creciente población ha provocado una mayor demanda de comida con calidad, lo que provoca también una exigencia en fertilizantes más eficientes.

Todo lo anterior ha provocado que el reto de cultivar plantas sea cada vez mayor. La gran demanda, la calidad, poco tiempo, espacios reducidos, necesidad de suelos fértiles y el cambio climático; son algunos de los retos hoy en día.

Algunas soluciones han ido en un adecuado suministro de nutrientes. Estos son elementos químicos necesarios durante todo el ciclo de vida de las plantas. Para que un elemento sea llamado nutriente tiene que ser irremplazable y estar presente en todas las plantas. Actualmente existen diecisiete nutrientes, algunos llegan a las plantas por medio del aire o el agua y otros tantos llegan por medio del suelo ingresando por la raíz [5].

Para la detección de nutrientes existen técnicas básicas y complejas que permiten garantizar un adecuado crecimiento de las plantas, que comenzaron en los primeros años del siglo XIX en Europa donde se demostró que la mayoría de los nutrientes (minerales) se absorben del suelo y no del aire como se pensaba. A partir de esa época se comenzó a analizar la materia de las plantas.

Existen técnicas como el diagnóstico visual, utilizado por profesionales para identificar el estado de la planta por medio de alteraciones en la apariencia de ésta. También existe el análisis de la planta, ya sea por pruebas de tejido o pruebas bioquímicas. Estas pruebas proporcionan el estado nutricional de las plantas, aunque la prueba bioquímica no da información de concentraciones, sólo de suficiencia. Así mismo, está la prueba del suelo, la cual es una medición física o química de la cantidad de nutrientes contenidos, sin embargo, sólo muestra la disponibilidad y no la cantidad absorbida por las plantas.

La tecnología ha permitido desarrollar instrumentos para la detección de nutrientes y para el control de ambientes específicos, tal es el caso de los invernaderos inteligentes donde se utilizan sensores de humedad, radiación y temperatura. Se han elaborado recubrimientos que no permiten el escape del calor interno y se cuenta con diversos softwares que ayuda al control de los invernaderos, ya sea estadísticamente o con una interfaz para los usuarios; sin olvidar la elaboración de sistemas de riego automatizados.

Hay avances importantes en la tecnología de técnicas de cultivos, entre los que destaca la hidroponía; la cual es el cultivo de plantas sin suelo. Esta técnica ayuda a tener una mejor producción, con cosechas de mayor calidad gracias a que permite un uso eficiente de agua y fertilizantes. Los rendimientos por unidad de área cultivada son muy altos comparado con los del cultivo tradicional [6], [7]. La hidroponía permite tener un ambiente controlado, ya que se

puede manipular la temperatura, humedad, riego, radiación y nutrientes. Los orígenes de esta técnica no son conocidos exactamente, pero se cree que empezó hace más de dos mil años en la antigua Babilonia, en los Jardines Colgantes. Así mismo, existen referencias sobre la hidroponía en la antigua China, India, Egipto y en la cultura Maya.

Para lograr tener un ambiente controlado en cultivos hidropónicos, los instrumentos desarrollados permiten detectar las variables involucradas dentro de los invernaderos. Para controlar la temperatura, existen distintos sensores que proporcionan información del ambiente o técnicas que ayudan a conocer la temperatura directamente en las plantas. Una de éstas es la termografía.

La termografía es una técnica no destructiva y sin contacto que recaba información de radiación infrarroja emitida por la superficie de los cuerpos, convirtiéndola en una aproximación de la temperatura de éstos. La radiación infrarroja es un ancho rango del espectro electromagnético justo después de la luz visible. Este espectro está compuesto de ondas con características específicas como su longitud de onda y frecuencia. La parte infrarroja está dentro del rango de 700 nm hasta 1 mm de longitudes de onda. La termografía sin embargo, no capta todo el espectro, sino sólo un rango específico (ya sea de 3-5 μm o de 8-15 μm) dependiendo de las especificaciones de la cámara utilizada [8], [9].

La radiación que emiten los cuerpos es captada por una cámara térmica, la cual contiene instrumentos ópticos, detectores y una unidad de procesamiento de datos que acondiciona la señal. La mayoría de las cámaras actuales tienen microbolómetros como detectores térmicos.

La termografía ha sido utilizada en distintas investigaciones en agricultura por ejemplo: para determinar la fisiología de las plantas, la programación de riego, predecir rendimientos de cultivos, obtener un panorama general de la temperatura, evaluar la madurez de la planta, detectar magulladuras o firmeza de los frutos y vegetales [10].

Existen dos clasificaciones dentro de la termografía: la termografía pasiva recaba la radiación directamente de los objetos y la termografía activa que requiere una fuente externa, ya sea de calor o de enfriamiento, para estimular el objeto bajo prueba.

Dentro de la termografía activa se encuentra un derivado llamado termografía pulsada, el cual consiste en calentar o enfriar el objeto durante un pulso corto de energía y monitorear la evolución de la temperatura del objeto [11].

Las fuentes de excitación comunes son las pistolas de calor, aire caliente, una bolsa de agua caliente y fuentes térmicas ópticas las cuales pueden ser lámparas cinematográficas, lámparas infrarrojas, destellos de fotografías y luz láser.

El objetivo de este proyecto fue desarrollar un estudio que permita relacionar las características nutricionales de las plantas cultivadas por medios hidropónicos con su respuesta térmica mediante el empleo de técnicas termográficas. Se buscó reducir el tiempo al tomar las pruebas y no destruir el suelo, sólo alterar la temperatura y eliminar la necesidad de un experto.

Entre los objetivos secundarios se encuentran: analizar y seleccionar la técnica de termografía más adecuada para el estudio, seleccionar y cultivar plantas con deficiencias de nutrientes específicos y plantas con nutrientes balanceados, realizar pruebas de termografía a las plantas y relacionar las respuestas térmicas con nutrientes particulares.

La hipótesis inicial era que, al haber una deficiencia de ciertos nutrientes en la solución nutritiva administrada a un cultivo hidropónico, se afecta la respuesta térmica de las plantas. Al aplicar termografía pulsada a plantas con deficiencia de nutrientes específicos y a plantas nutridas correctamente, se esperaba que la evolución de la temperatura fuera distinta en cada caso y así poder obtener información sobre el estado nutricional de las plantas con deficiencia.

Para realizar el proyecto se seleccionó la especie *Lactuca Sativa* de dos variedades: Romana o Larga y Great Lakes. Estas plantas fueron cultivadas en un sistema de hidroponía de cama flotante. Se seleccionaron cuatro combinaciones con cinco macronutrientes para su estudio: fósforo, calcio, potasio y una combinación de azufre más magnesio. Fueron creadas dos concentraciones para cada combinación y una más con una solución balanceada.

Este documento cuenta con seis capítulos que describen el trabajo realizado. El orden de los siguientes capítulos y el contenido de estos es de la siguiente manera:

- Capítulo 2. Fundamento teórico: se describe la teoría que sustenta el trabajo de investigación y se presentan los conceptos para comprender el trabajo realizado.
- Capítulo 3. Pruebas de termografía pulsada: se describen las pruebas realizadas a muestras vegetales, se presenta el arreglo experimental y el cultivo realizado para lograr estas pruebas.
- Capítulo 4. Procesamiento de datos: son mostradas las dos técnicas de termografía de análisis utilizadas: termografía de fase pulsada y reconstrucción de señales. También se incluye el procesamiento realizado en MATLAB®.
- Capítulo 5. Resultados: contiene los resultados generados con los dos métodos utilizados y un análisis de los mismos.
- Capítulo 6. Conclusiones y trabajo futuro: se concluye el trabajo realizado con base en los resultados obtenidos. Además, se plantean recomendaciones para posibles trabajos futuros.

CAPÍTULO II. FUNDAMENTO TEÓRICO

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos y conceptos necesarios para comprender el trabajo de una manera más concisa. Se describe qué son los nutrientes, el tipo de cultivo utilizado, la técnica de termografía utilizada y cómo analizar los datos obtenidos.

2.1 Plantas

La Real Academia Española define el término planta como “Ser vivo autótrofo y fotosintético, cuyas células poseen pared compuesta principalmente de celulosa y carecen de capacidad locomotora”. En otras palabras, son seres vivos que se alimentan de materia inorgánica convirtiéndola en materia orgánica gracias a la energía del sol. Este proceso se llama fotosíntesis.

Mediante la fotosíntesis, las plantas aprovechan la energía del sol, el agua y el dióxido de carbono para generar glucosa y oxígeno. También es por la fotosíntesis que se absorbe el oxígeno, carbono e hidrógeno. Este proceso ayuda a las plantas a mantenerse sanas, a su crecimiento, desarrollo, reproducción y capacidad para adaptarse a las condiciones ambientales [12].

2.1.1 Nutrientes de las plantas

Los nutrientes son elementos químicos esenciales para el crecimiento y reproducción de las plantas. Para que un elemento químico sea considerado como un nutriente, debe cumplir una serie de criterios. El primero de ellos es que el elemento considerado como nutriente debe ser requerido para completar el ciclo de vida de las plantas, el segundo es que ningún otro elemento debe sustituirlo por completo y el tercero establece que todas las plantas requieren este elemento. Sin embargo, no siempre se cumple el último criterio [5].

Actualmente existen diecisiete elementos que cumplen con los criterios de aceptación. El carbono, hidrógeno y oxígeno son obtenidos del aire o agua, mientras que los otros catorce son ingresados a la planta a través del suelo o mediante soluciones nutritivas [13]. Estos elementos

se dividen en dos grupos, los que son requeridos en cantidades considerables (nitrógeno, potasio, calcio, fósforo, magnesio y azufre) son llamados macronutrientes, y los que son utilizados en pequeñas cantidades (cloro, hierro, boro, manganeso, zinc, cobre, níquel y molibdeno) se llaman micronutrientes.

La aparición de los síntomas por deficiencias depende de la tasa de translocación de los nutrientes desde los tejidos de mayor edad hacia los nuevos tejidos. Los nutrientes varían su movilidad en las plantas, existiendo dos clasificaciones: nutrientes móviles y nutrientes inmóviles.

El proceso de translocar consiste en que los nutrientes son llevados de un tejido de la planta a otro. Los nutrientes móviles son aquellos que tienen translocación de viejos tejidos hacia los nuevos; por lo que, cuando hay deficiencia de nutrientes, los síntomas se observan en las hojas de mayor edad. Los nutrientes incluidos son nitrógeno, fósforo, potasio y magnesio. En cambio, los nutrientes inmóviles no son capaces de translocarse. Cuando existe deficiencia en estos nutrientes (calcio, azufre, hierro, manganeso, zinc, cobre y molibdeno), los síntomas aparecen en los tejidos nuevos [14].

Como se mencionó anteriormente, existen muchos factores que son variables en los ecosistemas naturales y, por lo tanto, en la agricultura. Sin embargo, la mayor limitación para el crecimiento de las plantas son los nutrientes, en especial la forma en que se encuentran y la cantidad apropiada. La alta demanda de los macronutrientes provoca que representen entre el 0.2% y el 4% del peso de la planta en forma deshidratada. Mientras que los micronutrientes, representan menos del 0.01% del peso en deshidratación [15].

La falta de los macronutrientes fósforo (P), nitrógeno (N) y potasio (K) son las mayores limitantes para el desarrollo óptimo de las plantas. Por ejemplo, P y N son componentes cruciales del ADN (ácido desoxirribonucleico) y ARN (ácido ribonucleico), ya que sólo el nitrógeno proporciona el 16% de las proteínas totales. Diferente a los elementos anteriores, K no forma parte del metabolismo de la planta; no obstante, está presente en un rango de 1-3% del tejido seco. Además, K tiene un papel importante en la regulación del agua interna de las plantas, y las alteraciones en las concentraciones de este elemento pueden provocar altas o

bajas temperaturas, enfermedades, pestes o sequías.

Dado que la cantidad de los macronutrientes son muy importantes en los procesos biológicos, los efectos negativos de la deficiencia o con rangos fuera de lo óptimo ha sido caso de estudio durante mucho tiempo. Los cultivos pueden tener pérdidas entre 10 y 15% por la falta de P, ya que no es igual la demanda durante todo su crecimiento. Por ejemplo, la relación de absorción por unidad de longitud de la raíz es diez veces mayor en una planta de veinte días de edad que en otra de treinta días.

El suelo fértil no sólo depende de la cantidad y la calidad de los nutrientes presentes, sino también de sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Es decir, aunque haya una cantidad suficiente de nutrientes en el suelo, si no se encuentran en la forma correcta en la que la planta pueda hacer los procesos biológicos y absorberlos, no se considera un suelo fértil.

2.1.2 Diagnóstico de nutrientes

Existen distintas técnicas para lograr un panorama general o específico de los nutrientes de las plantas y, hoy en día, se continúa con el estudio para lograr mejorarlas. Las más destacadas son: el diagnóstico visual, análisis de la planta, pruebas bioquímicas y pruebas del suelo.

2.1.2.1 Diagnóstico visual

Esta técnica se basa en las habilidades, conocimientos y experiencia con la que cuenta un experto. Consiste en observar cuidadosamente la planta y detectar anomalías, ya que la deficiencia de nutrientes puede resultar en un metabolismo alterado y provocar que haya un enlace entre el elemento faltante y la apariencia de la planta.

El diagnóstico visual no sólo es utilizado para detectar deficiencias de nutrientes, sino también para determinar otros motivos por los cuáles las plantas son anormales. Algunos de éstos son:

- Condiciones ambientales no satisfactorias.
- Intoxicación por metales.
- Exceso o mala aplicación de fertilizantes.

- Exceso o mala aplicación de herbicidas o pesticidas.

Al hablar específicamente de la falta de nutrientes, los síntomas presentados tienen características comunes: se manifiestan en manchas, con ciertos patrones únicos y específicos.

Los patrones por deficiencia de nutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio y magnesio) se presentan dependiendo de la movilidad de dichos nutrientes. Las manchas de estos patrones aparecen primero en la parte baja de las hojas, luego las manchas suben. Por otro lado, la deficiencia de calcio, azufre, hierro, manganeso, cobre y boro se manifiesta primero arriba de las hojas y tiende a bajar [16].

Aunque se dice que cada síntoma es único y específico para cada nutriente, no siempre es así. Por ejemplo, un sólo nutriente como el zinc se presenta de maneras distintas de un clima a otro. En cambio, el nitrógeno y magnesio afectan dos procesos: síntesis de proteína y de clorofila, pero el nitrógeno provoca que la planta sea verde pálido o amarilla que no son los mismos síntomas del magnesio.

2.1.2.2 Análisis de plantas

El análisis de plantas fue el método utilizado para determinar si un elemento químico es considerado un nutriente [17]. Las plantas pueden ser probadas para suficiencia de nutrientes por prueba analítica, la cual implica análisis cuantitativos en plantas o pruebas de tejidos.

2.1.2.3 Análisis cuantitativo

Este método tiene como fin, en la mayoría de los casos, confirmar el diagnóstico visual. Se identifica hambruna oculta o deficiencia inicial. Existen rangos que se comparan con los resultados del análisis y evalúan el estado de la planta como: deficiente, bajo, suficiente o alto. La concentración crítica de un nutriente se define como la concentración por debajo de la cual se suprimen los rendimientos.

2.1.2.4 Prueba de tejido

La prueba de tejido es una técnica rápida para determinar el estado nutricional de los cultivos. Dependiendo del elemento que se desea evaluar, se escoge una parte de la planta. Por

ejemplo, el nitrato se analiza en el pecíolo, en los nervios, en bordes o en raíces (ver Figura 2.1), debido a que en esas partes se encuentra una forma del nitrógeno sin asimilar y aún está en tránsito hacia las hojas.

En la prueba de tejido, generalmente la savia es extraída de la planta por procesos destructivos filtrando el líquido para las pruebas. Como ya se mencionó, hay que extraer el nitrato de tejidos exactos. En el caso del potasio, no resulta tan importante de dónde se obtiene.

De acuerdo con la sección 2.1.2.1, el diagnóstico visual es utilizado para la evaluación de las plantas por medio del color de las hojas, esta evaluación también puede ser con la técnica cuantitativa, y para ello hay que usar mediciones de clorofila como prueba no destructiva del tejido. La reflectancia (en infrarrojo cercano o rojo visible) es utilizada como sensor remoto.

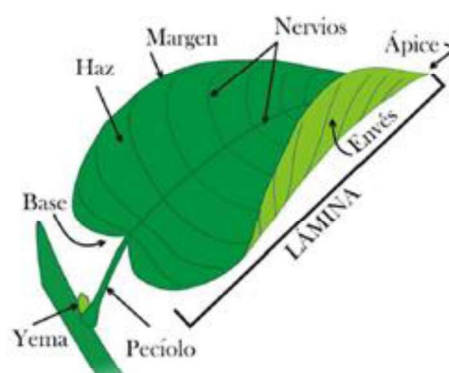


Figura 2.1. Partes de la hoja.

2.1.2.5 Pruebas bioquímicas

La actividad de enzimas puede proveer indicadores rápidos sobre la deficiencia de nutrientes, ya que la falta de micronutrientes puede guiar a reprimir la actividad de los enzimas. Aunque la evaluación enzimática no proporciona información de concentraciones, permite diagnosticar la deficiencia o suficiencia de nutrientes. Esto ayuda cuando el diagnóstico visual no distingue entre dos síntomas similares, cuando el análisis de suelo no determina si la planta absorbió los nutrientes o cuando el análisis de la planta no refleja concentración de los nutrientes. En el caso de los macronutrientes, no pueden ser asociados a actividad enzimática, ya que tienen muchas funciones en las plantas.

2.1.2.6 Prueba del suelo

Una prueba del suelo es una medición física o química del suelo hecha en una muestra. Sin embargo, es considerada como un análisis químico rápido que evalúa los elementos químicos fácilmente extraíbles del suelo. La evaluación por este método plantea la viabilidad de nutrientes que existen en el suelo y que pueden ser absorbidos por las plantas, mas no indica si han sido adquiridos. También puede medir la salinidad del suelo, el pH y la presencia de elementos que pueden restringir el crecimiento de los cultivos.

2.1.3 Temperatura de las hojas

Las plantas al ser organismos inmóviles deben ser adaptables a su entorno ambiental y crecer sólo en temporadas adecuadas. Por ello, la temperatura es determinada por la cantidad de radiación que las plantas reciben. La única función interna que puede afectar la temperatura es la apertura de estomas, que son pequeños poros los cuales tienen dos funciones principales: absorber el dióxido de carbono y regular la cantidad de agua por medio de la transpiración. Además, la transpiración ayuda a mejorar el transporte de los nutrientes desde la raíz hasta el brote y alteraciones pueden tener consecuencias relacionadas a los brotes de las plantas. La temperatura de la hoja baja cuando los estomas se abren y elevan la tasa de evaporación del agua [18]-[22].

Existe un enlace directo entre las propiedades térmicas de las plantas y el agua, ya que la absorción de radiación es principalmente por medio del agua debido a su alta concentración en las plantas. A causa de la relación existente y de las propiedades del agua, una vez que la temperatura se eleva en las plantas, retiene este calor durante un gran tiempo sin transferirlo al medio ambiente. Esto significa que una gran cantidad de energía calorífica es necesaria para elevar su temperatura [23], [24].

Una manera de inducir cambios en la transpiración es por medio de la luz azul. Las estomas se abren al ser expuestos a este color específico, por lo tanto, se puede controlar la tasa de evaporación. Kümmerlen [19] experimentó los cambios de transpiración induciendo luz azul (de 350-460 nm) con un proyector durante 5 minutos y observó que durante el experimento, se

presentaban cambios en la temperatura de la hoja.

Otro factor importante que afecta la temperatura es el estado de salud. En trabajos previos, H. Nilsson [25] resume sobre el incremento en la temperatura debido a enfermedades. Por ejemplo, describe que las infecciones en la raíz de ciertas plantas causadas por parásitos *Pythium* elevan la temperatura entre 3-4 °C sobre las plantas sanas. Así mismo, Nilsson encontró que, al estresar varias especies de plantas, presentaban un incremento de 8-9 °C e incluso que, al hacer circular aire, las plantas infectadas no disminuían su temperatura mientras que las plantas sanas sí.

2.1.4 Nutrientes relacionados con la temperatura

Hay tres elementos químicos que se sabe afectan la temperatura de alguna manera u otra. El principal de ellos es el potasio, el cual está relacionado directamente con el control de la pérdida de agua al abrir y cerrar las estomas. El potasio también juega un papel importante en la translocación de los nutrientes. Otro que afecta, de manera indirecta, es el cloro. Ya que daña las estomas que tienen influencia indirecta en la fotosíntesis al igual que la temperatura. El último elemento químico, es el silicio, que tiene muchos efectos benéficos en el crecimiento de las plantas, siendo el más importante la reducción de cutícula que se forma en la hoja para la pérdida de agua, sin embargo, no se le considera nutriente. Al involucrar el agua, indirectamente se afecta la temperatura [14].

2.2 Hidroponía

La Real Academia Española define la hidroponía como “Cultivo de plantas en soluciones acuosas, por lo general con algún soporte de arena, grava, etcétera”. La palabra proviene del griego *υδρο* (Hydro) que significa agua y de *πονος* (Ponos) que significa trabajo o esfuerzo, por lo que se puede entender como trabajo en agua, aunque actualmente se utiliza como término para referirse al cultivo sin suelo. El cultivo de las plantas puede darse si tienen soporte para crecer y los nutrientes necesarios, por lo que el suelo no es indispensable y se pueden usar sustitutos como grava, arena, carbón, entre otros. Los nutrientes son proporcionados por medio de una solución de nutrimentos minerales que se suministran a

través del agua [6].

La hidroponía ayuda a tener una producción con cosechas de mayor calidad. Permite un uso eficiente de agua y fertilizantes, logrando generar rendimientos por unidad de área cultivada muy altos debido a su alta densidad, mayor productividad y eficiencia en el uso de recursos: agua, luz y nutrientes [7]. También apoya para la investigación de las plantas, ya que permite tener un ambiente controlado, como se muestra en la Figura 2.2, que admite la manipulación del desarrollo de las plantas estresándolas con exceso o deficiencia de nutrientes.



Figura 2.2. Cultivo hidropónico con ambiente controlado.

Los orígenes de esta técnica no son conocidos exactamente, ya que se cree que empezó hace más de dos mil años en la antigua Babilonia, en los Jardines Colgantes. También existen referencias de que la hidroponía fue utilizada exitosamente en la antigua China, India, Egipto y la cultura Maya. Por otra parte, hay otras referencias que indican que los Aztecas también utilizaron esta técnica como sistema de producción y sobrevivencia, a través de los Jardines Flotantes. Esto debido a que la cultura Azteca fue forzada a ubicarse en la orilla del lago Tenochtitlán por sus vecinos más poderosos, dejándolos sin tierras para cultivo y tuvieron que desarrollar técnicas novedosas, para el cultivo de plantas en medios líquidos. Actualmente, si se cuentan las plantas que crecen en agua (océanos, lagos, ríos, etc.), más del 70% de la vegetación es hidropónica. Existen cultivos hidropónicos de todo tipo desarrollados por todo el mundo, económicos y simples, así como costosos y muy complejos [7].

2.3 Termografía infrarroja

Es una técnica no destructiva (NDT, por sus siglas en inglés), en la que sin hacer contacto se recaba ópticamente información infrarroja emitida por la superficie de los cuerpos [8], la cual convierte la radiación invisible en una imagen visible, que puede ser mapeada en una imagen de dos dimensiones, tal como se muestra en la Figura 2.3. Esta radiación es emitida por los cuerpos a causa de su temperatura y es explicada por la teoría del cuerpo negro.

2.3.1 Radiación del cuerpo negro

La teoría del cuerpo negro dice que todos los cuerpos con temperatura mayor al cero absoluto emiten radiación. Esto es provocado por la constante agitación de los átomos y moléculas que provocan un movimiento acelerado de las cargas eléctricas. Las ecuaciones de Maxwell predicen que un movimiento acelerado de las cargas eléctricas produce radiación. Lo emitido por este movimiento de partículas es radiación electromagnética en un amplio rango de longitudes de onda y frecuencias. El total de flujo emitido por una superficie a una temperatura T es expresado por la ley de Stefan-Boltzmann, en la siguiente ecuación:

$$M = \sigma T^4 \quad (2.1)$$

Donde M es la emitancia de la superficie en el vacío, σ es la constante de Stefan-Boltzmann y T es la temperatura del cuerpo (en escala Kelvin) [26], [27].

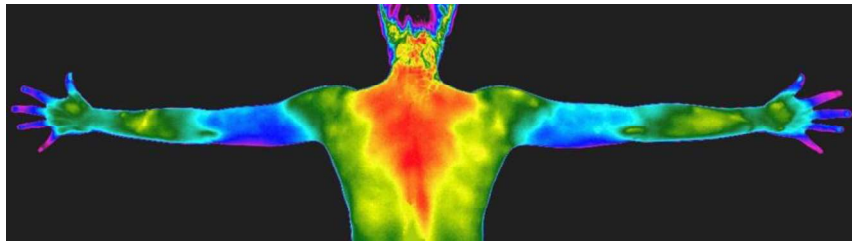


Figura 2.3. Radiación infrarroja emitida por la parte superior del cuerpo humano, mapeada en una imagen.

La definición del cuerpo negro es: un cuerpo ideal que absorbe toda la radiación incidente (sin transmitancia ni reflectancia). Al ser una teoría de un comportamiento ideal, si se tuviera un cuerpo negro a temperatura ambiente sería totalmente negro para el ojo humano, de ahí su nombre.

La radiancia que es emitida por una superficie es distribuida por un rango de ángulos y longitudes de onda específicas. Como un cuerpo negro tienen una superficie lambertiana (que emite en forma constante, independientemente de la dirección), la relación entre la emitancia y la radiancia L está dada por la siguiente ecuación:

$$M = \pi L \quad (2.2)$$

Pocos objetos tienen las propiedades del cuerpo negro, los demás objetos son llamados cuerpos grises, y tienen una absorbancia, transmitancia y reflectancia que dependen de las propiedades físicas y químicas del material.

2.3.1.1 Ley de Planck

El espectro de emisión de la radiación emitida por un cuerpo cambia respecto a la temperatura. Max Planck en 1901 hizo una nueva y radical suposición, que la radiación es energía cuantizada. Con esta suposición se derivó una buena aproximación del cuerpo negro en una ecuación que predice la radiancia espectral de los cuerpos negros en el vacío, a cualquier temperatura:

$$L = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)} \quad (2.3)$$

donde L es la radiancia, h es la constante de Planck, c es la velocidad de la luz en el vacío, k es la constante de Boltzmann y λ es la longitud de onda en metros.

En la Figura 2.4 se muestra el comportamiento de la radiación de un cuerpo a varias temperaturas. La temperatura de 6000 K es aproximada a la temperatura del sol terrestre, por lo que las curvas son similares.

2.3.1.2 Ley de desplazamiento de Wien

Al igualar la ecuación (2.3) a cero, se obtiene la longitud de onda con la mayor emisión de radiación, que corresponde al pico de las curvas que se muestran en la Figura 2.4. Por lo tanto, la nueva ecuación para determinar estos picos de emisión es la ecuación (2.4). Donde T es la

temperatura del cuerpo en unidad Kelvin.

$$\lambda T = 2,897.8 \times 10^{-6} mK \quad (2.4)$$

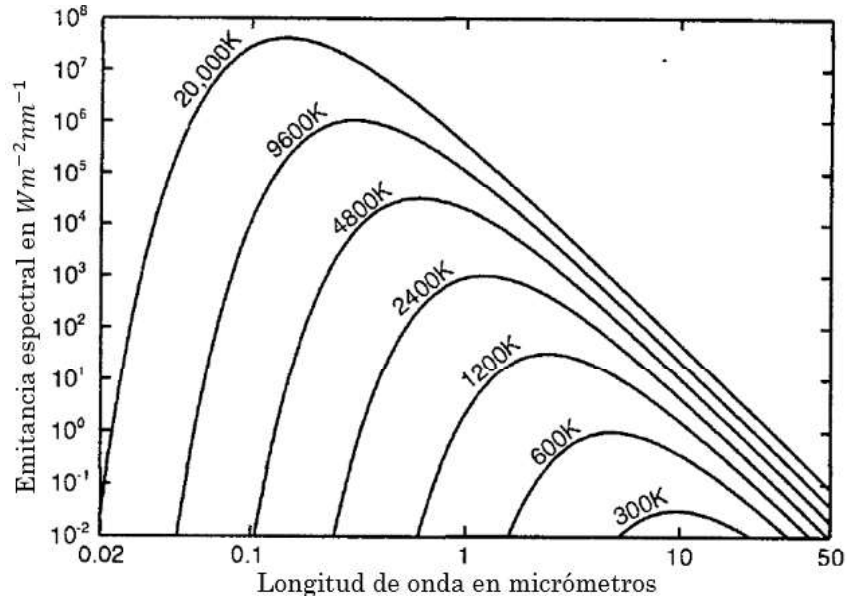


Figura 2.4. Espectro de emisión de cuerpos a diferentes temperaturas.

2.3.1.3 Coeficiente de emisividad

El coeficiente de emisividad (ϵ) indica la habilidad que tiene un cuerpo para emitir radiación térmica comparada con la radiación que emite un cuerpo negro. Ya que un cuerpo real no emite, no absorbe y no refleja igual que un cuerpo negro, este coeficiente funciona para indicar la radiación emitida por un cuerpo en función de su temperatura. El coeficiente de emisividad cambia según las propiedades físicas del cuerpo.

$$\epsilon = \frac{\text{radiación emitida por una superficie real}}{\text{radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura}} \quad (2.5)$$

Un cuerpo negro tiene un valor de emisividad igual a 1, mientras que los valores de un cuerpo real son menores a uno y van aproximadamente de 0.1 a 0.98. Por ejemplo, los espejos están por debajo del 0.1 y el cuerpo humano está alrededor de 0.98.

2.3.2 Infrarrojo

El descubrimiento de la radiación infrarroja se debe a William Herschel (1738-1822), quien replicó el experimento de Newton sobre la dispersión de la luz y midió la temperatura de las bandas de colores con tres termómetros diferentes que tenían los bulbos pintados de negro para absorber mejor la radiación. Descubrió que la temperatura se elevaba desde el color violeta hasta el color rojo. Al medir más allá del rojo, notó que la temperatura sufría un incremento. Hoy en día se sabe que el aumento de temperatura se debió a la radiación infrarroja que no es observada por el ojo humano [28]. El hecho de que esta radiación, llamada rayos caloríficos por Herschel, se comportaba de acuerdo a los mismos principios ópticos que la luz visible, fue evidencia suficiente para deducir que era un derivado de la radiación electromagnética [29].

La radiación infrarroja cuenta con un amplio rango del espectro electromagnético justo después del espectro visible. El espectro visible se localiza en un pequeño rango que va de los 390 nm a los 700 nm, mientras que el infrarrojo va de los 700 nm hasta 1 mm de longitud de onda. El infrarrojo se divide en tres bandas: infrarrojo cercano (700-2500 nm), infrarrojo medio (2.5-50 μm) e infrarrojo lejano (50-1000 μm). Las cámaras térmicas, sin embargo, no captan toda la radiación infrarroja, sino sólo un rango determinado dentro del infrarrojo medio (8-15 μm), pero se puede obtener información de la radiación en las demás longitudes de onda del infrarrojo utilizando un espectrómetro [30], [31].

2.3.3 Cámara térmica

Las primeras técnicas de termografía aparecieron en los años setenta, cuando los primeros escáneres térmicos aparecieron. Estos instrumentos eran pesados y requerían nitrógeno líquido como enfriamiento. Aunque la teoría del cuerpo negro permite estimar la temperatura de una superficie con la cantidad de radiación térmica emitida, esto solo es posible con sensores muy precisos debido a la pequeña cantidad de energía que se emite en esas longitudes de onda.

Los sensores han ido evolucionando con el paso del tiempo, actualmente ya no se usan enfriadores líquidos y hay una gran variedad de sensores. Por ejemplo, están los sensores de

arseniuro y galio que son de longitudes de onda cortas (hasta 5 μm) al igual que los sensores de antimoniuro de indio. También están los fotodetectores de pozo cuántico y microbolómetros que son utilizados en exteriores para longitudes de onda más grandes (8-15 μm).

La mayoría de las cámaras térmicas usan microbolómetros, los cuales tienen una respuesta distinta a lo largo de las longitudes de onda. Por ello, hacen un procesamiento de la señal para convertir su respuesta en temperatura.

Las cámaras térmicas son un conjunto de instrumentos ópticos, detectores y unidad de procesamiento; que detectan la radiación infrarroja térmica. La escena es proyectada a través de los instrumentos ópticos hacia el detector, luego la señal eléctrica es procesada y se genera un patrón de temperatura en la pantalla de la cámara [32].

2.3.4 Clasificación de la termografía

La termografía se divide en dos: la termografía pasiva y la termografía activa.

La termografía pasiva mide las variaciones de temperatura de los cuerpos sin fuentes externas incidentes. Sólo se busca medir las características importantes de interés que tengan una temperatura distinta a la del ambiente. Funciona para observar si un componente tiene defectos, experimenta esfuerzos innecesarios o para observar su comportamiento [11], [33].

La termografía activa utiliza una fuente externa que cambia la temperatura del objeto ya sea incrementándola o disminuyéndola. Las primeras fuentes de calor que se utilizaron fueron la pistola de calor, pistolas de agua caliente o bolsas de agua. Hoy en día, las más comunes son las fuentes ópticas térmicas, entre las cuales destacan las lámparas cinematográficas, lámparas infrarrojas, destellos fotográficos de alta potencia y luz láser.

Existen distintas clasificaciones dentro de la termografía activa según la función de la fuente de calor.

- Termografía pulsada: este tipo de termografía enfría o calienta el objeto con un

impulso de tiempo corto, inmediatamente después del impulso se monitorea la evolución de la temperatura del objeto.

- Termografía escalonada: en esta técnica la fuente externa es encendida y calienta el objeto durante un largo periodo de tiempo. Se monitorea la evolución del cuerpo durante todo el proceso.
- Termografía modulada: aquí se usan excitaciones periódicas en frecuencia y amplitud. Al mismo tiempo, se analiza la reflectancia del objeto con distinta fase y amplitud.
- Termografía de fase pulsada: es una combinación de la termografía pulsada y la termografía modulada.

2.3.4.1 Termografía pulsada

Como se muestra en la Figura 2.5, la termografía pulsada consta de tres elementos principales: luz pulsada, cámara térmica y unidad de procesamiento. Los tiempos de impulso térmico son cortos (desde microsegundos hasta segundos dependiendo del grosor y la conductividad térmica del material) y de alta potencia, en la mayoría de los casos esto provoca zonas donde la temperatura es elevada y otras donde no se ve incrementada. La unidad de procesamiento recibe la señal de la cámara y analiza las imágenes térmicas. Se observa el comportamiento del objeto bajo prueba, ya sea durante el incremento de temperatura en la superficie o durante el decremento [34].

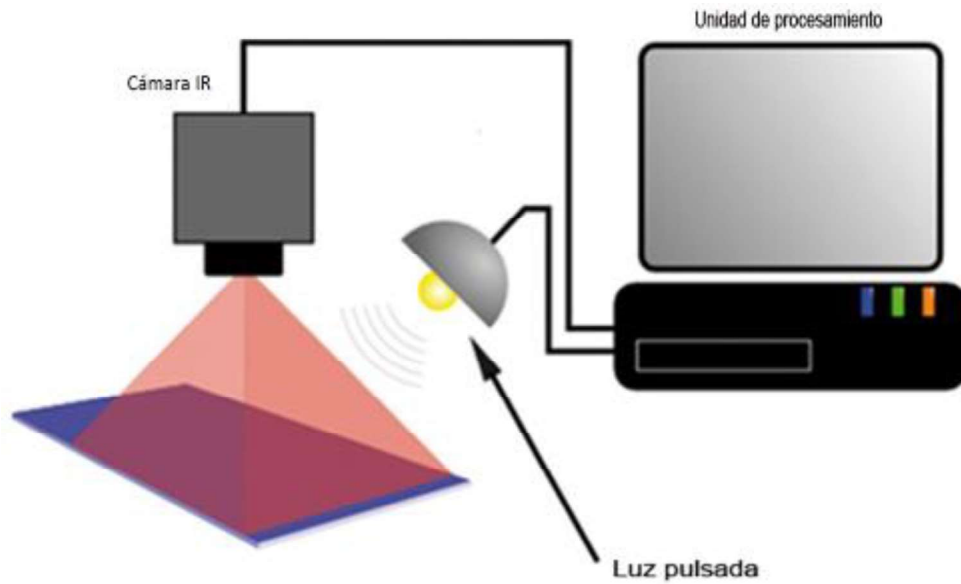


Figura 2.5. Elementos que se utilizan en termografía pulsada.

Existe una clasificación dentro de la termografía pulsada y está basada en la posición de los componentes. El modo de reflexión: donde la cámara y la fuente de excitación están en el mismo lado; y el modo de transmisión: donde la cámara y la fuente de excitación están del lado opuesto, es decir la cámara esta atrás del objeto [11].

2.3.4.2 Termografía modulada

La termografía modulada, también llamada termografía *lock-in*, consiste en un sistema coordinado entre una cámara infrarroja y una fuente térmica. La fuente de poder debe operar de tal manera que resulte una modulación sinusoidal de la temperatura [35]. La modulación es obtenida por medio de una señal eléctrica, que produce la variación de frecuencia.

El sistema recaba una serie de imágenes y las compara gracias a la onda sinusoidal reflejada en cada punto de la imagen. Debido a esto, la cámara y la fuente deben estar ubicadas en el mismo lado del sistema, como se muestra en la Figura 2.6. Las ondas reflejadas producen patrones de interferencia que son medidos en términos de amplitud o de fase y pueden ser presentados como imágenes de amplitud o imágenes de fase.

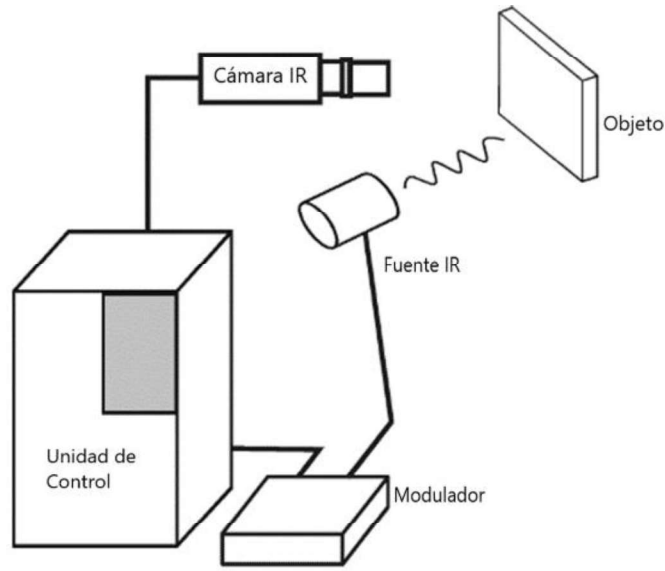


Figura 2.6. Sistema típico de la termografía modulada.

2.3.4.3 Termografía de fase pulsada

La termografía de fase pulsada (PPT, por sus siglas en inglés) combina dos características importantes de las técnicas mencionadas anteriormente, es fácil y rápida de utilizar tal como la termografía pulsada (TP) y entrega cambios en la fase y amplitud como la termografía modulada (TM) [36], [37]. Su implementación es igual que la TP, ver Figura 2.5. Sin embargo, el análisis es distinto. Primero se estimula una muestra con un pulso térmico, la evolución de la temperatura es guardada con la cámara térmica y los datos son mostrados y procesados con una computadora [38].

El análisis de información es similar a la TM, transformando la información (dominio del tiempo) en el dominio de la frecuencia [39]. El proceso está basado en la transformada discreta de Fourier [34], [40], [41], donde se obtiene una fase y una amplitud por cada frecuencia con la siguiente fórmula:

$$F(u) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(x) \exp\left(\frac{-j2\pi kx}{N}\right) = R(u) + jI(u) \quad (2.6)$$

donde $R(u)$ y $I(u)$ son la parte real e imaginaria de cada frecuencia $F(u)$. La fase (φ) se determina con la siguiente fórmula:

$$\varphi(u) = \tan^{-1} \left(\frac{I(u)}{R(u)} \right) \quad (2.7)$$

Las ventajas que tiene esta técnica es su insensibilidad al ruido ambiental por reflexiones, a las variaciones de emisividad de la superficie, al calentamiento no uniforme y a la geometría del objeto [42], [43].

La técnica de termografía es utilizada para realizar las pruebas del experimento y la termografía de fase pulsada es utilizada para realizar el análisis de los datos. En el siguiente capítulo se describe cómo ambas técnicas son utilizadas en el arreglo experimental desarrollado.

CAPÍTULO III. PRUEBAS DE TERMOGRAFÍA PULSADA

En la termografía pulsada, el objeto es estimulado por un pulso de calor. La temperatura incrementada es perdida por la difusión del calor desde la superficie hacia el interior del objeto y por la transferencia de calor por convección y radiación [28]. La termografía también puede clasificarse por las características de la fuente de calor. La termografía óptica es de las más comunes y utiliza lámparas o láseres cuya radiación infrarroja se usa para calentar el objeto. Otros tipos de clasificaciones por fuentes son: termografía por conducción eléctrica, termografía magnética, termografía por microondas, termografía por vibraciones, entre otras [11].

Otra subcategoría de la termografía es por la posición relativa de la fuente de excitación y de la cámara IR. Aquí se tienen dos categorías: modo de reflexión, donde la cámara y la fuente están en el mismo lado; y modo de transmisión, donde la cámara se encuentra en el lado opuesto de la fuente, justo atrás del objeto [11]. La configuración más utilizada es el modo de reflexión, debido a que la superficie del objeto es la que sufre los mayores cambios de temperatura, y estos efectos sólo se pueden observar con este arreglo.

3.1 Arreglo experimental

El arreglo propuesto para los experimentos está formado por una fuente de calor, una cámara infrarroja, un sistema de control para la fuente y un sistema de procesamiento de datos, con una configuración en modo de reflexión. En la Figura 3.1 se muestra el esquema del experimento.

Se utilizó una cámara HotFind-D que cuenta con una respuesta espectral de 8-14 μm y puede detectar temperaturas desde -20 °C hasta +250 °C, con una aproximación de ± 2 °C o $\pm 2\%$ de la medición. Su detector está formado por un arreglo de plano focal de microbolómetros con 120 x 160 píxeles, teniendo un campo de visión de 20° x 15°.

Para transferir los datos a la computadora se tienen dos opciones: una es por medio de video analógico utilizando un cable RCA y la otra es guardando las imágenes en la memoria

interna de la cámara y exportándolas por medio de USB. La diferencia entre estas dos opciones es que el video analógico da como salida una captura continua de la pantalla de la cámara, mientras que guardando las imágenes se genera un arreglo de 120 x 160 pixeles por cada captura representativa de la temperatura de cada pixel, por lo que es más fácil manejar la información. El tiempo que tarda cada opción mencionada para guardar las imágenes es distinto. La salida analógica entrega video en tiempo real, en cambio al guardar las imágenes manualmente se tarda un mínimo de entre 2 y 3 segundos cada una.

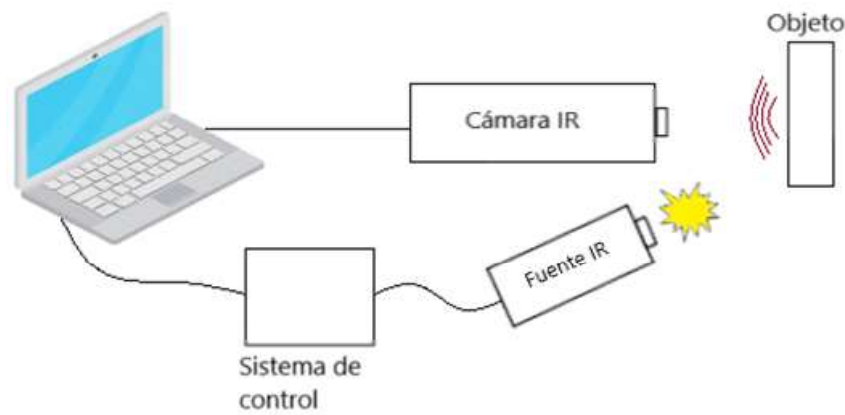


Figura 3.1. Arreglo experimental de termografía pulsada.

La fuente de calor propuesta es un reflector de halógeno de 500 Watts con filamento de tungsteno. Tiene una temperatura de color de 2990 K y de acuerdo con la ley de desplazamiento de Wien, ecuación (2.4), se deduce un pico de emisión de 968 nm.

La razón más importante para la elección de esta fuente es por su espectro de emisión, ya que emite sólo 12% en el espectro visible y 88% en la zona infrarroja. En la Figura 3.2 se puede observar la distribución de la radiación a lo largo de las distintas longitudes de onda. Como se mencionó en el capítulo anterior, la radiación infrarroja es la parte del espectro electromagnético responsable de calentar los objetos.

En la termografía pulsada, el tiempo de encendido de la fuente es controlado. El reflector por sí sólo no tiene la capacidad para controlar los pulsos, por lo que se propuso un sistema de control simple que ayude en la sincronización de la fuente con el experimento.

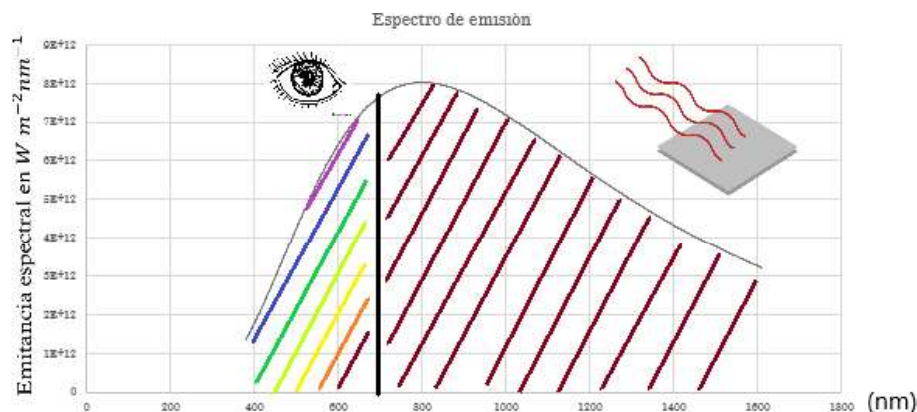


Figura 3.2. Curva de emisión de la fuente seleccionada. Antes de los 769 nm se tiene un 12% de la radiación total emitida. Después de esa longitud de onda se tiene 88% del total de la radiación.

El sistema de control se divide en dos secciones: la parte del hardware y la parte del software. El hardware está conformado por un Arduino Uno, un módulo de dos relevadores y una placa de contacto; colocados en una caja de instalación eléctrica. La placa de contacto tiene dos conexiones, cada una conectada a un relevador y éstos últimos controlados por un Arduino que se conecta por medio de USB a la computadora.

Por otra parte, se tiene el software de control realizado en LabVIEW®. El programa se conecta al hardware por medio de la paquetería LIFA, lo cual permite programar el Arduino desde LabVIEW® y recibir comandos a través de USB. El software realizado se divide en dos: la parte de la configuración para comunicarse con el Arduino y la parte donde se controla el tiempo de encendido del reflector.

En la Figura 3.3a se observa la configuración de comunicación. Aquí se selecciona el puerto de comunicación al cual está conectado el Arduino y una vez configurado se da clic en el botón de Listo. Un mensaje del estado de conexión aparece en el recuadro blanco inferior, indicando que se encuentra conectado o el tipo de error por el cual no se pudo conectar.

En la Figura 3.3b se tiene la configuración para iniciar un pulso térmico. Para ello, se tiene que seleccionar el pin digital de salida del Arduino y el tiempo en que estará encendido (se pueden seleccionar milisegundos, segundos o minutos). Una vez lista la configuración deseada, se da clic en el botón Iniciar pulso. También se cuenta con un botón para detener el programa y cuadros de texto para visualizar el tiempo faltante.

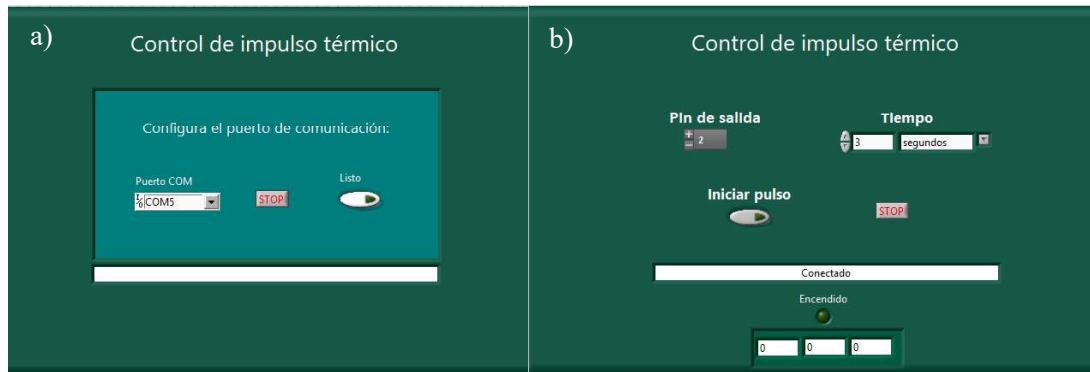


Figura 3.3. Programa de LabVIEW® para controlar el impulso térmico. a) Configuración para comunicar el programa de LabVIEW® con Arduino, b) Configuración del tiempo para el pulso.

Con lo anterior, el pulso es controlado con precisión de milisegundos y el arreglo de termografía pulsada está completo. Gracias al conjunto de todos los componentes (cámara térmica, reflector, sistema de control y el software de computadora), pueden llevarse a cabo pruebas de termografía pulsada.

3.2 Pruebas de termografía

Para probar el arreglo experimental, se replicaron pruebas reportadas en la literatura. Se analizaron las pruebas realizadas por el doctor J. C. Ramírez en su tesis “Detección y reconstrucción de defectos superficiales en 3-D mediante el análisis de datos de termografía pulsada” [28], donde se tomaron videos termográficos con tres placas de distintas características. La primera placa era una tarjeta plástica con un microchip, la segunda placa era una hoja de plástico unida a una placa de aluminio y la tercera era una hoja de plástico también unida a una placa de aluminio, pero de menor dimensión. Las pruebas consistieron en elevar la temperatura 2 grados Kelvin y observar el perfil de enfriamiento en cada una de las placas para ubicar las zonas de diferente material.

Basados en el experimento anterior se optó por hacer tres objetos, donde cada uno consiste en la combinación de dos placas de distinto material; para luego excitarlos con un pulso de calor, registrar las imágenes térmicas y al final procesarlas para determinar el comportamiento de temperatura propio de cada material.

Se construyeron tres objetos con distintas combinaciones de materiales: aluminio-madera, aluminio-plástico y tela-madera; recubiertos con una superficie negra para mantener oculto el tipo de material de cada objeto y ayudar a captar una mayor radiación infrarroja. En la Figura 3.4 se puede observar la forma física de los objetos y sus dimensiones.

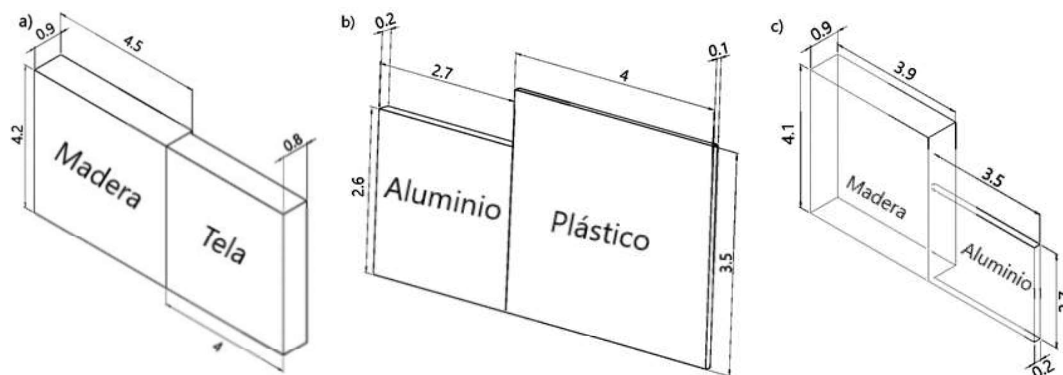


Figura 3.4. Objetos con dimensiones dadas en centímetros y distintas combinaciones de materiales.
a) Madera-tela, b) Aluminio-plástico y c) Madera-aluminio.

Una vez definidos los objetos para las pruebas de termografía, se montó el arreglo experimental. La cámara se colocó a 40 cm frente a la superficie del objeto y, la lámpara a 31 cm del objeto y a 13.3 cm de la cámara infrarroja, como se muestra en la Figura 3.5.

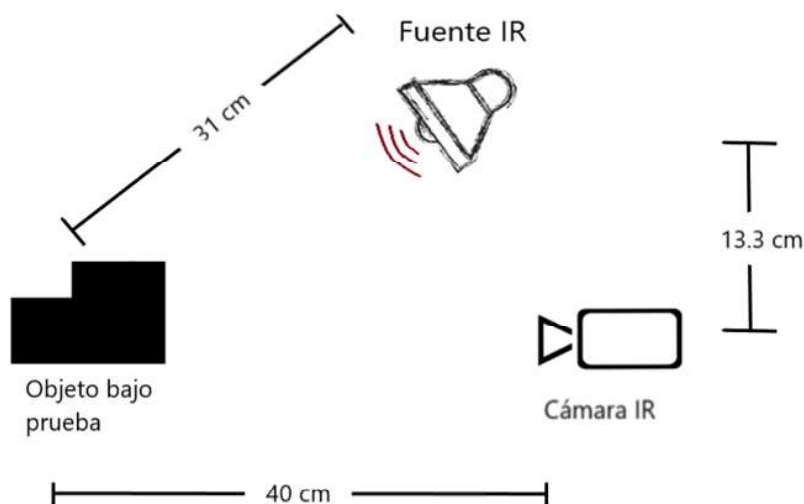


Figura 3.5. Arreglo experimental utilizado en las pruebas de termografía.

Se realizaron tres pruebas a cada objeto. Las pruebas consistieron en dar un impulso térmico de 30, 60 y 120 segundos a cada objeto y guardar imágenes térmicas del experimento

cada 10 segundos durante y después del impulso térmico. Los datos fueron guardados en la memoria interna de la cámara infrarroja y después fueron transferidos por USB a la computadora.

Los datos guardados están en formato CSV, el cual es un archivo de 120 renglones con 160 números separados por punto y coma. Cada número corresponde a cada píxel de la cámara IR y forma una matriz de 120 x 160 píxeles.

Los datos fueron procesados con MATLAB® para analizar la evolución de los objetos en cada prueba después del impulso térmico. Cada temperatura se extrajo del documento generado y se creó una matriz numérica. En la secuencia de imágenes el objeto cambia de posición respecto a la posición del objeto de la imagen anterior, debido a que la cámara IR no estaba completamente fija. Por lo tanto, se hizo una subrutina para alinear el objeto por medio de detección de bordes formándose nuevas imágenes térmicas con dimensiones de 60 x 110 píxeles.

Otra manera de minimizar el error por el desplazamiento de la cámara fue promediar cada cincuenta píxeles formando una zona de 5 x 10 píxeles. En total se crearon 132 zonas promediadas, las cuales se añadieron a un arreglo que recaba la información de cada cuadro del video termográfico.

Al graficar la temperatura de las zonas desde el inicio del pulso calorífico, se observan dos curvas de respuesta, donde cada una corresponde a cada una de las placas del objeto, Figura 3.6.

Como es típico en la termografía pulsada, después del segundo 60 (Figura 3.6) se analizó la parte del enfriamiento y para ello se decidió tomar el comportamiento que se presenta y caracterizarlo con la siguiente ecuación (ver sección 3.2 para más detalles):

$$T = Ta + \Delta T e^{-\alpha t} \quad (3.1)$$

donde T es la temperatura del objeto, Ta es la temperatura ambiental, ΔT es la diferencia entre la temperatura máxima y la temperatura ambiente, α es el coeficiente de temperatura del

material y t es el tiempo.

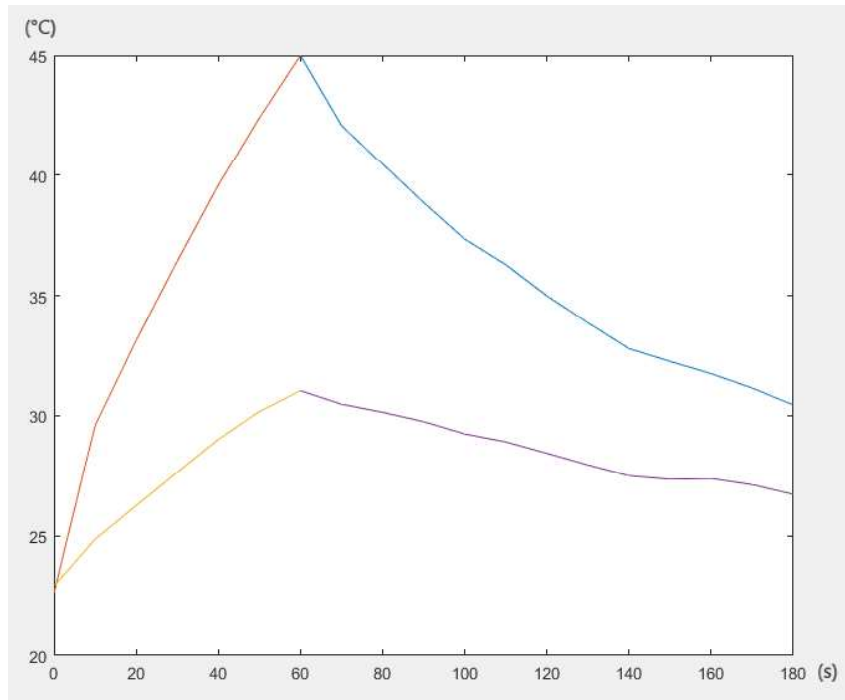


Figura 3.6. Gráfica de la evolución de temperatura de un objeto en dos zonas distintas. La curva que alcanza mayor temperatura corresponde al plástico y la de menor temperatura al aluminio.

El coeficiente de temperatura define el comportamiento térmico de los materiales. Linealizando los datos y despejando α se obtiene la ecuación (3.2).

$$-\alpha t = \ln\left(\frac{T - T_a}{\Delta T}\right) \quad (3.2)$$

Una vez que no se tienen exponenciales en la ecuación, las curvas pasan a líneas semirrectas como se muestra en la Figura 3.7. Gracias a esto, se puede analizar la información con la forma $y = mx + b$. Donde la pendiente m corresponde al coeficiente de temperatura, característico de cada material.

Los coeficientes de temperatura fueron determinados para cada material. En total fueron seis coeficientes: dos para el aluminio, dos para la madera, uno del plástico y uno de la tela. Esto fue debido a que son tres objetos con dos materiales cada uno, repitiendo la madera y el aluminio.

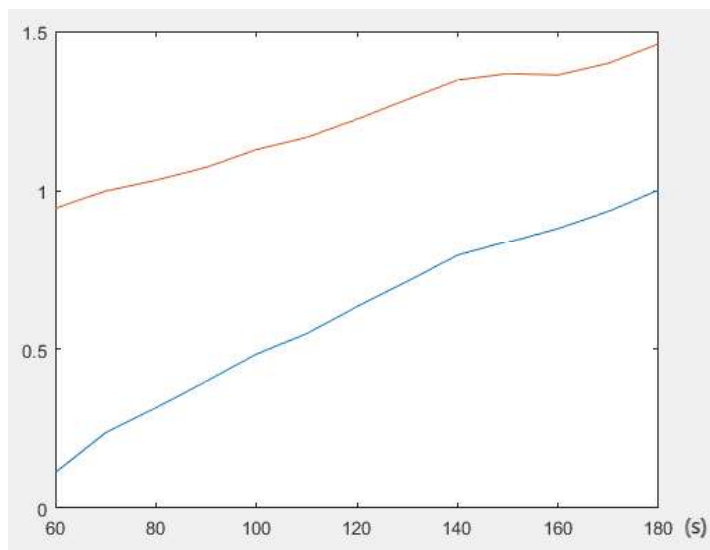


Figura 3.7. Gráfica de temperatura linealizada del objeto de plástico-aluminio.

En la Figura 3.8 se pueden observar y comparar los seis coeficientes de temperatura obtenidos de los cuatro materiales utilizados. En los casos donde se trata del mismo material, el error es menor a 6%. Estos números fueron generados con las pruebas de 60 segundos de calentamiento, ya que arrojaron menor error.

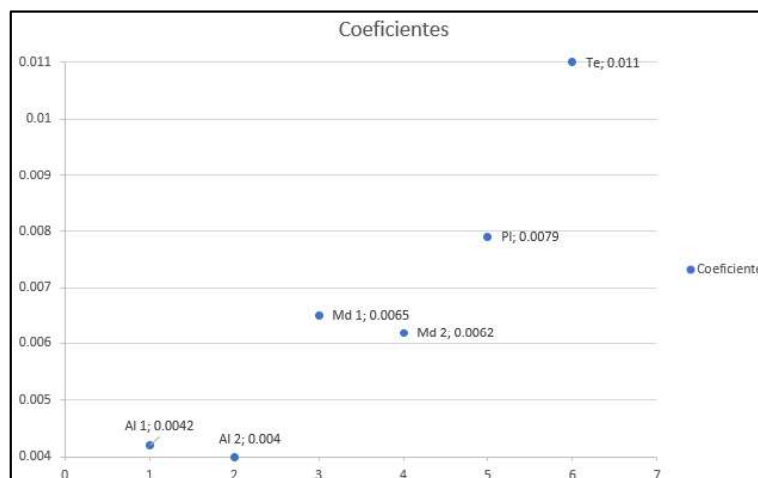


Figura 3.8. Gráfica de coeficientes de temperatura de los cuatro materiales.

3.3 Pruebas de termografía a muestras vegetales

En los últimos años ha aumentado la necesidad por comida nutritiva con estándares de calidad altos. Estudios demuestran que consumir frutas y vegetales disminuye los riesgos de

padecer enfermedades crónicas como el cáncer, Alzheimer y enfermedades cardiovasculares [44].

La lechuga (*Lactuca Sativa*) es una de las principales plantas que se consume alrededor de todo el mundo. El principal productor de lechuga (reporte combinado con achicoria común) es China con 36 %, mientras que Estados Unidos produce el 8 % de la producción total del mundo y México apenas el 1.1 %, según datos de FAO en 2018 (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura, por sus siglas en inglés) [45].

Aunque la lechuga es un vegetal popular que cuenta con algunos nutrientes y antioxidantes (vitaminas B, C y E), no ha sido reconocida como una comida nutritiva ya que el 95% de su masa es agua.

Existen distintas variedades de *Lactuca Sativa* con diferentes forma, tamaño y textura, entre las principales se encuentran la great lakes, romana, cogollo romana y francesa. Para fines de experimentación se seleccionaron dos variedades: great lakes y romana. Éstas fueron sembradas y cultivadas en un sistema de hidroponía con condiciones nutritivas específicas.

3.3.1 Sistema de hidroponía y soluciones nutritivas

Se acondicionó el invernadero del Instituto Tecnológico de Chihuahua para el sistema de hidroponía. Se construyeron 8 recipientes de triplay con una capacidad de 40 L de agua. Las medidas de las cajas son de 40 x 40 cm de ancho y 30 cm de alto. Fueron recubiertos en su interior con hule negro y hule transparente para evitar fugas de agua. Además, se utilizó un recipiente de plástico con una capacidad superior de 60 L.

Como soporte para las plantas, se utilizaron 8 placas de poliestireno de 2.52 cm de alto y de 36 cm por cada lado. Las placas fueron perforadas con cuatro círculos de dos pulgadas de diámetro con una separación de aproximadamente 20 cm y a 7.5 cm del borde de la placa.

A los contenedores se le colocaron bombas de aire para oxigenar el agua. Por cada dos contenedores fue colocada una bomba de aire. En total se utilizaron 5 bombas de aire, la quinta bomba se colocó al contenedor de 60 L.

Una vez con el sistema de hidroponía preparado, se prepararon las soluciones nutritivas para fortalecer el crecimiento de las plantas. La solución balanceada (todos los nutrientes al 100% de concentración) consta de una solución A y otra solución B. Su preparación consiste en: por cada 1000 L de agua se agregaron 1220 gr de solución A y 1000 gr de solución B.

La solución A está formada por cinco compuestos químicos: KNO_3 (nitrato de potasio), NH_4NO_3 (nitrato de amonio), KH_2PO_4 (fósforo monopotásico), $MgSO_4$ (sulfato de magnesio) y los micronutrientes (cloro, hierro, boro, manganeso, zinc, cobre, níquel y molibdeno); la solución B está compuesta por $Ca(NO_3)_2$ (nitrato de calcio).

Cada compuesto aporta un porcentaje de los macronutrientes necesarios para su crecimiento tal como se observa en la Tabla 3.1. Para limitar un macronutriente en específico se modifican las concentraciones de los compuestos químicos de alguna de las dos soluciones nutritivas.

Tabla 3.1. Aportación de macronutrientes por cada compuesto químico.

Compuesto	Solución	Contenido (gr)	Elementos de interés (%)					
			N	P	K	S	Ca	Mg
Nitrato de potasio	A	445	20	0	57.5	0	0	0
Nitrato de amonio	A	200	54	5	0	0	0	0
Fósforo monopotásico	A	220	0	95	42.5	0	0	0
Sulfato de magnesio	A	315	0	0	0	100	0	100
Micronutrientes	A	40	0	0	0	0	0	0
Nitrato de calcio	B	1000	26	0	0	0	100	0
	Balanceada	2220	100	100	100	100	100	100

El nitrógeno, azufre y magnesio no se pueden limitar sin afectar la concentración de otros macronutrientes. El azufre y magnesio fueron modificados para crear una solución con una deficiencia de ambos. Mientras que el nitrógeno se descartó por completo. Con el resto de los macronutrientes se crearon deficiencias con un rango medio y uno bajo.

Las distintas soluciones creadas se muestran en la Tabla 3.2. La solución 9 se disolvió en 60 L de agua, mientras que el resto de las soluciones fueron disueltas en 40 L.

Tabla 3.2. Contenido nutricional de las distintas soluciones que se realizaron.

Solución	Fósforo	Calcio	Potasio	Azufre + Magnesio	Resto de nutrientes
1	3.50%	100	100%	100%	100%
2	50%	100	100%	100%	100%
3	100%	0%	100%	100%	100%
4	100%	50%	100%	100%	100%
5	100%	100%	25%	100%	100%
6	100%	100%	62.50%	100%	100%
7	100%	100%	100%	0%	100%
8	100%	100%	100%	50%	100%
9	100%	100%	100%	100%	100%

3.3.2 Siembra de lechugas

La siembra se puede dividir en dos partes: la siembra en almácigo y el crecimiento en hidroponía. La siembra en almácigo es utilizada para crear las mejores condiciones de cultivo para la germinación de las semillas. El sustrato del almácigo es utilizado como soporte de la semilla y ayuda a retener la humedad por más tiempo. Algunos de los ingredientes más comunes son: la fibra de coco, vermiculita, perlita y cáscara.

Las dos variedades de lechugas (romana y great lakes) fueron sembradas en almácigo. En total, se sembraron 114 semillas, de las cuales 60 fueron de variedad romana y el resto de great lakes. Durante un mes, las plantas permanecieron en el invernadero y fueron regadas con una solución nutritiva balanceada, al menos una vez al día.

Cumplido el mes de germinación en almácigo, se hizo el trasplante al sistema de hidroponía. Para el trasplante se retiraron las plantas del almácigo y se limpió del sustrato. Después, las raíces de las plantas se enrollaron en esponja y fueron colocadas en canastillas.

Los recipientes fueron llenados con las distintas soluciones nutritivas y se ubicaron las canastillas en las placas de poliestireno para mantenerlas flotando, logrando que la raíz de la planta estuviera en contacto con la solución y la hoja de la planta fuera del recipiente tal como se muestra en la Figura 3.9.



Figura 3.9. Inicio del sistema de hidroponía.

La distribución de las plantas se muestra en la Tabla 3.3, donde en la mayoría de las soluciones se colocaron la mitad de cada variedad, excepto en las soluciones de calcio, donde se ubicaron cuatro plantas de variedad romana. En la Figura 3.10 se muestran las plantas a 15 días del trasplante al sistema de hidroponía.

Tabla 3.3. Distribución de las plantas en las soluciones nutritivas.

Solución	Plantas		
	Variedad great lakes	Variedad romana	Total
Balanceada	3	3	6
K 25%	2	2	4
K 62.5 %	2	2	4
Ca 0%	0	4	4
Ca 50%	0	4	4
P 3.5%	2	2	4
P 50%	2	2	4
S + Mg 0%	2	2	4
S + Mg 50%	2	2	4
Total	15	23	38

Para mantener oxigenadas las soluciones, se utilizaron las bombas de aire y se crearon ciclos de encendido para mantenerlas activas durante ciertos periodos de tiempo. Los ciclos constan de 120 minutos, donde 30 minutos permanecen encendidas y 90 minutos apagadas. Estos ciclos se repiten desde las 6 de la mañana hasta las 8 de la noche.



Figura 3.10. Sistema de hidroponía 15 días después del trasplante de las lechugas de variedad romana.

3.3.3 Conductividad

La conductividad de las soluciones nos proporciona información sobre la concentración de nutrientes y la evaporación del agua que se ha generado. Durante todo el crecimiento de las plantas en hidroponía, se midió la conductividad del agua para verificar los cambios que se presentaban. La primera medición se observa en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Conductividad de las soluciones nutritivas.

Solución	Conductividad (ppm)
P 3.5%	1180
P 50%	1400
Ca 0%	1330
Ca 50%	1420
K 25%	1240
K 62.5%	1340
S + Mg 0%	1340
S + Mg 50%	1370
Balanceada	1360

El cambio más relevante que presentó la solución nutritiva fue el aumento de la conductividad debido a la evaporación del agua. Por lo tanto, cada vez que la conductividad aumentaba significativamente (alrededor del 10 %) se agregaba agua a los recipientes hasta

llegar a la conductividad adecuada. El objetivo era mantener el nivel del agua por encima del punto en que la raíz estuviera flotada.

3.3.4 Pruebas de termografía a lechugas

Una vez pasado el tiempo para el crecimiento de las lechugas, se cosecharon para realizar pruebas de termografía. Se seleccionó una planta por cada solución nutritiva, se le cortó una hoja y se llevó al laboratorio para realizar pruebas de termografía.

Para las pruebas, se implementó un montaje adecuado a la forma de la hoja de la lechuga. Se instaló un soporte que constaba de tres hilos tensos amarrados a dos postes. A una distancia de 35 cm se ubicó la cámara termográfica con un soporte para evitar el movimiento al tomar las pruebas. A 42 cm de la muestra y a 15 cm de la fuente se colocó la lámpara incandescente. Además, para evitar que objetos externos afectaran las mediciones, se instaló una hoja de papel cubierta con papel aluminio que reflejaba la pared, ver Figura 3.11.

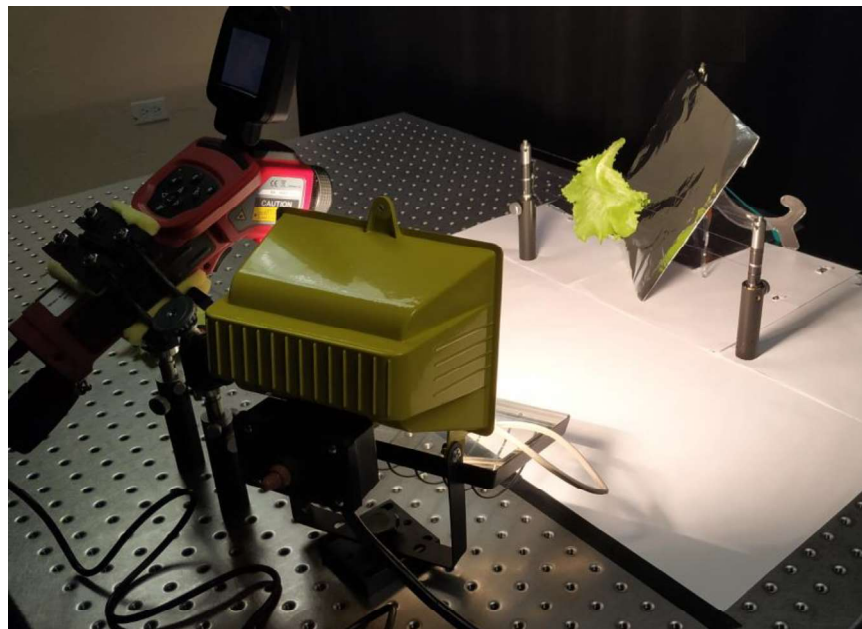


Figura 3.11. Arreglo experimental utilizado en las pruebas.

Ya colocada la hoja de lechuga (muestra), se configuraron los parámetros de la cámara con las condiciones ambientales y de prueba actuales. La emisividad se situó en 0.95, la temperatura ambiental en 23 °C, la humedad al 10% y la distancia menor a 1 m. El programa

de LabVIEW[®] se configuró para un tiempo de encendido de la lámpara de 60 segundos.

Las pruebas realizadas constaron de calentar la muestra durante 60 segundos y tomar una imagen térmica cada siete segundos. Esas imágenes se guardaron en la computadora y con el software que incluye la cámara térmica, SatIrReportStd, se extrajeron los datos y se guardaron en un documento CSV.

Los datos son analizados mediante dos de las técnicas previamente mencionadas. En el siguiente capítulo ambas técnicas son descritas con mayor profundidad, así como los códigos desarrollados en MATLAB[®].

CAPÍTULO IV. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Los datos adquiridos por medio de termografía pulsada pueden ser analizados por diferentes métodos. Existen factores importantes que pueden afectar el análisis y algunos de ellos son las variaciones de emisividad, el calentamiento no uniforme de la superficie y la forma de ésta [42]. La manera en que afectan estos factores depende de la técnica de procesamiento de datos que se implementa.

Algunas técnicas de procesamiento están basadas en el contraste de las zonas del objeto bajo prueba [28]. Estas zonas deben ser de diferente comportamiento térmico y comparan las respuestas del objeto contra el impulso de la fuente. Sin embargo, el procesamiento de datos por contraste es de las técnicas más afectadas por el ruido antes mencionado.

Otra manera de procesar los datos, con menos ruido, es por medio de la reconstrucción de la señal térmica obtenida por medio de una ecuación. El almacenamiento de datos se reduce considerablemente, ya que sólo se utiliza la ecuación para identificar el comportamiento térmico. Con la ecuación establecida, el ruido positivo y negativo se compensan, logrando reducir los distintos tipos de ruidos.

Una de las técnicas para procesar los datos con el menor ruido posible es la termografía de fase pulsada (PPT). Como se mencionó en el capítulo III, la PPT es una fusión que aprovecha las características de la termografía modulada y la termografía pulsada. La PPT entrega imágenes de fase, las cuales son menos insensibles al ruido ambiental, a variaciones de emisividad o de la superficie del objeto. La desventaja de esta técnica es que, al convertir los datos por medio de la transformada de Fourier, la información temporal se pierde, lo cual es importante si se desea recuperar características de los objetos analizados.

4.1 Preprocesamiento de datos en MATLAB®

De las distintas técnicas de procesamiento de señales termográficas se escogieron dos: la reconstrucción de señales térmicas y termografía de fase pulsada. Ambos procesamientos se hicieron después de realizar un preprocesamiento a los datos en MATLAB®. El objetivo

principal del preprocesamiento es importar la información de los archivos que guarda la cámara térmica, reajustarlos para un procesamiento posterior y dar un panorama general de lo que sucederá.

La información se recaba por medio de la cámara termográfica HotFind-D, la cual tiene un software propio para análisis de datos. Ahí mismo, los datos pueden ser exportados en formato CSV (valores separados por coma, por sus siglas en inglés), que contiene 120 renglones con 160 datos cada uno separados por un punto y coma. Por cada imagen térmica, se genera un archivo en este formato.

Se realizó un algoritmo en MATLAB® (ver Anexo A) para el preprocesamiento de datos con el formato anteriormente mencionado. El diagrama de flujo del algoritmo se puede observar en la Figura 4.1, donde el principal objetivo es tener una matriz numérica de $120 \times 160 \times N$, donde N es el número de imágenes capturadas durante la prueba.



Figura 4.1. Diagrama de flujo del preprocesamiento de datos.

Ya con la matriz numérica de la prueba termográfica, una animación en formato GIF (Formato de Intercambio de Gráficos, por sus siglas en inglés) es creada para visualizar la evolución de la temperatura. Para crear el archivo GIF, primero se utiliza la función de MATLAB® llamada *surf(X,Y,Z)*, la cual genera una figura que consta de un arreglo tridimensional donde X y Y definen el tamaño de la imagen y Z es la representación de las

temperaturas de la imagen, tal como se muestra en la Figura 4.2. Después, se guarda la figura mostrada en una variable. El proceso se repite con cada uno de los cuadros térmicos y al final, la variable con todas las imágenes es guardada en la carpeta de los datos como formato GIF.

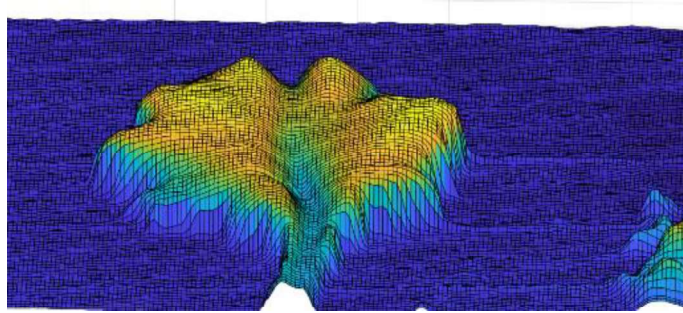


Figura 4.2. Gráfica de las temperaturas de la planta que se forma con la función *surf*.

Para guardar el archivo se utilizó la función *imwrite*, la cual es una función que guarda archivos gráficos ya sean JPEG, PNG, GIF, entre otros. La función de realizar este procedimiento es detectar las zonas que más se calientan y las zonas con comportamiento térmico distinto.

El procesamiento de datos se realiza a todos los píxeles de la imagen, aunque los píxeles de interés son los píxeles de la hoja y para extraerlos se diseñó un algoritmo. Éste crea una imagen de referencia en escalas de grises para diferenciar la hoja y el fondo. Además, las partes de la hoja están mejor definidas que en una imagen de temperaturas. En la Figura 4.3 se muestra la diferencia entre la imagen con las temperaturas y la imagen de referencia.

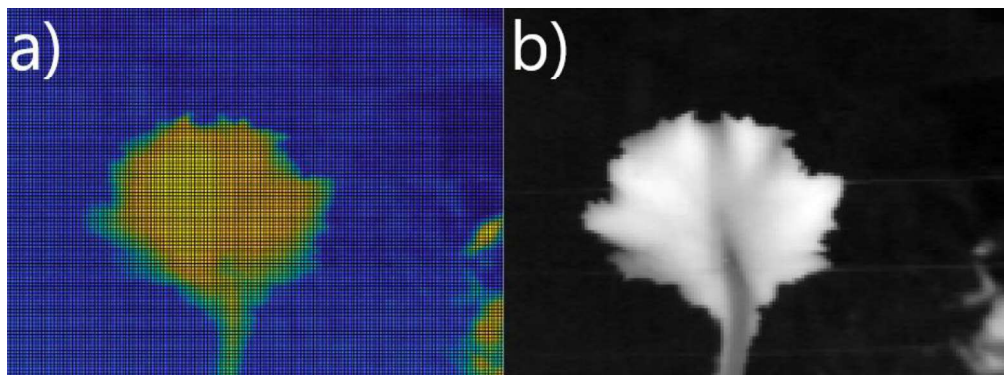


Figura 4.3. Procesamiento de la imagen, a) imagen con distribución de temperaturas, b) imagen de referencia en escala de grises.

Para seleccionar la planta, el proceso es por medio de una selección automática con la imagen de referencia. El primer paso es seleccionar la planta completa con la herramienta *imcrop*. Esta herramienta guarda una nueva imagen con los píxeles seleccionados. Después, la nueva imagen es convertida a una imagen binaria donde la zona de la planta queda en blanco y el fondo en negro.

La herramienta para crear la imagen binaria se llama *imbinarize*, la cual cambia todos los píxeles grises con un valor igual o mayor a 0.5 por un valor de 1 (blanco) y el resto a 0 (negro). Posteriormente, la imagen binaria es multiplicada por la matriz de los datos y todo el fondo de la imagen es eliminado, tal como se muestra en la Figura 4.4.

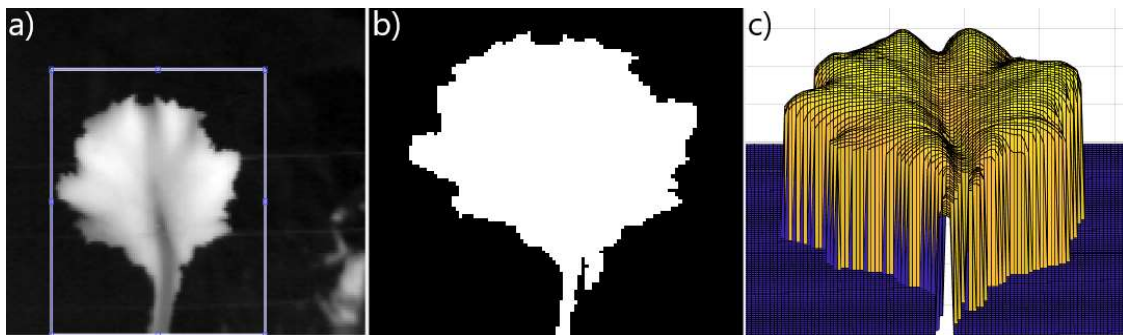


Figura 4.4. Proceso con el cual se seleccionan las temperaturas de la planta, a) selección del área de interés en la imagen de referencia, b) binarización del área de interés y c) distribución de temperaturas de interés, sin información del fondo.

Un promedio ponderado de toda la planta es realizado para determinar un comportamiento de toda la zona. Esto es hecho con cada cuadro del video termográfico y crea una variable con la evolución de la temperatura. Con el preprocesamiento las variables quedan listas para aplicar cualquier método de análisis de termografía. Las dos técnicas propuestas para analizar los datos fueron la reconstrucción de señales térmicas y la termografía de fase pulsada.

4.2 Reconstrucción de señales térmicas

La reconstrucción de señales consiste en aproximar la señal térmica en una ecuación característica que describa el comportamiento. Después, se reconstruye la señal con una disminución de ruido. Con la ecuación analítica el procesamiento de datos es más sencillo y el almacenamiento de éstos se disminuye considerablemente.

Cada objeto tiene una respuesta térmica distinta dependiendo de sus características físicas y ambientales que busca el equilibrio térmico. Por lo tanto, una ecuación propuesta que describe este fenómeno es la Ec (4.1).

$$T = T_a + \Delta T e^{-\alpha t} \quad (4.1)$$

En la ecuación (4.1) T es la temperatura del objeto, T_a es la temperatura ambiental, ΔT es la diferencia entre la temperatura máxima alcanzada por el objeto por el impulso térmico y la temperatura ambiental, α es el coeficiente de temperatura que describe el material y t es el tiempo en segundos.

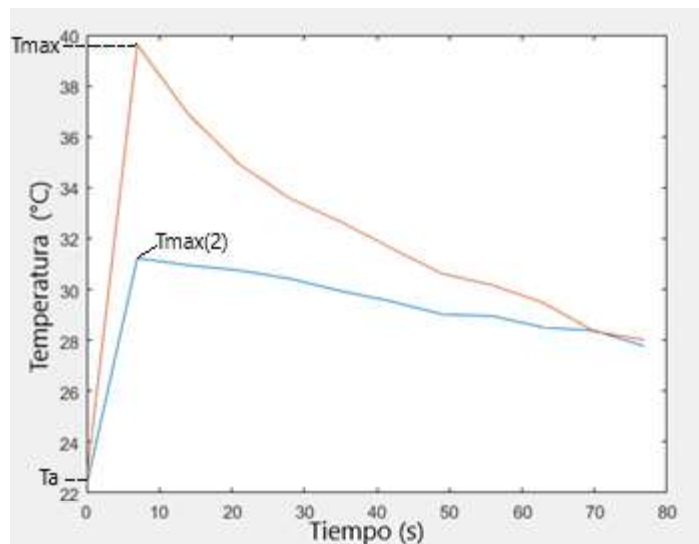


Figura 4.5. Comparativa de dos respuestas térmicas distintas ante el mismo impulso.

De acuerdo con la ecuación (4.1), en la figura anterior se observa dónde la temperatura alcanzada por el impulso térmico, es la temperatura máxima (T_{max}); y cómo al transcurrir el tiempo los objetos buscan el equilibrio, es decir la temperatura ambiente (T_a). La Figura 4.6 también muestra dos respuestas térmicas distintas, una de la hoja de una lechuga y la otra del pecíolo de la misma lechuga.

Al contar con el perfil de temperatura y las temperaturas iniciales de la planta, se puede determinar el coeficiente para definir la ecuación que reconstruya la señal. Para ello, se despeja y resulta la ecuación (4.2).

$$-\alpha t = \ln\left(\frac{T - T_a}{\Delta T}\right) \quad (4.2)$$

El ajuste de señales da como resultado las curvas mostradas en la Figura 4.6, donde se puede observar que la señal tiene compensación de ruido y este disminuye. De esta forma, al almacenar los datos y reconstruirlos se realiza solamente con la ecuación (4.1) para cada pixel, y no la serie de datos del video térmico.

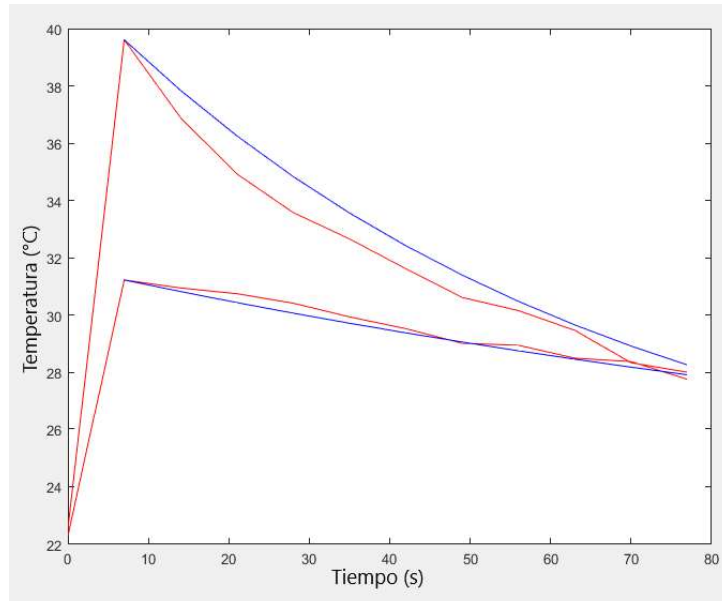


Figura 4.6. Reconstrucción de las señales sin ruido con la ecuación (4.1). Las líneas rojas son las señales originales y las azules son las señales reconstruidas.

Lo que se busca con el análisis por medio de reconstrucción de señales es que cada planta, crecida en condiciones nutricionales específicas, tenga un coeficiente de temperatura α diferente a las demás plantas.

4.3 Termografía de fase pulsada (PPT)

La termografía de fase pulsada se basa en el hecho de que la transformada de Fourier de un impulso térmico es una función escalón de ancho finito. Es decir, que al reproducir un pulso térmico, éste contiene ondas térmicas con todas las frecuencias de modulación [28].

Si adaptamos la ecuación (2.6) del capítulo II, correspondiente a la transformada de

Fourier, puede aplicarse a los pixeles de la imagen de la siguiente manera:

$$F_r(l, m) = \sum_{k=1}^N T(l, m, k) \exp\left(\frac{2\pi jkr}{N}\right) = Re_r(l, m) + jIm_r(l, m) \quad (4.3)$$

En la ecuación (4.3), r es el incremento en la frecuencia, k es el número de cuadro, N es el número total de cuadros, $T(l, m, k)$ es la temperatura del pixel (l, m) , $Re(l, m)$ y $Im(l, m)$ es la parte real e imaginaria de la transformada de Fourier. A partir de esta ecuación, se puede determinar un conjunto de imágenes de fase con la ecuación (4.4).

$$\varphi_r(l, m) = \text{atan}\left(\frac{Im_r(l, m)}{Re_r(l, m)}\right) \quad (4.4)$$

El procesamiento de la PPT se realizó en MATLAB, donde se cuenta con una función especial para adquirir el análisis mencionado. La función es llamada *fft*, la cual devuelve la parte real e imaginaria de las distintas frecuencias. El ángulo de fase se determina posteriormente con la ecuación (4.4), donde se define el comportamiento del objeto ante el impulso térmico. Con la PPT se puede construir una gráfica como se muestra en la Figura 4.7, donde sólo interesan los datos hasta $N/2$, ya que después de eso los datos se repiten.

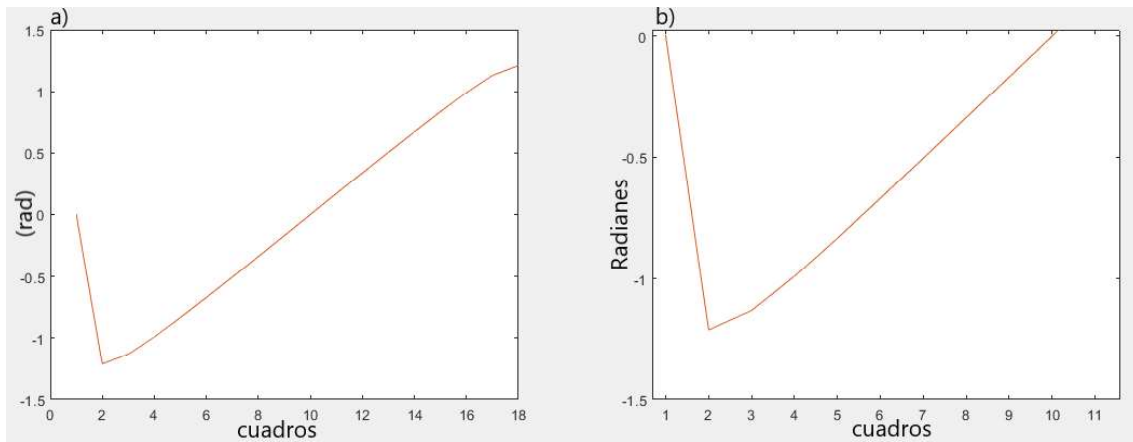


Figura 4.7. Curvas obtenidas por el análisis de termografía de fase pulsada. a) Curva con todas las frecuencias obtenidas. b) Muestra los datos hasta $N/2$.

La PPT define el comportamiento térmico ante un impulso de calor. Un ejemplo se observa en la Figura 4.8a, donde la diferencia de temperaturas entre dos objetos es elevada pero su

respuesta ante el impulso es el mismo. Por lo tanto, genera el mismo patrón de ángulos con la PPT (Figura 4.8b).

Por otra parte, si dos objetos tienen una respuesta térmica distinta ante el impulso de calor, aunque parezcan tener la misma respuesta (ver Figura 4.8c) el patrón de ángulos generados es distinto, tal como se muestra en la Figura 4.8d.

A los datos de la prueba de termografía pulsada se le aplicaron los dos análisis mencionados, así como el preprocesamiento para cada una de las plantas. El código para determinar ambos procesamientos se encuentra en el Anexo B.

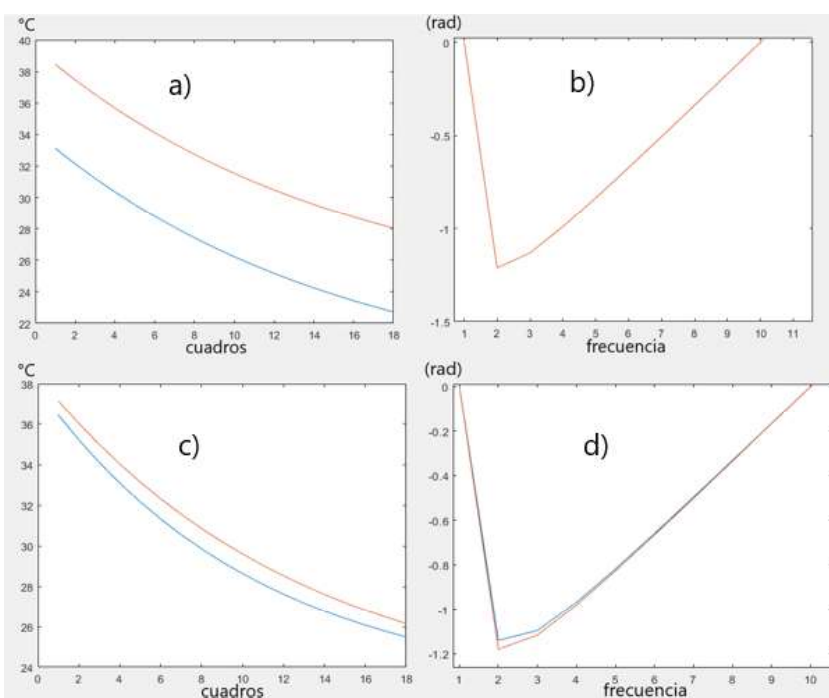


Figura 4.8. Comparativa de respuestas térmicas. La parte a) y b) muestran la respuesta ante un mismo comportamiento térmico. La parte c) y d) contiene dos respuestas térmicas distintas.

En el siguiente capítulo se muestran los resultados arrojados por los dos procesamientos de datos, se incluyen los resultados de los cultivos realizados y se presenta un análisis de los resultados.

CAPÍTULO V. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Durante este capítulo se muestran los resultados obtenidos por los dos métodos de análisis: reconstrucción de señales térmicas y termografía de fase pulsada. De igual manera, se presentan los resultados de los cultivos por medio de hidroponía en las distintas soluciones.

5.1 Resultados

Fueron sembradas lechugas en almácigo donde se tuvo un porcentaje de germinación del 60% y a los 25 días fueron trasplantadas. También se implementó correctamente el sistema de hidroponía para el cultivo de lechugas con soluciones nutritivas. Las plantas crecieron durante 38 días y después fueron cosechadas para las pruebas.

En la Figura 5.1 se muestra el sistema de hidroponía completo donde se cuenta con las 8 soluciones con deficiencias de nutrientes y una solución con nutrientes balanceada. Para mantener los nutrientes con la cantidad de agua correcta, se repuso el agua cada 10 días aproximadamente. Las plantas duraron 38 días en el sistema de hidroponía.



Figura 5.1. Sistema de hidroponía con 15 días de trasplante.

Cuatro concentraciones con deficiencia de nutrientes resultaron tener un impacto muy

agresivo en el crecimiento de las plantas. Las dos versiones de soluciones con deficiencia de fósforo (3.5 y 50%) y calcio (0 y 50%) impidieron que las plantas llegaran a su etapa final y pudieran ser cosechadas.

A las plantas que completaron el ciclo de vida se les hicieron pruebas de termografía pulsada y se analizaron los datos por medio de las dos formas mencionadas en el capítulo IV. Al observar los cambios de temperatura en la planta, se notó que el pecíolo tiene un comportamiento distinto al resto de la hoja como se muestra en la Figura 5.2.

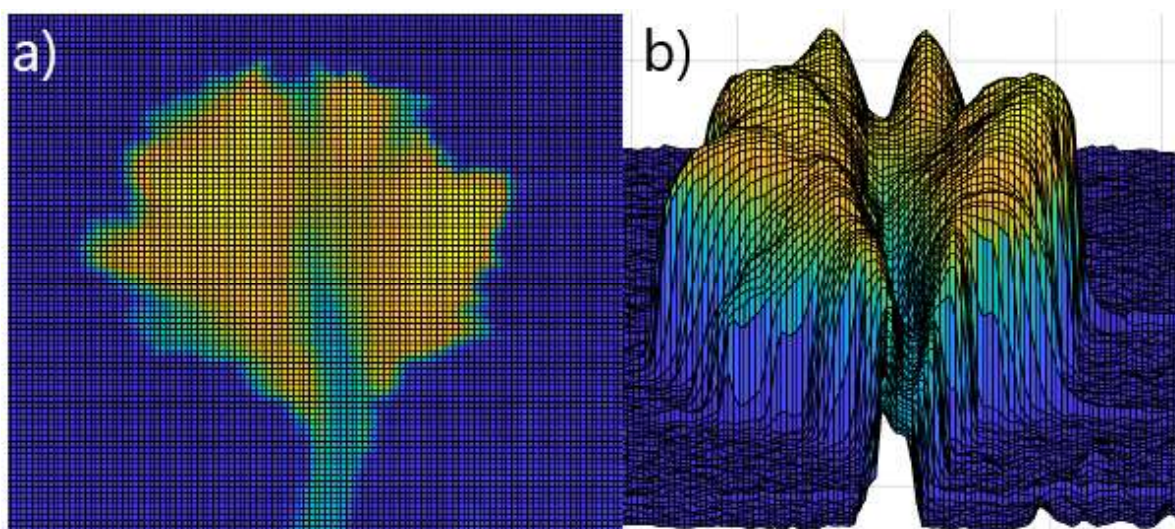


Figura 5.2. Comparativa entre la temperatura del pecíolo y el resto de la hoja. a) Vista frontal. b) Vista semilateral.

Para determinar la importancia del pecíolo en el comportamiento total de la planta se hizo una comparativa con el pecíolo y sin éste. Las pruebas consistieron en crear dos curvas de temperatura de la hoja y aplicar pruebas de PPT.

Tres de las gráficas se exponen en la Figura 5.3, donde el resultado de la comparativa indica que no hay una diferencia que afecte los resultados de la prueba. Y en algunos casos, como en la Figura 5.3c, la diferencia es nula y las curvas se superponen. Por lo tanto, se decidió incluir el pecíolo según la conveniencia del análisis para simplificar el procesamiento de datos.

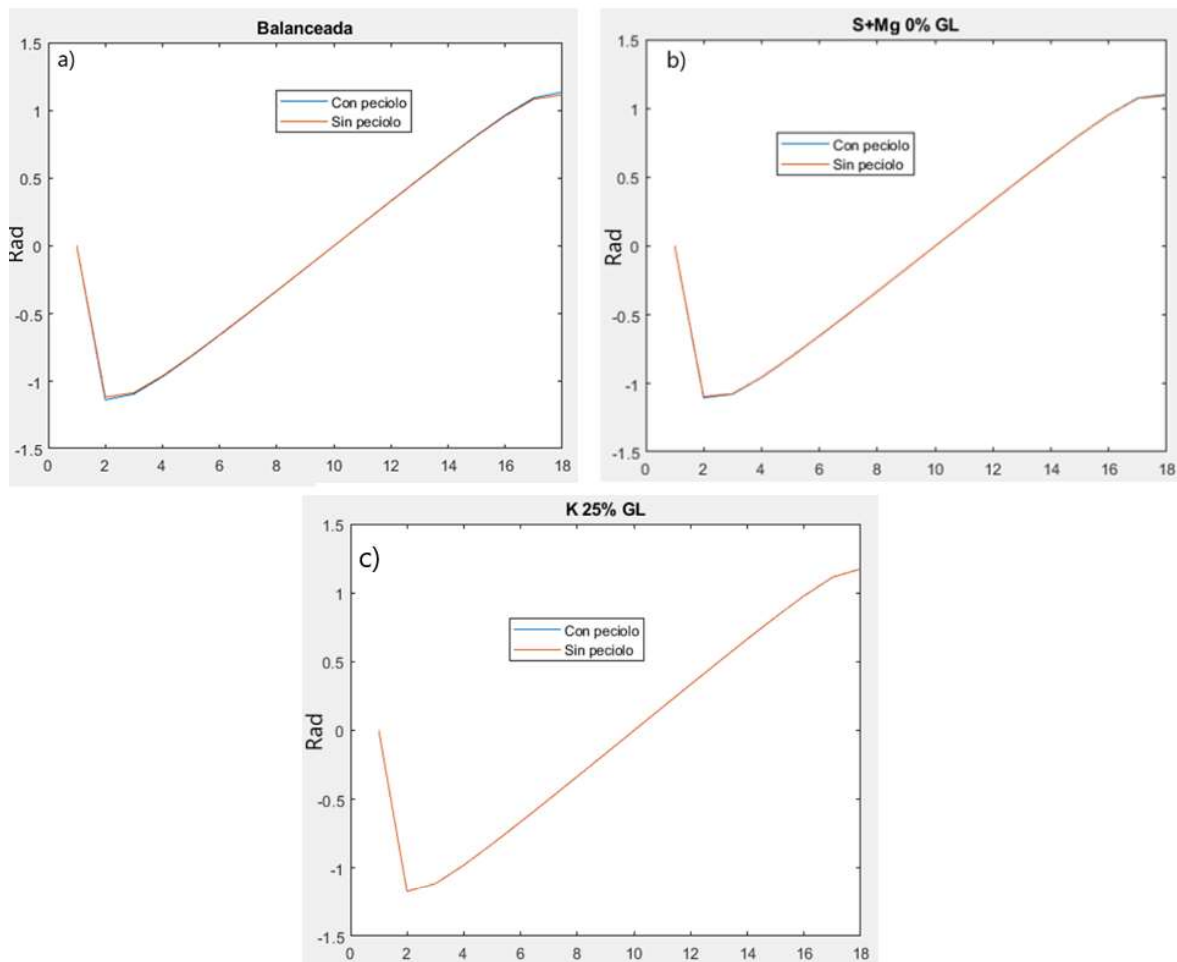


Figura 5.3. Comparativa de la respuesta de temperatura del peciolo y el resto de la hoja. a) Hoja con nutrientes balanceados. b) Hoja con deficiencias de S y Mg. C) Hoja con deficiencia de K.

Algunos análisis incluyeron el peciolo de la planta mientras que en el resto éste fue eliminado por la selección automática. En la Figura 5.4 se pueden observar las partes que fueron tomadas de las plantas para el estudio. Sólo en dos plantas se tomó en cuenta el peciolo para el análisis.

En la Figura 5.5a se muestran los resultados de los coeficientes de temperatura para cada planta. En la Figura 5.5b se observa el incremento de temperatura que tuvo cada planta (la temperatura de las plantas se puede consultar en el Anexo C).

Se puede resaltar que las plantas con mayor incremento en su temperatura tienen un coeficiente de temperatura menor, es decir, el coeficiente de temperatura es inversamente

proporcional al incremento de ésta.

Con estos resultados se pueden observar dos grupos, el primero de ellos consta de un coeficiente de temperatura alto y un incremento en la temperatura menor al resto. Este grupo está conformado por las plantas con nutrientes balanceados y con deficiencia de azufre y magnesio. El otro grupo tiene un coeficiente menor y un crecimiento mayor en la temperatura y está formado por las plantas con deficiencias de potasio.

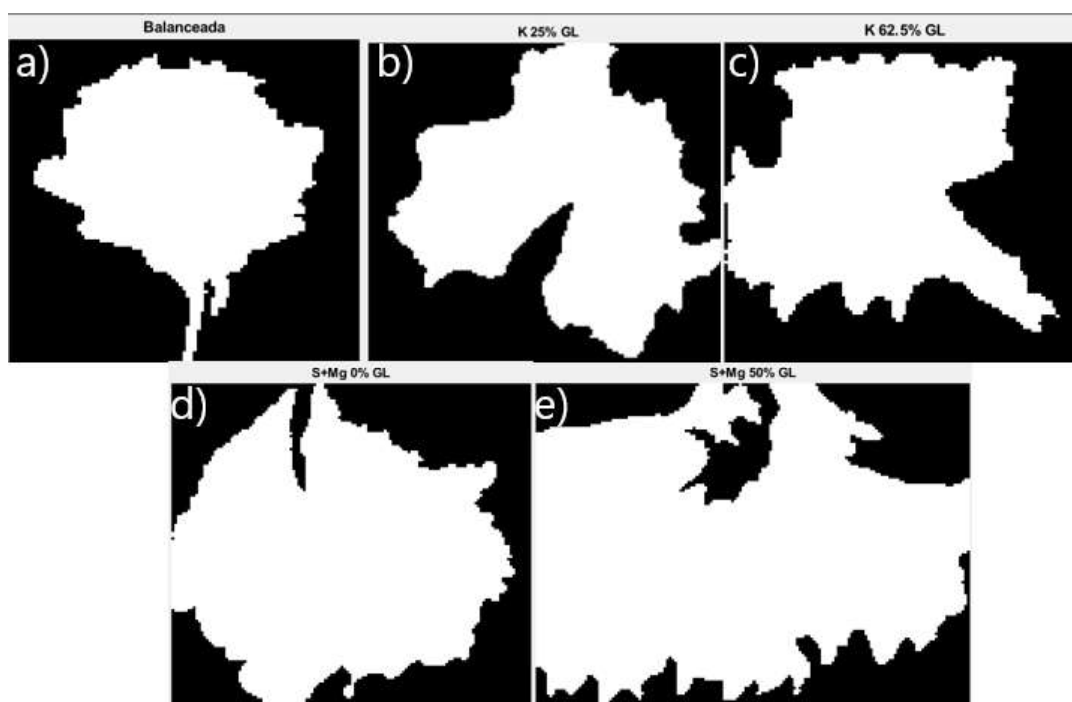


Figura 5.4. Selección automática de la hoja. a) Planta con nutrientes balanceados. La planta b) y c) cuentan con deficiencias de potasio, mientras que la d) y e) tienen deficiencia de azufre y magnesio.

El otro método de análisis, termografía de fase pulsada fue realizado y los resultados son similares. Por este método se determinaron ángulos de fase que representan el comportamiento de la temperatura de las plantas. Los resultados se muestran en la Figura 5.6.

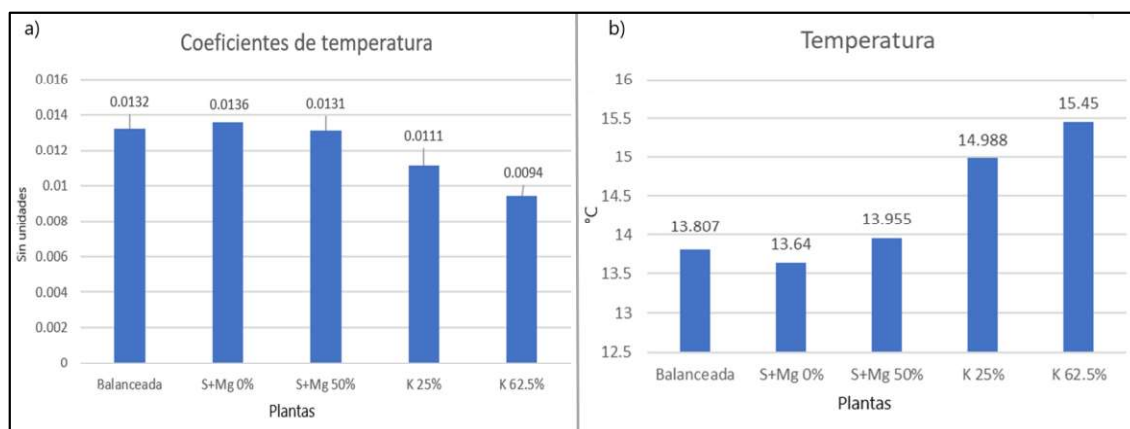


Figura 5.5. Reconstrucción de señales. a) Coeficientes de temperatura adquiridos mediante el método. b) Incremento de temperatura en las plantas debido al impulso térmico.

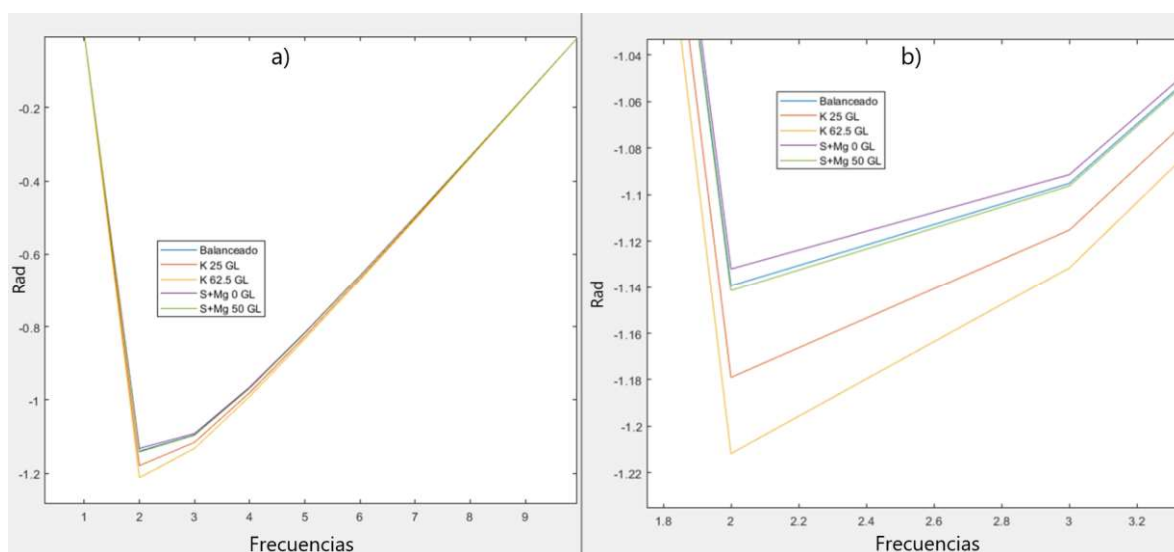


Figura 5.6. Respuesta de la fase de los resultados por PPT. a) Primera parte de los datos (N/2). b) Un acercamiento a las frecuencias 2 y 3.

5.2 Análisis de resultados

La concentración de los nutrientes es muy poca, por lo que la cantidad de nutrientes que se tengan en el momento resultan insuficientes para que haya un cambio en la temperatura. Sin embargo, el impacto de estos nutrientes en el metabolismo de la planta hace que ésta tenga cambios en su absorción y retención del calor.

Aquí el potasio juega un papel fundamental, ya que tiene funciones esenciales para la retención del agua en la planta (la planta se compone principalmente de agua, entre el 90-

95%). Una deficiencia de potasio tiene un cambio en la actividad de estomas, afectando la transpiración del agua, por lo que la retención del agua o la evaporación de ésta es afectada.

Por otra parte, no hay referencias que indiquen que el azufre o magnesio tengan un impacto en la temperatura de las plantas o cambien su metabolismo de manera que afecte su respuesta térmica.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este capítulo se abordan las conclusiones en base a los resultados presentados de la investigación realizada. De igual manera se dan recomendaciones para futuras investigaciones sobre el tema en específico.

6.1 Conclusiones

La concentración de nutrientes en una solución nutritiva suministrada a un cultivo en hidroponía resulta ser en pocas cantidades y no se percibe un efecto en su cambio de temperatura. Sin embargo, esta cantidad de nutrientes alteran el metabolismo generando una respuesta distinta ante la absorción y retención de temperatura. Las pruebas de termografía realizadas muestran una clara diferencia entre dos grupos: las plantas con deficiencias de potasio y el resto de éstas. En ambos casos, el análisis tiene un resultado constante. Con los resultados se puede diferenciar entre una lechuga con deficiencias de potasio y otra con nutrientes balanceados.

El objetivo del proyecto al inicio fue desarrollar un estudio que permita relacionar las características nutricionales de las plantas con la respuesta térmica de ésta. El objetivo fue concretado y sí se pudo hacer una relación en al menos un nutriente. Por otra parte, la hipótesis era que al tener plantas con una deficiencia de ciertos nutrientes en la solución nutritiva administrada se altera la respuesta térmica. En este caso, la hipótesis se acepta parcialmente porque sólo con el potasio se cumple con lo esperado. En cambio, las plantas con deficiencias de azufre con magnesio tienen un comportamiento similar a las lechugas con nutrición balanceada.

Un objetivo secundario pero indispensable para el proyecto fue el realizar un sistema de hidroponía para el crecimiento de lechugas. El objetivo se cumplió correctamente al realizar un sistema de cama flotante donde se crecieron correctamente 5 lotes de lechugas con diferentes concentraciones de nutrientes.

Existen tres nutrientes que se sabe alteran la temperatura: el potasio, el cloro y el silicio.

Sin embargo, el silicio no es considerado un nutriente esencial para las plantas. Por otro lado, el cloro es un micronutriente y el suministro es en pocas cantidades, lo que lo hace difícil de controlar. El potasio fue el único nutriente con el que se pudo trabajar y comprobar. En efecto, al cumplir roles esenciales como la apertura y cierre de estomas que controlan la transpiración del agua de la planta.

El resto de las plantas con deficiencia de fósforo y calcio no pudieron completar su ciclo de vida y no se pudieron realizar pruebas de termografía. El fósforo a través de reacciones químicas contribuye a suministrar energía para los procesos internos de la planta. Estas reacciones químicas ayudan a la transferencia de energía en procesos esenciales para la planta, tal como la fotosíntesis. Por lo tanto, la importancia de los procesos hace que las plantas con deficiencia de fósforo tengan una reducción en su crecimiento y una reducción de hojas [46].

Debido al gran impacto del fósforo en los procesos internos de la planta, una deficiencia del 50% y una reducción más agresiva (3.5% de fósforo) impidieron que las plantas se desarrollaran correctamente y evitó el estudio de las características térmicas.

Por otra parte, el calcio también tiene funciones principales en las plantas: en las paredes celulares, en la actividad de enzimas y la interacción con otros nutrientes. Por lo tanto, está directamente vinculado con el crecimiento de raíces, frutos o brotes. La deficiencia de calcio reduce el aprovechamiento del nitrógeno en las plantas y disminuye la translocación del carbono [47]. Éstas son las razones por las cuales el cultivo de lechugas con deficiencia de calcio no completó el ciclo de vida necesario para las pruebas de termografía.

Otra limitación que se tuvo durante la investigación fue el crecimiento de las lechugas largas. Las condiciones tanto ambientales como nutricionales resultaron ser severas para el crecimiento de estas lechugas y no pudieron desarrollarse por completo. Por lo que hace imposible adquirir información suficiente para ser interpretadas y dar una conclusión.

6.2 Recomendaciones y trabajo futuro

La primera recomendación se hace referente al tiempo de cultivo de las lechugas. Éstas se pasaron del almácigo al trasplante de hidroponía a los 25 días de edad. Las pruebas se

realizaron 34 días después del trasplante. Se considera que las pruebas pudieron tomarse al menos 15 días antes, ya que el impacto de la deficiencia de nutrientes a esa edad afecta la planta y tienen un tamaño suficiente para realizar las pruebas. A esos días (alrededor de 15 días después del trasplante) se tenía lechugas de todas las soluciones nutritivas y de las dos variedades, además contaban con deficiencias notorias en su coloración y tamaño comparadas con otras plantas. Por lo tanto, se pudieron tomar las muestras antes y tomar pruebas de las plantas faltantes.

Otra recomendación al momento de realizar las pruebas, es sobre la captura de imágenes térmicas. Se recomienda que se establezca un número de imágenes capturadas para todas las pruebas y no variar ese número. Ya que, al realizar pruebas de termografía de fase pulsada, los resultados cambian dependiendo de N (total de imágenes capturadas). Al momento de analizar los datos, los resultados fueron afectados y se tuvo que hacer una corrección en los datos y ajustar a un número específico.

Como futuros trabajos se recomienda concentrarse en los resultados de este trabajo y hacer estudios más profundos sobre la deficiencia de potasio. Una opción viable es hacer nuevas pruebas con lechugas con diferentes concentraciones de potasio y aplicar las técnicas de termografía.

REFERENCIAS

- [1] H. C. J. Godfray *et al.*, “Food Security : The Challenge of Feeding 9 Billion People,” *Science*, vol. 327, no. February, pp. 812–819, 2010.
- [2] M. Quintero-Angel and A. González-Acevedo, “Tendencies and challenges for the assessment of agricultural sustainability,” *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 254, pp. 273–281, 2018.
- [3] R. T. Furbank and M. Tester, “Phenomics - technologies to relieve the phenotyping bottleneck,” *Trends in Plant Science*, vol. 16, no. 12, pp. 635–644, 2011.
- [4] H. J. Butler, S. Adams, M. R. McAinsh, and F. L. Martin, “Detecting nutrient deficiency in plant systems using synchrotron Fourier-transform infrared microspectroscopy,” *Vibrational Spectroscopy*, vol. 90, pp. 46–55, 2017.
- [5] A. V. Barker and D. J. Pilbeam, *Handbook of Plant Nutrition*, 1st ed., vol. 117. CRC Press, 2007.
- [6] G. Guzmán, “Hidroponía en casa: una actividad familiar,” *Ministerio de Agricultura y Ganadería*, vol. 1. San José C.R., p. 25, 2004.
- [7] J. Beltrano and D. Gimenez, *Cultivo en hidroponía*, vol. 1. La Plata: Editorial de la Universidad de La Plata, 2015.
- [8] N. Jamil and S. K. Bejo, “Husk Detection Using Thermal Imaging Technology,” *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, vol. 2, pp. 128–135, 2014.
- [9] A. Manickavasagan, D. S. Jayas, and N. D. G. White, “Thermal imaging to detect infestation by *Cryptolestes ferrugineus* inside wheat kernels,” *Journal of Stored Products Research*, vol. 44, no. 2, pp. 186–192, 2008.
- [10] Y. Huang, R. Lu, and K. Chen, “Prediction of firmness parameters of tomatoes by portable visible and near-infrared spectroscopy,” *Journal of Food Engineering*, vol.

- 222, pp. 185–198, 2018.
- [11] R. Yang and Y. He, “Optically and non-optically excited thermography for composites: A review,” *Infrared Physics and Technology*, vol. 75, pp. 26–50, 2016.
 - [12] E. M. Yahia, A. Carrillo-lópez, G. M. Barrera, and M. Queijeiro Bolaños, “Chapter 3. Photosynthesis,” in *Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables*, E. M. Yahia, Ed. Woodhead Publishing, 2019, pp. 47–72.
 - [13] D. Baron, A. C. E. Amaro, F. G. Campos, C. S. F. Boaro, and G. Ferreira, “Plant Physiological Responses to Nutrient Solution: An Overview,” in *Plant Metabolites and Regulation under Environmental Stress*, 1st ed., P. Ahmad and M. Ahanger, Eds. Academic Press, 2018, pp. 415–425.
 - [14] M. Kumar Sharma, “An introduction to plant nutrition,” in *Nutrient Deficiencies of Field Crops: Guide to Diagnosis and Management*, 1st ed., P. Kumar and M. Kumar Sharma, Eds. CABI Publishing, 2014, pp. 1–8.
 - [15] D. López-Arredondo, L. Sánchez-Calderón, and L. Yong-Villalobos, “Molecular and Genetic Basis of Plant Macronutrient Use Efficiency: Concepts, Opportunities, and Challenges,” in *Plant Macronutrient Use Efficiency: Molecular and Genomic Perspectives in Crop Plants*, 1st ed., M. A. Hossain, T. Kamiya, D. J. Burritt, L.-S. Phan Tran, and T. Fujiwara, Eds. Academic Press, 2017, pp. 1–29.
 - [16] P. Kumar, “How to Identify Plant Nutrient Deficiencies in Field Conditions,” in *Nutrient Deficiencies of Field Crops: Guide to Diagnosis and Management*, 1st ed., P. Kumar and M. Kumar Sharma, Eds. CABI Publishing, 2014, pp. 9–22.
 - [17] R. Munson, “Principles Of Plant Analysis,” in *Handbook of Reference Methods for Plant Analysis*, Y. P. Kalra, Ed. CRC Press, 1998, pp. 1–24.
 - [18] H. G. Jones, “Application of Thermal Imaging and Infrared Sensing in Plant Physiology and Ecophysiology,” *Advances in Botanical Research*, vol. 41, pp. 107–163, 2004.

- [19] B. Kümmerlen, S. Dauwe, D. Schmundt, and U. Schurr, "Thermography to Measure Water Relations of Plant Leaves," in *Handbook of computer vision and applications: systems and applications*, 1st ed., B. Jähne, Ed. ACADEMIC PRESS, 1999, pp. 763–781.
- [20] K. Omasa, F. Hosoi, and A. Konishi, "3D lidar imaging for detecting and understanding plant responses and canopy structure," *Journal of Experimental Botany*, vol. 58, no. 4, pp. 881–898, 2007.
- [21] I. Leinonen and H. G. Jones, "Combining thermal and visible imagery for estimating canopy temperature and identifying plant stress," *Journal of Experimental Botany*, vol. 55, no. 401, pp. 1423–1431, 2004.
- [22] R. L. Hays, "The thermal conductivity of leaves," *Planta (Berl.)*, vol. 125, no. 3, pp. 281–287, 1975.
- [23] M. S. Jayalakshmy and J. Philip, "Thermophysical Properties of Plant Leaves and Their Influence on the Environment Temperature," *International Journal of Thermophysics*, vol. 31, pp. 2295–2304, 2010.
- [24] J. F. Buyel, H. M. Gruchow, N. Tödter, and M. Wehner, "Determination of the thermal properties of leaves by non-invasive contact-free laser probing," *Journal of Biotechnology*, vol. 217, pp. 100–108, 2016.
- [25] H. Nilsson, "Remote Sensing and Image Analysis in Plant," *Annual Review of Phytopathology*, vol. 15, pp. 489–527, 1995.
- [26] W. Ross McCluney, *Introduction to Radiometry and Photometry*, 1st ed. Artech House, 1994.
- [27] J. L. Suárez Castañeda, A. A. Amell Arieta, and F. J. Cadavid Sierra, "La radiación infrarroja como mecanismo de transferencia de calor de alta calidad en procesos de calentamiento," *Ingeniería y Ciencia*, vol. 8, no. 16, pp. 97–127, 2012.

- [28] J. C. Ramírez, “Detección y Reconstrucción de Defectos Subsuperficiales en 3-D mediante el Resumen”, Tesis de doctorado, Centro de Investigaciones en Óptica, A.C., 2011.
- [29] G. J. Tattersall, “Infrared thermography: A non-invasive window into thermal physiology,” *Comparative Biochemistry and Physiology, Part A*, vol. 202, pp. 78–98, 2016.
- [30] G. F. Monnier, “A review of infrared spectroscopy in microarchaeology: Methods, applications, and recent trends,” *Journal of Archaeological Science: Reports*, vol. 18, no. 2352–409X, pp. 806–823, 2018.
- [31] S. Bagavathiappan, B. B. Lahiri, T. Saravanan, J. Philip, and T. Jayakumar, “Infrared thermography for condition monitoring - A review,” *Infrared Physics and Technology*, vol. 60, pp. 35–55, 2013.
- [32] A. Koschan, P. Govindasamy, S. Sreenivas, D. Page, and M. Abidi, “Thermal Modeling and Imaging of As-built Vehicle Components,” *Military Vehicles*, vol. 219, pp. 1–10, 2006.
- [33] Y. Zhu *et al.*, “A design of multi-mode excitation source for optical thermography nondestructive sensing,” *Infrared Physics and Technology*, vol. 94, no. August, pp. 23–31, 2018.
- [34] X. Maldague and S. Marinetti, “Pulse phase infrared thermography,” *Journal of Applied Physics*, vol. 79, no. 5, pp. 2694–2698, 1996.
- [35] C. Meola and G. M. Carlomagno, “Application of infrared thermography to adhesion science,” *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 20, no. 7, pp. 589–632, 2006.
- [36] C. Ibarra-Castanedo and X. P. Maldague, “Review of pulse phase thermography,” *Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXVII*, vol. 9485, no. 94850T, pp. 1–10, 2015.

- [37] F. Weritz, R. Arndt, M. Röllig, C. Maierhofer, and H. Wiggensauser, "Investigation of concrete structures with pulse phase thermography," *Materials and Structures*, vol. 38, no. November, pp. 843–849, 2005.
- [38] C. Ibarra-Castanedo, N. P. Avdelidis, and X. P. Maldague, "Quantitative pulsed phase thermography applied to steel plates," *Proc. SPIE, Thermosense XXVII*, vol. 5782, no. March, 2005.
- [39] S. J. Tao, Z. W. Yang, G. Tian, and W. Zhang, "Determination of temperature sequence length in pulse phase thermography," *Infrared Physics and Technology*, vol. 72, pp. 210–220, 2015.
- [40] M. Ishikawa, H. Hatta, Y. Habuka, R. Fukui, and S. Utsunomiya, "Detecting deeper defects using pulse phase thermography," *Infrared Physics and Technology*, vol. 57, pp. 42–49, 2013.
- [41] P. Baranowski, W. Mazurek, B. Witkowska-Walczak, and C. Sławiński, "Detection of early apple bruises using pulsed-phase thermography," *Postharvest Biology and Technology*, vol. 53, pp. 91–100, 2009.
- [42] C. Ibarra-Castanedo, D. González, M. Klein, M. Pilla, S. Vallerand, and X. Maldague, "Infrared image processing and data analysis," *Infrared Physics and Technology*, vol. 46, no. 1–2, pp. 75–83, 2004.
- [43] R. Arndt, C. Maierhofer, and M. Röllig, "Quantitative Phase-Thermography for Masonry and Concrete Structures," *European Conference on NDT*, vol. 149, pp. 1–8, 2006.
- [44] M. Baslam, I. Garmendia, and N. Goicoechea, "Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) improved growth and nutritional quality of greenhouse-grown Lettuce," *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 59, pp. 5504–5515, 2011.
- [45] "Crops", *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, 2018. [Online]. Available: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>. [Accessed: 19-may-2020].

- [46] C. A. Sanchez, “Phosphorus,” in *Handbook of Plant Nutrition*, A. V. Barker and D. J. Pilbeam, Eds. Yuma, 2007, pp. 51–90.
- [47] D. J. Pilbeam and S. M. Philip, “Calcium,” in *Handbook of Plant Nutrition*, A. V. Barker and D. J. Pilbeam, Eds. Leeds, 2007, pp. 121–144.

ANEXOS

Anexo A. Código de MATLAB® del preprocesamiento de datos

```
clearvars
X1=(0:17)*7;

fprintf('Selecciona la carpeta de los archivos\n');
myFolder=uigetdir(); %Obtiene la ruta de los archivos

%Verifica si la carpeta existe
if ~isfolder(myFolder)
    errorMessage=sprintf('Error: La carpeta %s no existe',myFolder);
    uiwait(warndlg(errorMessage));
    return;
end

%Obtiene una lista con los archivos del formato especificado
filePattern=fullfile(myFolder, '*.csv');
theFiles=dir(filePattern);
i=length(theFiles);
format='%s%s';

fprintf('Inicio de lectura de datos\n');
for j=1:i
    baseFileName=theFiles(j).name;
    fullFileName=fullfile(myFolder,baseFileName);
    %fprintf('%s\n',baseFileName);

    f=fopen(fullFileName);
    tx=textscan(f,format,'ReturnOnError',false);
    tx=cat(2,tx{:});
    fclose(f);

    arrVd(:, :, j)=separate(tx);
    newM(:, :, j)=NuevaImagen(arrVd(:, :, j));
end
fprintf('Carga exitosa de datos\n');

fprintf('Selecciona la zona de la planta\n');
figure
[Icrop, rect]=imcrop(ImG);
close;

bw=imbinarize(Icrop);
Ifill=imfill(bw, 'holes');
Iarea = bwareaopen(Ifill,100);

for i=1:size(arrVd,3)
    Xt(:, :, i)=imcrop(arrVd(:, :, i),rect);
end
```

```
Tot=sum(sum(Iarea));
for i=1:size(arrVd,3)
    XTot(:,:,i)=Xt(:,:,i).*Iarea;
    xSum(i,1)=sum(sum(XTot(:,:,i)));
end
xT=xSum/Tot;
figure
%-----guarda gif-----
%Define los ejes
surf(newM(:,:,1));
%zmin=min(min(min(newM)))-3;
%zmax=max(max(max(newM))+3;
%zlim([zmin,zmax])
zlim auto;
width=160;
height=120;
x=0; %0.4;
y=90;%73.2;
axis ([0 width 0 height])
view(x,y)
%Obtiene la imagen de la grafica
h=getframe;
[A,map]=rgb2ind(h.cdata,256);
A(:,:,1,j)=0;
%Nombramos el archivo
filename='Secuencia.gif';
[sx,sy,sz]=size(h.cdata);

for j=1:i
    surf(newM(:,:,j))
    %    zlim([zmin,zmax])
    zlim auto;
    axis ([0 width 0 height])
    view(x,y)
    g=getframe;
    %compara las dimensiones del arreglo base y el actual, si son distintos
    %ajusta el actual
    [sxx,syy,szz]=size(g.cdata);
    if sx==sxx && sy==syy
        A(:,:,1,j)=rgb2ind(g.cdata,map);
    else
        if sx > sxx
            g.cdata(sx,:)=g.cdata(sx-1,:);
        end
        if sx < sxx
            g.cdata(sxx,,:)=[];
        end
        if sy > syy
            g.cdata(:,sy,:)=g.cdata(:,sy-1,:);
        end
        if sy < syy
            g.cdata(:,syy,:)=[];
        end
    end
end
```

```
        A(:, :, 1, j) = rgb2ind(g.cdata, map);
    end
end
%Guarda el gif
imwrite(A, map, fullfile(myFolder, filename), 'DelayTime', 1, 'LoopCount', inf)
fprintf('GIF guardado con éxito\n');

%-----Funciones-----
function arrVideo = separate(Tx)
    %Separa los datos y los crea un arreglo de tipo doble
    for k = 1:120
        chr = char(Tx(k));
        chr = strrep(chr, ',', ';');
        newChr = strrep(chr, ';;', ';Null;');
        str = strsplit(newChr, ';');
        temp = str2double(str);
        tarray(k, :) = temp;
    end

    %Verifica si hay valores nulos en el arreglo y los reemplaza
    for l = 1:120
        for m = 1:160
            if isnan(tarray(l, m))
                if l == 1 || m == 1
                    tarray(l, m) = tarray(l, m+1);
                else
                    tarray(l, m) = tarray(l, m-1);
                end
            end
        end
    end
    arrVideo = tarray;
end

%-----
function NewM = NuevaImagen(Z)
    for k = 1:120
        for l = 1:160
            NewM(k, l) = Z(121-k, l);
        end
    end
end
```

Anexo B. Código de los métodos de análisis

```
[Ta,dT,cT]=coef(xT);
for k=1:18
    Te(k,:)=Ta+dT*exp(-cT(1)*X1(k));
end
Res=fft(Te);

for i=1:18
    Angulos(i,:)=atan(imag(Res(i))/real(Res(i)));
end

figure
plot(1:18,Angulos)
xlim([0 19])
ylim([-1.5 1.5])
figure
plot(X1,Te)

Temp=xT(1);
x1=1;
for i=1:18
    Temp(i+1,:)=Te(i);
    x1(i+1,:)=i+1;
end

figure,plot(x1,Temp)
```

```
%-----Funciones-----
function [Tmin,Td,pz]=coef(X)
    X1=(0:(size(X,1)-2))*7;
    x1=X;

    Tmax=max(x1);
    Tmin=min(x1);
    Td=Tmax-Tmin;
    x1(1)=[];
    lnT=log(abs(x1-Tmin)/Td);
    n=size(lnT,1);
    if lnT(n)==Inf || lnT(n)==-Inf
        lnT(n)=[];
        X1(n)=[];
    end
    for k=1:size(lnT,1)
        y1(k)=lnT(k);
    end
    pz=polyfit(X1,y1,1);
    pz=-pz;
    lnT=-lnT;
end
```

Anexo C. Temperatura promedio de las plantas

Anexo C.1. Tabla de las temperaturas promedio (°C) de cada planta.

Balanceada	K 25 GL	K 62.5 GL	S+Mg 0 GL	S+Mg 50 GL
22.6	22.1	17.7	22.2	25.5
36.4	37.1	33.1	35.9	39.5
35.2	36.0	32.1	34.1	38.3
34.1	35.0	31.2	32.9	37.1
33.1	34.0	30.4	31.7	36.1
32.2	33.1	29.6	30.7	35.2
31.3	32.3	28.8	29.8	34.3
30.5	31.6	28.1	28.9	33.6
29.8	30.8	27.4	28.2	32.9
29.2	30.2	26.8	27.5	32.2
28.6	29.6	26.2	26.9	31.6
28.1	29.0	25.7	26.4	31.1
27.6	28.5	25.2	25.9	30.6
27.2	28.0	24.7	25.5	30.2
26.8	27.6	24.2	25.1	29.8
26.4	27.2	23.8	24.7	29.4
26.1	26.8	23.4	24.4	29.0
25.8	26.5	23.1	24.1	28.7
25.5	26.1	22.7	23.9	28.5