

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PARA LA DETECCIÓN DEL ÁREA FOLIAR EN PLANTAS

CRISTIAN MANUEL AGUDELO RESTREPO

Universidad de Cundinamarca
Ingeniería electrónica
Facultad de ingeniería
Fusagasugá, Colombia
2016

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PARA LA DETECCIÓN DEL ÁREA FOLIAR EN PLANTAS

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar por el título de ingeniero electrónico

Cristian Manuel Agudelo Restrepo

Director:

MSc. EDGAR EDUARDO ROA GUERRERO

Co-director:

MSc. HUMBERTO NUMPAQUE LÓPEZ

Asesores:

MSc. PEDRO LUIS CIFUENTES

MSc. CRISTINA MENDOZA FORERO

Línea de investigación:

Software, sistemas emergentes y nuevas tecnologías

Universidad de Cundinamarca

Ingeniería electrónica

Facultad de ingeniería

Fusagasugá, Colombia

2016

*Dedico esta investigación a mi familia.
A mis hijos Andrew D' Mathren Y Damian D' Mitrick
A mis padres, Roberto Y Carolina
A mi esposa, Angie Carolina
Y a todos aquellos que aportaron un granito de arena para
hacer posible este proyecto de vida, eternamente agradecido*

Agradecimientos

“Agradezco especialmente al gestor de esta investigación, a un gran apasionado por la academia y la enseñanza, a un director incondicional, gracias por invertir tanto de su parte en esta investigación, por dedicar su tiempo en el laboratorio y en la casa, por invertir dinero para hacer todo posible y por siempre estar presto a corregir mis errores enseñándome a sortear dificultades que se presentan en el camino, espero que estos lazos perduren y avancen en el tiempo, como colegas y grandes amigos”

Edgar Roa

“Agradezco enormemente a mi esposa, gracias a ti logre culminar un gran eslabón de mi etapa académica, gracias por sacrificar tu tiempo para que yo cumpliera una de mis metas más importante (aunque aún nos falta crear la fábrica que hemos pensado), gracias por haberme regalado dos fuentes de inspiración, esos dos chiquitines que nos hacen tan felices día a día”

Angie Carolina

“Papi y mami, sin ustedes esto nunca hubiera sido posible, gracias por respetar mi decisión de ser Ingeniero Electrónico y por apoyarme incondicionalmente a pesar de las adversidades, gracias por siempre haber creído en mí y por brindarme una crianza ejemplar desde mi niñez”

Roberto Agudelo & Carolina Restrepo

“Gracias a un compañero, amigo y compadre, que siempre me brindó su apoyo como si fuese mi hermano, gracias por todos los momentos agradables que vivimos en ese proceso formativo y más que eso gracias por esa amistad tan sincera”

Jhonatan Bonilla

“Estoy altamente agradecido con todos mis docentes de pregrado ya que sin la ayuda y enseñanza de cada uno, hoy en día, esta investigación no fuese una realidad, todos influyeron de manera constructiva en mí”

Resumen

Este proyecto de investigación hace parte de un proceso interdisciplinario entre los grupos de investigación “BioGuavio” y “Giteinco” apoyados por la convocatoria interna para el fortalecimiento de grupos de investigación de la Universidad de Cundinamarca. Esta propuesta se planteó debido a que en el laboratorio de Fisiología vegetal de la Universidad de Cundinamarca no se cuenta con un equipo que permita la medición del área foliar en plantas de manera automatizada, esta medición se realiza empleando métodos indirectos los cuales tienden a diferir mucho de la medida real, por esto se diseñó e implemento un sistema capaz de realizar este proceso mediante procesamiento digital de imágenes haciendo uso de Matlab.

La metodología para el desarrollo de este proyecto consto básicamente en realizar una contextualización de la investigación, definir los criterios y restricciones del sistema, diseñar el sistema de visión artificial, implementar el sistema físico y luego el lógico, por ultimo proceder con las respectivas pruebas de funcionamiento para realizar las calibraciones necesarias. .

El sistema de adquisición empleo una cámara Web Logitech de 3 megapíxeles que se ajustó para una resolución de 640x480, con el objetivo de reducir el tamaño de las imágenes permitiendo mayor velocidad en el procesamiento. El sistema de iluminación se realizó empleando cinta led, la cual se redimensiono y ordeno para evitar rebosamientos de iluminación en la imagen. La estructura se elaboró en láminas cold rolled y el vidrio empleado tenía la característica de ser antireflectivo.

El sistema desarrollado no requirió el uso de filtros para su funcionamiento, por el contrario, estos filtros generaron desviaciones en la medida real. La muestra de estudio, consistió en 40 hojas de 4 especies diferentes (Limón, naranjo, almendro, mango), todas bajo las mismas condiciones de captura, estas imágenes estaban en formato RGB y se segmento aplicando Otsu. Con estas muestras se obtuvo que el sistema implementado presenta una correlación del 99,47 % respecto al método manual de conteo de cuadrícula y una tasa de clasificación del 95%, lo cual cumple con lo esperado, aunque a futuro se espera que el sistema identifique diferentes características de la hoja.

Contenido

Resumen	12
Introducción.....	18
1. Capítulo 1 Justificación	20
2. Capítulo 2: Marco teórico.....	21
2.1. La hoja.....	21
2.1.1. Hojas simples.....	23
2.1.2. Hojas compuestas	24
2.1.3. Fotosíntesis	25
2.2. Análisis del crecimiento en plantas	26
2.3. Percepción visual.....	27
2.4. Imágenes digitales	28
2.4.1. Propiedades de las imágenes digitales	29
2.4.2. Tipos de archivo	29
2.4.3. Resolución	30
2.4.4. Ruido en la imagen	30
2.4.5. Profundidad de color	31
2.5. Tipos de imagen	32
2.5.1. Imagen binaria	32
2.5.2. Imagen en escala de grises.....	33
2.5.3. Imagen a RGB	34
2.5.4. Imagen indexada	36
2.6. Hardware de adquisición.....	37
2.7. Procesamiento digital de imágenes	38
2.7.1. Adquisición y representación de imágenes	38
2.7.2. Pre-procesado y eliminación de contornos.....	40
2.7.3. Filtrado y realzado	41

2.7.4.	Conversión a otros espacios de color	43
2.7.5.	Segmentación	45
2.7.6.	Extracción de características	46
3.	Capítulo 3. Métodos y materiales	47
3.1.	Método gráfico: Conteo de cuadrícula	47
3.2.	Método de la balanza analítica	50
3.3.	Método implementado con procesamiento de imágenes	51
3.3.1.	Definición de criterios y restricciones del sistema	52
3.3.2.	Diseño del sistema de visión artificial	54
3.3.3.	Implementación del sistema físico	55
3.3.4.	Implementación de algoritmos para el procesamiento de imágenes	57
3.3.5.	Pruebas de funcionamiento	61
4.	Capítulo 4. Análisis de resultados	64
	Realización de pruebas funcionales y de desempeño del sistema integrando cada uno de los módulos de visión artificial	64
4.1.	Resultados de las hojas de almendro	64
4.2.	Resultados de las hojas de almendro	66
4.3.	Resultados de las hojas de naranja	68
4.4.	Resultados de las hojas de mango	70
4.5.	Resultados del proceso de clasificación	72
5.	Conclusiones	74
	Bibliografía	75

Índice de figuras

Figura 1. Funciones básicas de las hojas	21
Figura 2. Partes y características de las hojas.....	22
Figura 3. Diversas formas de las hojas	23
Figura 4. Hojas simples.....	24
Figura 5. Hojas compuestas.....	25
Figura 6. Proceso de la fotosíntesis.....	25
Figura 7. Etapas de la fotosíntesis	26
Figura 8. Índices de crecimiento.....	27
Figura 9. Etapas de la percepción visual.....	28
Figura 10. Ejemplo de un pixel en una imagen	29
Figura 11. Imagen con diferentes resoluciones	30
Figura 12. Ruidos aplicados a una imagen RGB.....	31
Figura 13. Imagen binaria.....	33
Figura 14. Imagen en escala de grises.....	33
Figura 15. Imagen RGB.....	34
Figura 16. Cubo de colores RGB.....	35
Figura 17. Ejemplos de otros espacios de color a partir del RGB.....	36
Figura 18. Imágenes indexadas con diferentes valores	36
Figura 19. Cámara web y cámara lp.....	37
Figura 20. Imagen adquirida y sección de interés	38
Figura 21. Aumento de contraste a una imagen en escala de grises.....	40
Figura 22. Detección de bordes a imagen en escala de grises.....	41
Figura 23. Imagen sin ruido con filtro average.....	42
Figura 24. Imagen con ruido y sus respectivos filtros average.....	42
Figura 25. Imagen con ruido gaussiano y posterior filtrado.....	43
Figura 26. Formato de color HSV y sus respectivos componentes.....	43
Figura 27. Espacio de color YIQ y sus respectivos componentes.....	44
Figura 28. Espacio de color YCbCr y sus respectivos componentes.....	45
Figura 29. Segmentación de una imagen médica	45
Figura 30. Hoja calcada en papel milimetrado	48
Figura 31. Conteo de cuadrícula.....	48
Figura 32. Sumatoria del área total	49
Figura 33. Recorte a la hoja	50
Figura 34. Balanza analítica	51

Figura 35. Etapas llevadas a cabo para el proceso investigativo.....	52
Figura 36. Características de materiales y tamaños del sistema de adquisición	53
Figura 37. Diseños esquemáticos de partes del sistema de adquisición.....	54
Figura 38. Diseños en 3D empleando el software Solid Edge.....	55
Figura 39. Pasó a paso de la realización del montaje.....	56
Figura 40. Distribución de la iluminación en la parte inferior de la caja empleando software Gimp.....	56
Figura 41. Sistema real capturado en el laboratorio.....	57
Figura 42. Procesamiento de la imagen sin filtros	58
Figura 43. Clasificación de las hojas trabajadas	60
Figura 44. Primeras imágenes con poca iluminación.....	61
Figura 45. Imagen adquirida por el sistema.....	61
Figura 46. Imagen procesada con el código sin filtros	62
Figura 47. Capturas con iluminación mejorada	62
Figura 48. Imágenes originales y procesadas de limón.....	64
Figura 49. Validación con el método manual de las hojas de limón	65
Figura 50. Validación con el método balanza analítica de las hojas de limón	66
Figura 51. Imágenes originales y procesadas de almendro.....	66
Figura 52. Validación con el método manual de las hojas de almendro	67
Figura 53. Validación con el método balanza analítica de las hojas de almendro	68
Figura 54. Imágenes originales y procesadas de almendro.....	68
Figura 55. Validación con el método manual de las hojas de naranja	69
Figura 56. Validación con el método balanza analítica de las hojas de naranja	70
Figura 57. Imágenes originales y procesadas de mango.....	70
Figura 58. Validación con el método manual de las hojas de naranja	71
Figura 59. Validación con el método balanza analítica de las hojas de mango.....	72
Figura 60. Porcentajes de clasificación de las 40 hojas procesadas.....	73

Índice de tablas

Tabla 1. Tamaños de archivos.....	29
Tabla 2. Comparación de algunos formatos de archivo empleado con imágenes.....	30
Tabla 5. Matriz de la sección de interés en gris.....	39
Tabla 6. Requerimiento funcional 1.....	53
Tabla 7. Requerimiento no funcional 1.....	53
Tabla 8. Cámaras propuestas para realizar la investigación.....	54
Tabla 9. Comparación de algoritmos con y sin filtros.....	63
Tabla 10. Hojas de limón comparadas con los diferentes métodos.....	65
Tabla 11. Hojas de almendro comparadas con los diferentes métodos.....	67
<i>Tabla 12. Hojas de naranja comparadas con los diferentes métodos.....</i>	<i>69</i>
Tabla 13. Hojas de mango comparadas con los diferentes métodos.....	71

Introducción

En la actualidad, diversos procesos agroambientales son investigados en diferentes laboratorios e instituciones a nivel mundial como (MINAGRICULTURA, 2016), (ORGANIZACION DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACION Y LA AGRICULTURA, 2012), (UNIVERSIDAD DEL VALLE, 2016) y (UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID, 2016), entre otras, uno de estos procesos, es el estudio del crecimiento de las plantas mediante la medición del área foliar, sin embargo, existen avances científicos y tecnológicos para realizar esta medida, como por ejemplo los desarrollados por la empresa española LI-COR (LI-COR, 2016), esta magnitud de área foliar es la que define la capacidad para captar la radiación fotosintética activa con lo cual la planta realiza la elaboración de tejidos y compuestos alimenticios para su propio desarrollo.

Hoy en día existen métodos manuales, semiautomáticos y automáticos para la medida del área foliar, como los desarrollados por (Stephen, 2007) en el 2007, el sistema permitió realizar el reconocimiento y clasificación de plantas de manera automatizada usando redes neuronales probabilísticas, para el 2009 se emplearon sistemas semiautomáticos haciendo uso de un software CAD (Rico-García, 2009) en el cual se emplearon líneas de referencia para la calibración de la medida. Otra investigación en el 2011 utilizó el software Matlab (Shivling, 2011) con el cual se realizó la medición automática del área foliar, los resultados se compararon con el método de conteo de cuadrícula, en este mismo año se implementaron algoritmos basados en los momentos de invarianza (Zalikhha, 2011), con los cuales se extrajeron diversidad de características que podía ser empleadas en posteriores análisis. En el año 2012 se realizó una investigación para determinar el color del fondo sobre el cual se colocaría la hoja y el vidrio que aplanaría la misma, este proyecto se desarrolló con el software ImageJ (Rincon Guerrero, Olarte Quintero, & Perez Naranjo, 2012) el cual genera el área de manera semiautomática, para este mismo año se desarrollaron nuevos avances al emplear un scanner digital (Mahdi, 2012), debido a la gran precisión de captura de la imagen con el que este cuenta, otro avance se debió a la búsqueda de nuevos algoritmos rápidos y precisos (Piyush, 2012), para esto emplearon otro espacio de color como es Cielab. En el 2013 se unieron dos técnicas muy importantes (Kulkarni, 2013) que son los momentos de Zernike y las redes neuronales de base radial probabilística cada una realizando su función en extracción de características y en el proceso de clasificación, en el año 2014 se realizó la segmentación de hojas empleando la componente del tono haciendo uso del

formato HSI (Lin, Wu, Chen, & Si, 2014), esta segmentación funcionó con un índice de error muy bajo, los últimos avances en el tema de la medición del área foliar se están enfocando en sistemas móviles principalmente en celulares con sistema operativo Android.

Sin embargo, en Colombia y en el caso particular de los laboratorios de fisiología vegetal de la Universidad de Cundinamarca, la medición del área foliar es realizada de forma manual por parte de un técnico experto y el resultado final de la medición, depende de la inspección visual y la experiencia, ocasionando errores sistémicos durante el proceso que afecta la confiabilidad y repetitividad de los resultados.

El principal objetivo de esta investigación fue el desarrollo de una herramienta computacional que permitió cuantificar el área foliar de plantas, a través de un sistema de visión artificial basado en técnicas de procesamiento de imágenes empleando el software MatLab.

1. Capítulo 1 Justificación

El área foliar de una hoja es la que permite captar radiación fotosintética activa, por lo tanto, entre mayor sea su área, mayor será su capacidad de captación, esto le permitirá al árbol una mejor elaboración de tejidos para su propio desarrollo y crecimiento, de igual manera dependiendo de la energía obtenida por el sol es que el árbol procesa sus compuestos alimenticios absorbidos principalmente del suelo. Para el hombre, el correcto desarrollo de las hojas toma importancia cuando se destaca que son una excelente fuente de alimentación, también el proceso de fotosíntesis llevadas por las hojas permite la oxigenación del planeta y es un indicador del buen crecimiento de una planta.

Actualmente en la Universidad de Cundinamarca, este proceso es realizado de forma manual mediante un procedimiento tedioso, complejo y subjetivo que proporcionan errores en la medición añadiendo situaciones indeseadas que hacen que no siempre sea certero, debido a que se pueden presentar errores en el análisis inherente al procedimiento. Aunque este examen se realiza por parte de un técnico experto, depende solamente de la inspección visual y la experiencia de éste. Además, las largas jornadas de evaluación sobre hojas de papel milimetrado o cortes precisos de la hoja para ser pesada en la balanza de precisión pueden provocar en el especialista fatiga visual, lo que dificulta aún más su trabajo y por consiguiente la confiabilidad y repetitividad de los resultados. Por esta razón, se desarrolló una herramienta computacional para identificar el área foliar de plantas, como soporte al análisis realizado por expertos.

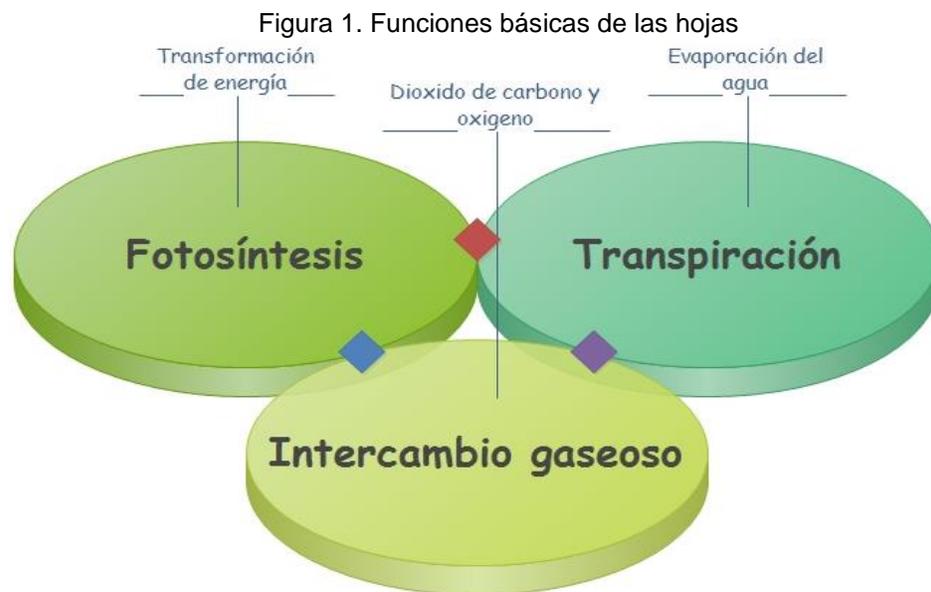
Este proyecto contribuye a un proceso investigativo y exploratorio en la búsqueda de sistemas de apoyo para que los estudiantes y docentes vinculados a los laboratorios de fisiología vegetal de la Universidad de Cundinamarca, cuenten con una herramienta para la medición del área foliar capaz de soportar los análisis de crecimiento en plantas, disminuyendo la cantidad de errores subjetivos producidos por los técnicos expertos, disminuyendo así los tiempos de análisis y mejorando la repetitividad en los resultados, los cuales presentan altos índices de varianza entre observadores.

2. Capítulo 2: Marco teórico

2.1. La hoja

La hoja es un órgano vegetativo, generalmente verde, plano y delgado que se encarga de realizar el proceso de la fotosíntesis (Universidad de los Andes, 2003). Las hojas son las encargadas de engalanar los arboles teniendo como objetivo principal recibir la luz del sol, a esto se debe que casi siempre su orientación está en un ángulo respecto al recorrido del sol, brindándole la capacidad al árbol de realizar todos los procesos necesarios para su propia existencia. Las hojas se encuentran unida a las ramas por medio del peciolo y son fundamentales para la vida, ya que esta realiza un papel vital en la generación del oxígeno.

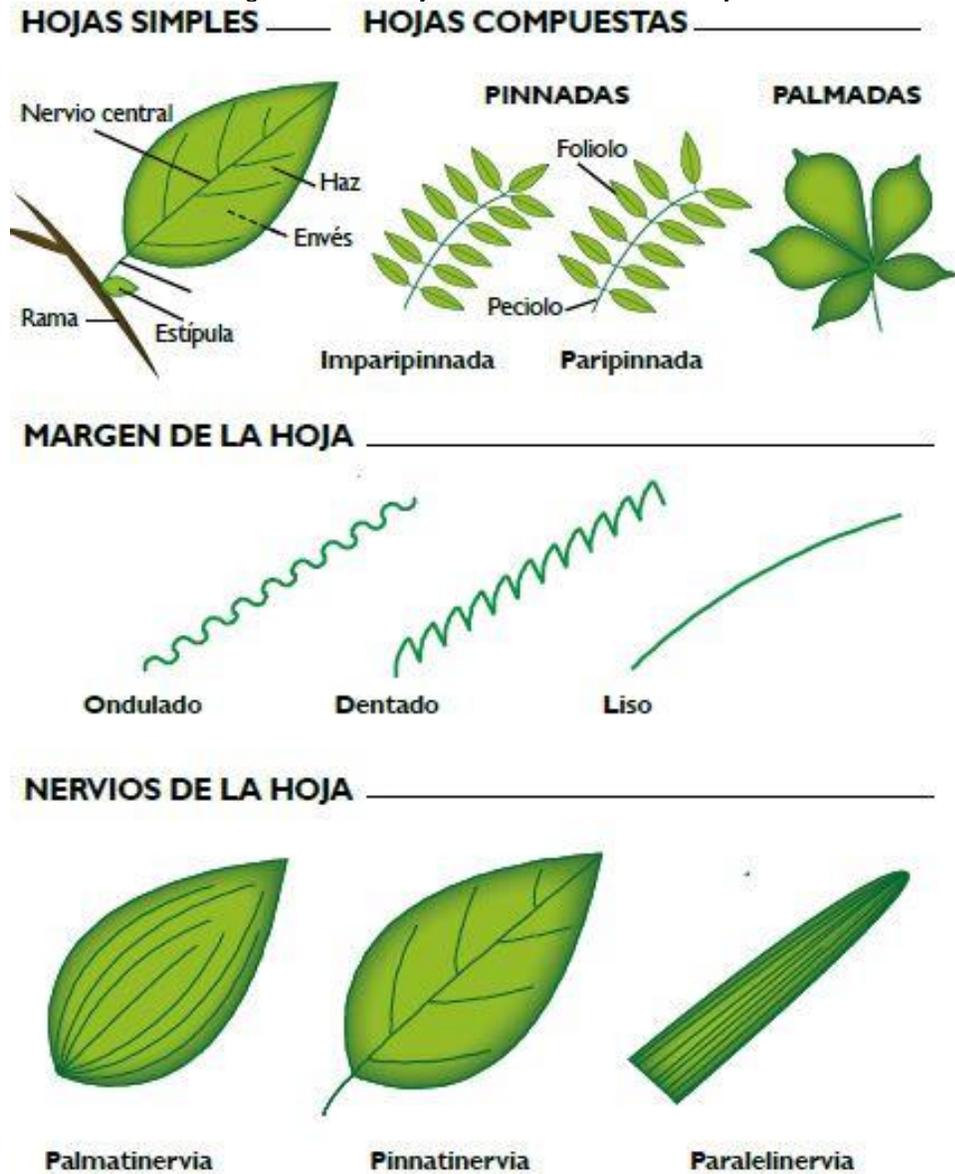
❖ Las funciones básicas de las plantas son:



Fuente: Autores

Se destaca de igual manera que existen hojas que son alimento directo y nutritivo para los seres humanos como lo son la acelga, lechuga, col, apio, espinaca, entre otras (Perez, 2010). También se destaca el hecho de que la calidad del fruto depende en gran parte del área foliar total con el que cuente un árbol. Las hojas se divide en dos grandes categorías que son: hojas simples y hojas compuestas. Estos dos tipos de hojas cuentan con características compartidas como lo son su margen o borde y el tipo de nervios al interior de las mismas, esto se observa en la figura 2.

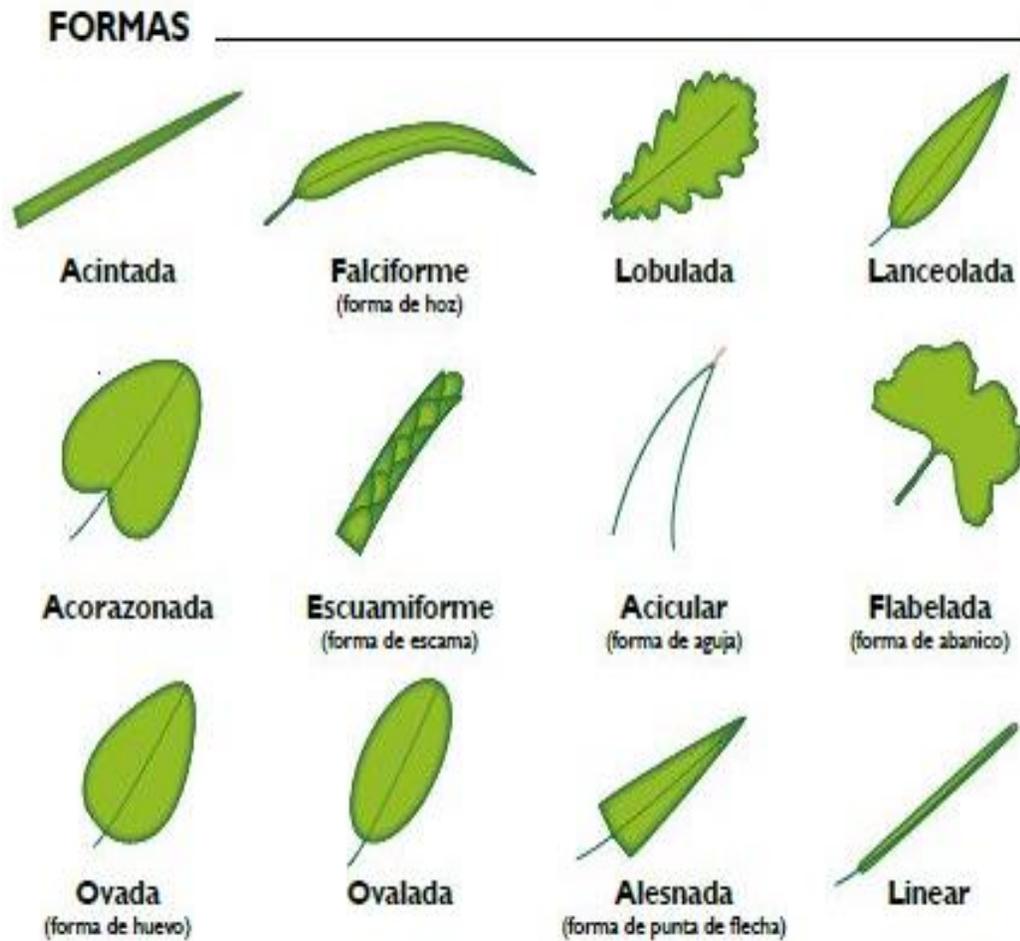
Figura 2. Partes y características de las hojas



Fuente: (Real jardín botánico, CSIC, 2010)

También existe otra característica muy importante en las hojas que es su forma. Esta característica sirve para realizar la clasificación entre algunos tipos de hojas con formas diferentes, ya que para saber exactamente a qué clase de árbol pertenecen un tipo de hoja cualquiera es necesario saber muchas más características como lo es el color, excentricidad, perímetro, nervaduras, textura, entre otras. En la figura 3 se pueden observar diversas formas de las hojas.

Figura 3. Diversas formas de las hojas



Fuente: (Real jardín botánico, CSIC, 2010)

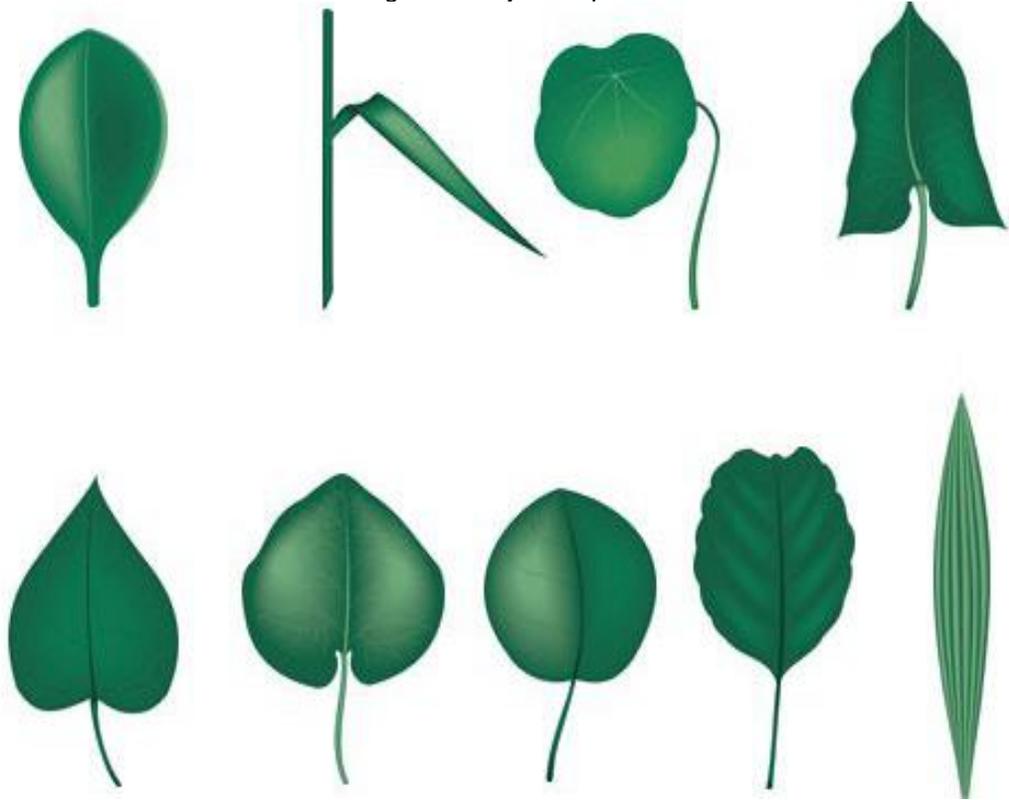
2.1.1. Hojas simples

Las hojas simples se caracterizan por tener una sola lamina foliar, estas se subdividen en:

- ✓ Entera: Incisión igual al 0%
- ✓ Hendida: Incisión mayor al 50%
- ✓ Partida: Incisión menor al 50%
- ✓ Sectada: Cuando la incisión es casi del 100%

A continuación en la figura 4 se muestran ejemplos de algunas imágenes de hojas simples.

Figura 4. Hojas simples



Fuente: (pinterest, 2016)

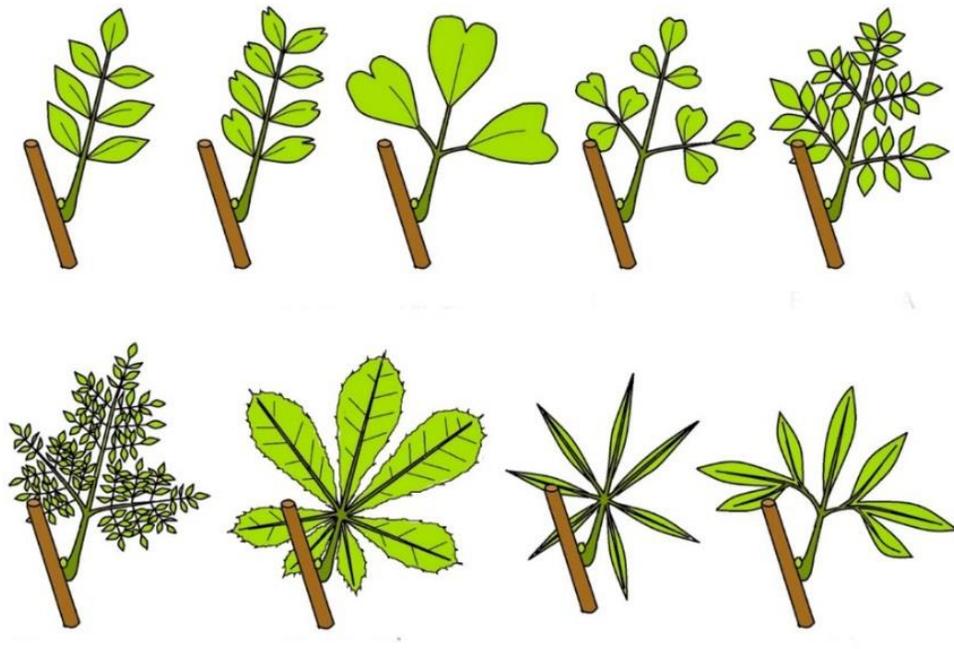
2.1.2. Hojas compuestas

Las hojas compuestas presentan una sola lámina foliar que se divide en varios folíolos, nombre con el cual se le conocen a estas divisiones. Estas hojas se pueden clasificar según la disposición de los folíolos en:

- **Palmeadas o palmaticompuestas:** todos los folíolos vienen del interior al exterior de su base. Estas se subdividen según sus folíolos en:
 - ✓ Binadas: dos folíolos
 - ✓ Ternadas: tres folíolos
 - ✓ Quinadas: cinco folíolos
 - ✓ Digitadas: más de cinco folíolos

A continuación en la figura 5 se pueden ver algunas imágenes de hojas compuestas:

Figura 5. Hojas compuestas

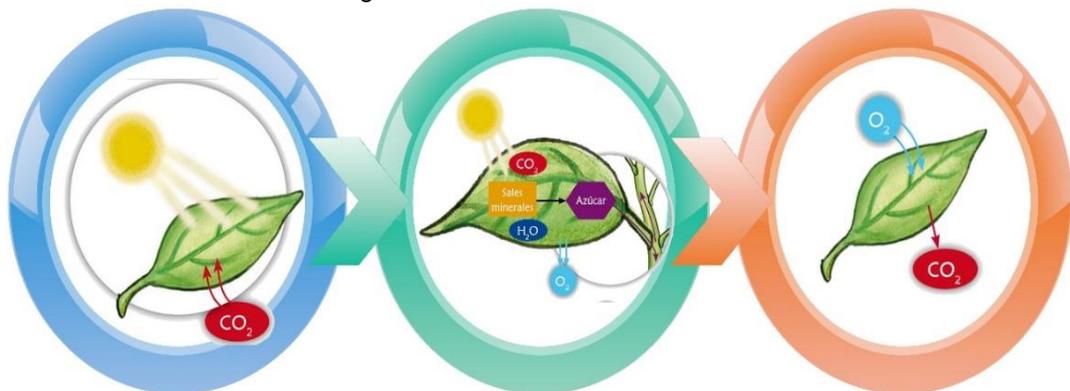


Fuente: (Iglesias Garrote, 2015)

2.1.3. Fotosíntesis

La fotosíntesis, es una de las funciones más importantes que realiza una planta, de esta manera es que se producen los carbohidratos, los cuales son la base de la productividad para su propio mantenimiento (Lissarrague, Baeza, & Sanchez de Miguel, 2010).

Figura 6. Proceso de la fotosíntesis



Fuente: Tomado y adaptado de (Real jardín botánico, CSIC, 2010)

Físicamente, la fotosíntesis se divide en 3 etapas teniendo como base principal la absorción de la energía lumínica como se puede observar en la figura 6. Para el hombre la mayor importancia de este proceso es el papel que este juega en la producción de alimento y oxígeno (Bidwell, 1993). En la figura 7 se muestran los pasos del proceso de transformación de energía que realiza la planta en su interior.

Figura 7. Etapas de la fotosíntesis

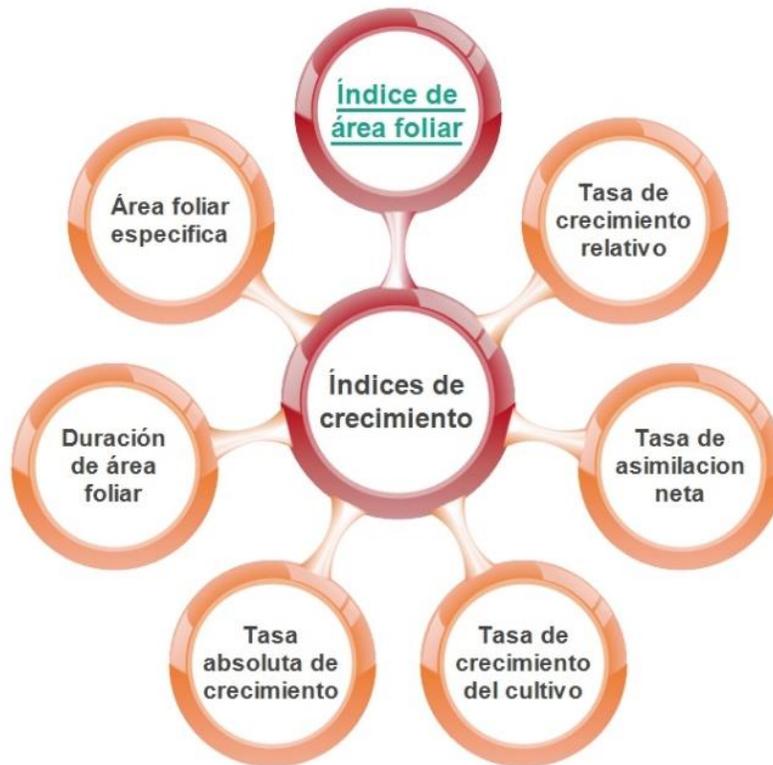


Fuente: Tomado y adaptado de (Bidwell, 1993)

2.2. Análisis del crecimiento en plantas

El crecimiento en plantas es un incremento en el tamaño de las mismas, tanto en hojas, como también en el tallo, llegando ocasionalmente a cambiar de forma, este es un proceso fisiológico muy complejo que depende de diversos factores como la fotosíntesis, la respiración, cantidad de nutrientes en el suelo, entre otros (Barrera, Suarez, & Melgarejo, 2010). En la figura 8 se muestran los índices de crecimiento, los cuales son muy importantes para conocer comportamientos en el crecimiento de las plantas, tanto en el presente como también en el futuro realizando proyecciones de crecimiento.

Figura 8. Índices de crecimiento



Fuente: Autores

Existen estudios como el realizado en el Amazonas (Hernandez G, Casas F, Martinez W, & Galvis V, 1995) donde realizaron medidas de área foliar y se analizaron los índices de crecimiento para un árbol de maraco. Este tipo de estudios son los que motivan nuevas investigaciones en el tema, por lo cual es conveniente emplear alguna de las dos metodologías existentes para realizar el análisis de crecimiento en plantas, aunque el más destacado es el análisis funcional, debido a que este presenta algunas ventajas sobre el método clásico. Las ventajas del método funcional es que no requiere de datos de otra cosecha y toma datos de un número pequeño de plantas en intervalos de tiempo frecuentes, lo cual es muy útil a la hora de realizar estudios partiendo de este tipo de resultados arrojados, ahorrando tiempo y dinero, lo cual es muy importante para los agricultores e investigadores.

2.3. Percepción visual

La percepción visual es tal vez el sentido más importante de los seres humanos, brindado la capacidad de ubicación e información de características de los objetos en el espacio como son su estructura dimensional, tonalidad, textura, entre otras muy importantes para poder aprender o reconocer el tipo de objeto que se encuentre frente a nosotros empleando el sistema cognitivo (Molina, 2001) para procesar la información, este sistema cuenta con percepción sensorial, memoria, atención, interpretación, entre otras. El sentido de la visión emplea $\frac{1}{4}$ del córtex cerebral, esto demuestra la importancia de este sentido en los humanos. En la figura 9 se muestran las etapas de la percepción visual iniciando por la formación de imágenes y terminando con la interpretación de la imagen.

Figura 9. Etapas de la percepción visual



Fuente: Tomada y adaptada de (Lira, 1995)

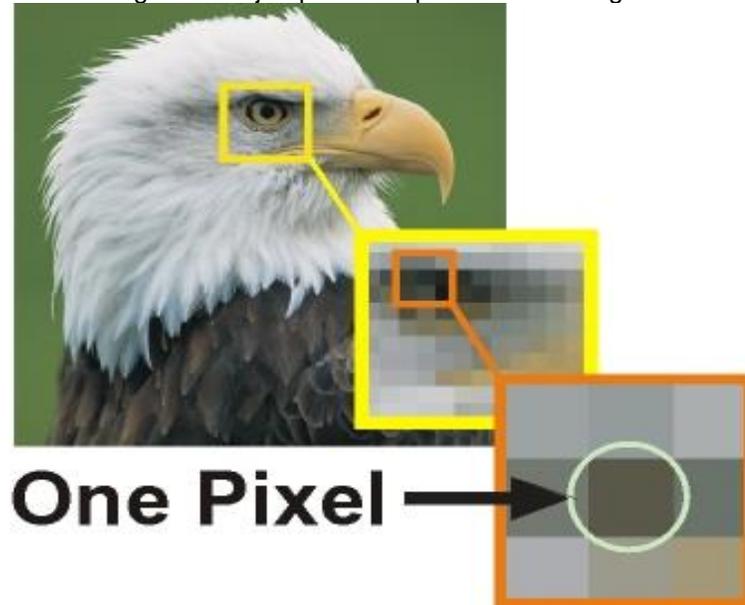
2.4. Imágenes digitales

Una imagen digital es un archivo electrónico que se forma por un conjunto de píxeles ordenados sistemáticamente en una matriz con un determinado número de filas y columnas, donde cada píxel tiene un valor según el espacio de color que se esté empleando. Entre mayor sea la matriz con la que se represente una imagen, mayor es su tamaño, pero no siempre es mayor su calidad (Rodríguez, 2003). Así mismo la imagen digital es una representación obtenida del mundo real por medio de un equipo de captura o elaborada en un software de diseño, representada por valores estándares de color, pero que siempre es convertido a lenguaje de máquina. Por ejemplo en el formato RGB se emplean 3 componentes de color (rojo, verde, azul), cada uno de estos componentes se trabaja por separado tomando un rango por píxel de 0 a 255 (Universidad de Oslo, 2008), este modelo se puede ver más adelante en la figura 15.

El píxel es la mínima expresión con la que cuenta una imagen digital es por eso que cuando se realiza un procesamiento de imágenes se debe recorrer todas las

filas y columnas buscando las diferencias entre pixeles bien sea para modificarlo o eliminarlo. En la figura 10 se observa la definición grafica de un pixel.

Figura 10. Ejemplo de un pixel en una imagen



Fuente: (Gallo, 2015)

2.4.1. Propiedades de las imágenes digitales

Las imágenes digitales cuentan con diversidad de propiedades destacando su espacio de color, resolución, iluminación, tamaño de archivo, entre otras propiedades de gran importancia. A continuación se presenta la tabla 1 donde se muestran los valores en bits y bytes, con sus respectivos nombres.

Tabla 1. Tamaños de archivos

Nombre	Tamaño	Tamaño en Bytes
bit	1 bit	-
Byte	8 bits	1
Kilo Byte	1.024 Bytes	1.024
Mega Byte	1.024 K Bytes	1.048.576
Giga Byte	1.024 M bytes	1.073 millones

Fuente: Tomado y adaptado de (Rodriguez, 2003)

2.4.2. Tipos de archivo

Existe una gran cantidad de tipos de archivos que varía según la calidad requerida, la aplicación y el software empleado. A continuación en la tabla 2 se muestran ejemplos (Ordoñez Santiago, 2005) de algunos tipos de archivos:

Tabla 2. Comparación de algunos formatos de archivo empleado con imágenes

Formato	Profundidad de color	Modos de color	Canales alfa	Compresión
BMP (.bmp)	1 bit: blanco y negro; 4-8 bits: Escala de grises; 8 bits: Color Indexado; 24 bits: color RGB	RGB, Color Indexado, Escala de Grises, Mapa de Bits	no	si RLE en 4 y 8 bits
TIF (.tif)	32 bits	Mapa de bits, color indexado, escala de Grises, RGB	si	si (LZW)
GIF (.gif)	8 bits (256 colores)	Mapa de bits, Color indexado, RGB	no	si (LZW)
JPEG (.jpg; .jpe)	24 bits	Escala de Grises, RGB, CMYK	no	Si: con perdidas
PNG (.png)	24 bits	RGB, Color Indexado, Escala de Grises, Mapa de Bits	si	si: sin perdidas

Fuente: Tomado y adaptado de (Ordoñez Santiago, 2005)

2.4.3. Resolución

La resolución es una medida que comúnmente se da en pixeles por pulgadas, esta medida describe en gran parte la calidad del hardware de adquisición, ya que a mayor resolución mayor es su definición (Rodríguez, 2003), por ejemplo una cámara de 20 megapíxeles captura imágenes con 20 millones de pixeles. En la figura 11 se muestran diferentes resoluciones para una misma imagen.

Figura 11. Imagen con diferentes resoluciones



Fuente: (Visión Fotográfica, 2011)

2.4.4. Ruido en la imagen

El ruido en una imagen es una variación de carácter aleatoria que genera distorsiones a la realidad de la imagen cambiando de valores los pixeles originales. Existen múltiples ruidos, pero también existen múltiples causas para

esto, el ruido se pueden originar en momento de captura de la imagen, en el momento de la transmisión o realizando el proceso de impresión. La fuente de ruido más común en la captura de imágenes, es la iluminación ya que casi siempre presenta puntos de sobre iluminación o rebosamientos. En la figura 12 se muestran algunos de los ruidos más comunes que se encuentra en imágenes y fotografías.

Figura 12. Ruidos aplicados a una imagen RGB.

a-Imagen original, b-Ruido salt&pepper, c-Ruido speckle, d- Ruido poisson, e- Ruido gaussian



Fuente: Autores

2.4.5. Profundidad de color

La profundidad de color es el número de bits necesarios para realizar la codificación y el almacenamiento del valor del pixel específico en una imagen. Por ejemplo una imagen binaria requiere solo dos colores (blanco y negro), mientras que una imagen en escala de grises requiere 256 tonos (1 byte) (Aragón Ferrero

& Luján Mora, 2008). En la tabla 3 se presentan las profundidades más frecuentes en imágenes.

Tabla 3. Profundidades más frecuentes

Bits	Combinaciones	Colores	Bits por pixel
1	2^1	2	1
8	2^8	256	8 (1 Byte)
16	2^{16}	65538	16 (2 Byte)
24	2^{24}	16,7 millones	24 (3 Byte)

Fuente: Obtenido de (Aragonés Ferrero & Luján Mora, 2008)

2.5. Tipos de imagen

Existen diferentes tipos de imágenes entre los que destacan las imágenes binarias, escala de grises, color RGB e imágenes indexadas (Flores Pulido, 2011). Estos tipos de imágenes se emplean según las necesidades que requieran las aplicaciones, se aclara que por medio del procesamiento de imágenes se puede pasar de un formato a otro sin mayor inconveniente.

2.5.1. Imagen binaria

Las imágenes binarias cuentan tan solo con dos colores para su representación, el blanco y el negro que en lenguaje computacional es igual a 1 cuando es blanco y 0 cuando es negro. Estas imágenes ocupan muy poco almacenamiento ya que por pixel solo cuenta con un bit, siendo ideal para textos, formas, planos arquitectónicos, impresión de pistas PCB, entre otras. El uso de este tipo de imágenes es vital en el procesamiento de imágenes debido a que siempre se realiza para optimizar los procesos realizando la segmentación de la imagen con lo cual es más fácil diferenciar entre un objeto y otro a pesar de tener características similares. En la figura 13 se puede ver el ejemplo de lo que es una imagen binaria, aunque esta no fue así desde su captura.

Figura 13. Imagen binaria



Fuente: Autores

2.5.2. Imagen en escala de grises

Las imágenes en escala de grises son una excelente representación para cualquier imagen permitiéndola ver con diferentes contrastes en su interior. El rango que emplean estas imágenes por pixel es de 0 a 255 representado por 1 Byte. Estas imágenes fueron muy empleadas ya que con este formato se transmitieron las primeras imágenes en televisión y duraron hasta un poco más de los años 50, también se capturaban e imprimían las primeras fotografías. En la actualidad este formato no está obsoleto y se emplea mucho en la medicina, principalmente en hospitales de bajos recursos, un ejemplo de una imagen en escala de grises se presenta en la figura 14.

Figura 14. Imagen en escala de grises



Fuente: Autores

2.5.3. Imagen a RGB

Las imágenes RGB son altamente empleadas en el mundo actual, están estandarizadas para la representación de imágenes en televisores y pantallas de ordenadores (Sachs, 1999). Los colores se forman según la posición en la que se encuentren en la relación del cubo de colores, siendo 255 el valor máximo de cada componente; la unión de todos los componentes en su máximo valor da el color blanco y la unión de los componentes en 0 da el color negro como se muestra en la figura 15.

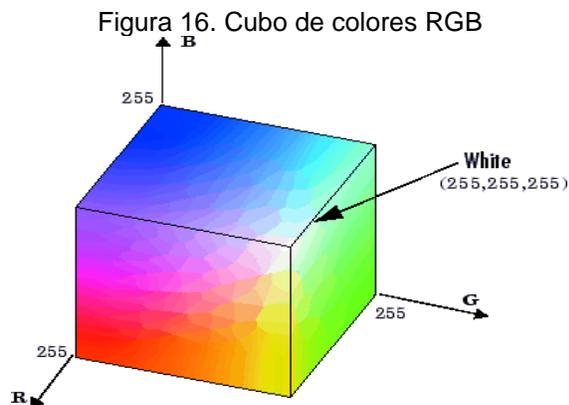
Figura 15. Imagen RGB.

a- Formato RGB, b- Componente R, c- Componente G, d- Componente B



Fuente: Autores

En la figura 16 se ve el cubo de colores RGB, el valor del color depende de la ubicación del cubo en las tres dimensiones, aunque estos 3 colores se pueden descomponer y luego volver a unir, obteniendo los valores reales de la imagen.



Fuente: (MathWorks, 2016)

Las imágenes se pueden convertir a otros formatos como se puede ver en la figura 17, a estos tipos de imágenes se les pueden extraer otro tipo de características ya que las componentes de cada una contiene información diferente a la RGB.

Figura 17. Ejemplos de otros espacios de color a partir del RGB
a-Imagen HSV, b- Imagen HTSC, c- Imagen YCbCr



Fuente: Autores

2.5.4. Imagen indexada

Las imágenes indexadas contienen la característica de representar sus píxeles empleando mapas de colores logrando reducir significativamente el peso de dicha imagen. En la figura 18 se muestran las variaciones cuando se trabajan con diferentes mapas de colores. Estas imágenes han ido tomando más importancia con el uso actual de sistemas computacionales para la creación digital de diseños con los cuales se vectorizan imágenes y no se requiere tanta precisión entre píxeles ya que este formato de imagen presenta colores planos y relleno de área grandes.

Figura 18. Imágenes indexadas con diferentes valores



Fuente: Autores

2.6. Hardware de adquisición

Existe diversidad de hardware para realizar la adquisición de las imágenes digitales como lo son los scanner, cámaras digitales, tarjetas de adquisición de video, tabletas de dibujo con lápiz óptico, entre otros (Aragonés Ferrero & Luján Mora, 2008).

A continuación se mencionaran dos cámaras una es de la marca Logitech y la otra es de Hikvision como se muestran en la figura 19. La segunda cámara presenta distorsión en la imagen debido a que cuenta con un lente ojo de pez el cual curva la imagen en los bordes, esto se debe a que esta cámara es empleada en seguridad y requiere un ángulo de visión mucho mayor que las tradicionales cámaras empleadas en fotografía.

Figura 19. Cámara web y cámara Ip



Fuente: Fabricantes

2.7. Procesamiento digital de imágenes

El procesamiento digital de imágenes es una rama de la visión artificial, esta rama tiene un excelente campo de acción en la actualidad, debido a la versatilidad de aplicaciones en las que se puede desempeñar, logrando posicionarlo como una rama de estudio e investigación con gran proyección a nivel mundial. Las imágenes normalmente son procesadas aplicando transformaciones geométricas, alineaciones, extracción de datos, adecuación de tamaños, eliminación de objetos, entre otros.

Los avances logrados por este campo lo han llevado a extenderse a áreas como la medicina, monitoreo remoto, la fotografía, uso militar, robótica, aplicaciones de la nasa, veterinaria, entre muchas otras.

2.7.1. Adquisición y representación de imágenes

La adquisición de la imagen es la primera etapa del procesamiento de imágenes y es tal vez la más importante, debido a que de esta captura depende la calidad de la imagen principal a la cual se le van a realizar todos los procesamientos necesarios. Estas imágenes son representaciones de valores lumínicos que se transforman a datos dependiendo del formato empleado, pero que siempre queda en una matriz bidimensional.

Esta manera de representar las imágenes es la que permite su fácil manipulación ya que se pueden reemplazar o manipular los valores de los pixeles según las necesidades del proceso y la aplicación a la cual está enfocado.

Figura 20. Imagen adquirida y sección de interés



Fuente: Autores

En la figura 20 se muestra la imagen capturada y la selección de una parte de la misma, con la cual se realizó la tabla 5, esta contiene los valores de cada pixel en la matriz seleccionada. Estos valores corresponden a la imagen representada en escala de grises donde el mayor valor es el 255 que representa al color blanco y el menor valor es 0 que representa al color negro.

Como podemos ver en la tabla, las fotografías difícilmente presentaran valores al límite (255 o 0), se aclara que estos datos son de la imagen en la escala de grises. Los valores más oscuros presentes en la imagen son aproximadamente de 70, lo cual está muy alejado de un color negro puro.

Tabla 3. Matriz de la sección de interés en gris

114	111	115	120	124	128	133	136	138	143	148	152	155	159	165	169	172	173	176	179	182	184	186	187	187	189
116	112	117	120	122	127	132	137	144	151	157	160	160	163	167	170	172	173	175	177	180	183	185	187	190	189
116	113	119	123	128	135	143	150	155	163	171	174	174	175	176	177	175	175	175	175	175	178	180	183	183	186
121	119	125	130	135	142	152	159	168	177	184	186	186	185	184	182	178	176	174	173	173	175	178	181	183	183
124	123	131	138	144	151	160	167	171	177	183	185	187	189	188	186	181	179	175	173	171	172	173	173	173	179
130	129	138	145	150	156	163	169	176	181	183	184	187	190	189	186	184	181	177	175	173	173	172	172	175	174
138	135	143	151	155	159	164	170	172	171	171	173	176	172	181	184	181	184	177	175	170	172	165	168	164	166
137	141	149	151	153	159	162	160	158	151	142	143	143	147	157	161	165	167	174	169	163	170	162	161	160	161
139	142	150	151	153	156	148	136	120	116	112	114	113	122	132	143	158	163	163	164	164	158	166	157	154	154
142	145	150	154	151	142	126	114	112	107	104	102	102	105	103	112	127	142	164	165	161	162	155	152	148	146
143	145	150	150	143	128	117	112	107	110	104	85	81	81	79	84	99	99	132	156	163	164	152	152	142	138
141	143	147	143	134	123	112	105	105	118	106	74	73	76	75	76	75	81	100	138	152	156	151	148	139	132
140	140	138	132	124	116	104	93	114	125	100	71	77	79	71	69	88	118	158	116	170	141	154	146	138	128
136	130	127	120	114	110	107	104	109	126	100	79	78	76	75	92	125	178	176	116	181	125	137	144	135	125
127	117	115	112	110	111	107	105	111	119	109	77	80	79	73	124	125	161	116	137	166	106	122	146	128	121
123	114	114	113	114	117	115	115	114	118	114	89	85	80	77	113	95	95	89	149	129	116	140	148	126	121
122	115	118	121	123	126	127	130	132	129	128	118	113	111	108	122	110	121	134	144	151	158	156	144	123	119
126	118	125	129	132	136	139	144	150	147	150	151	151	152	151	153	164	166	174	167	170	169	149	127	119	118
128	123	130	136	139	143	147	154	156	161	165	169	171	171	175	178	177	178	169	171	163	147	123	125	116	117
130	126	133	138	143	149	153	159	161	168	169	172	174	173	175	178	173	173	164	158	145	131	127	120	117	118
131	128	136	139	144	152	155	160	164	167	167	168	169	168	167	165	165	162	149	146	129	127	123	116	117	119
132	129	136	139	144	151	155	159	160	161	167	166	162	161	158	157	150	144	138	131	128	125	119	119	119	120
134	130	135	141	145	150	153	153	155	156	156	156	154	150	146	143	141	137	131	129	127	125	122	119	122	115
134	130	134	139	143	146	149	150	150	150	148	147	145	143	142	139	137	136	133	129	126	125	126	127	122	117
134	129	132	135	138	140	142	144	147	147	145	144	143	142	140	140	138	136	134	133	131	129	126	124	123	121
131	126	129	132	135	137	139	141	144	145	146	147	147	146	144	143	144	141	139	139	139	136	129	124	121	119

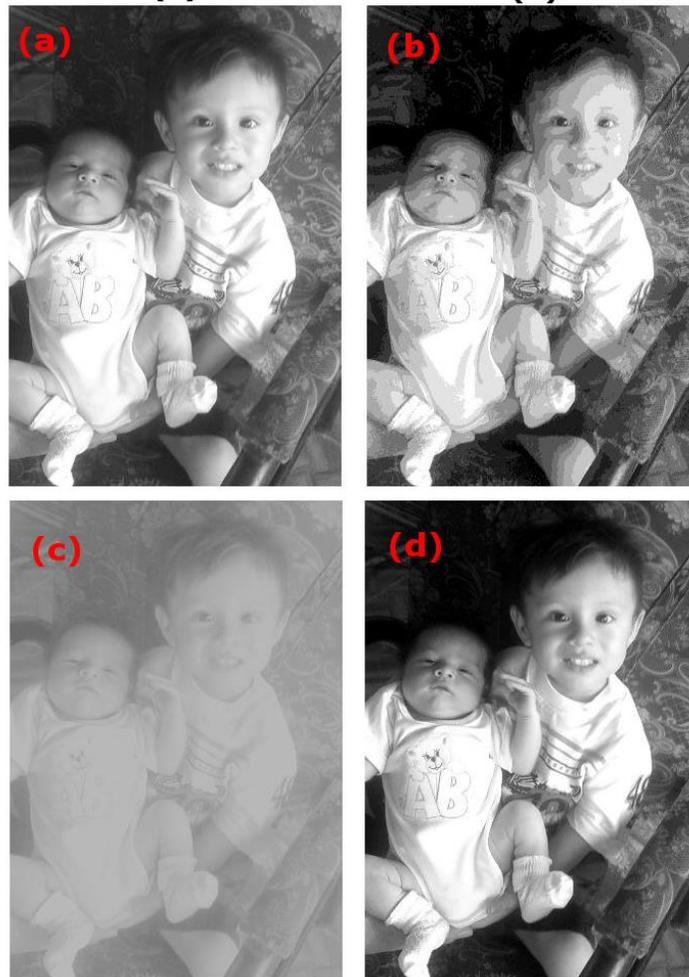
Fuente: Autor

2.7.2. Pre-procesado y eliminación de contornos

El pre-procesamiento de una imagen es la adecuación preliminar que se le debe realizar para poder continuar con otros procesos. La eliminación de contornos consiste en quitar filas y columnas que se encuentran a los extremos de la matriz, las cuales no contiene información importante para la aplicación.

El objetivo general de estos procesos es mejorar la imagen sin afectar pixeles importantes para poder continuar con datos más adecuados. En la figura 21 se observan diversos tipos de aumentos de contraste, los cuales realzan la imagen permitiendo diferenciar aún más entre el blanco y negro acercándonos más a lo que es la binarización de una imagen.

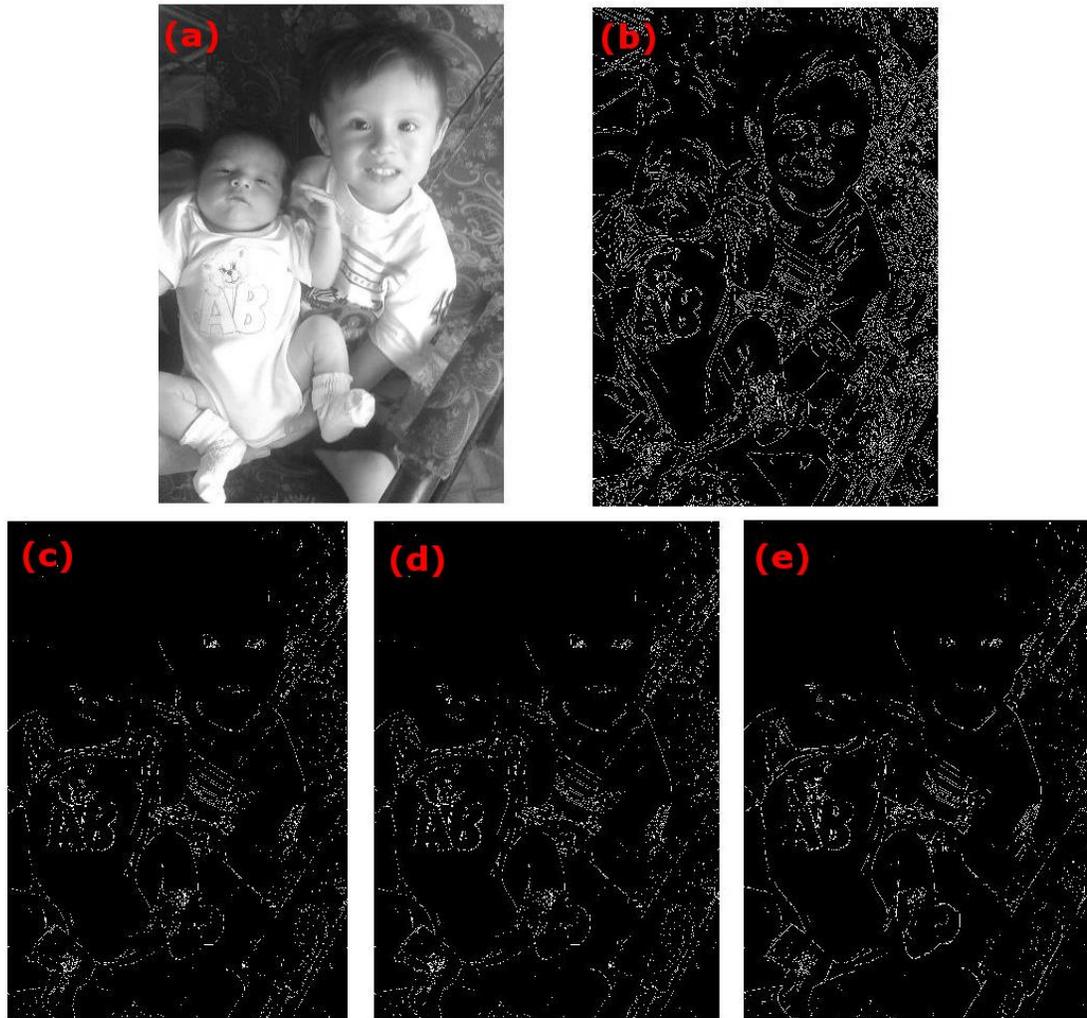
Figura 21. Aumento de contraste a una imagen en escala de grises.
a-Imagen en escala de grises, b- Histeq, c-Log10, d- Imadjust



Fuente: Autores

Por otra parte en la figura 22 se muestra la técnica de realce de borde empleando diferentes operadores.

Figura 22. Detección de bordes a imagen en escala de grises.
a- Imagen en grises, b- Borde canny, c-bordes prewitt, d-borde sobel, e-borde roberts



Fuente: Autores

2.7.3. Filtrado y realzado

El filtrado y el realzado de las imágenes es una etapa no obligatoria del procesamiento de imágenes, depende del tipo de aplicación pero se recomienda aplicar en casi todos casos en que la variable de luz no esté controlada.

Figura 23. Imagen sin ruido con filtro average.
a-Imagen original, b-filtro con ventana [3x3], c- filtro con ventana [9x9]



Fuente: Autores

En la figura 23 se puede observar que al emplear un filtro con una ventana grande, por ejemplo [9*9] sobre una imagen limpia, sin presencia de ruidos, se alteran los valores generado por el suavizado que se aplica.

Figura 24. Imagen con ruido y sus respectivos filtros average.
a-ruido sal&pimienta, b-filtro con ventana [3x3], c-filtro con ventana [9x9]



Fuente: Autores

En la figura 24 se aplicaron los mismos filtros pero esta vez se realizó sobre una imagen con ruido sal & pimienta, en este caso si se mejoró la imagen aplicando una ventana de [9*9]. Por otra parte, se presenta en la figura 25, a esta se le aplico ruido gaussiano y luego se filtró con el objetivo de reducir este tipo de ruido, sin embargo se nota que a pesar de que el ruido y el filtro son gaussianos no se elimina de manera completa, pero si se mejora parcialmente. Esto demuestra que en el procesamiento de imágenes no siempre se pueden emplear los mismos algoritmos ya que para cada imagen puede cambiar el tipo de procesado que se realice y el tipo de aplicación que se desea realizar.

Figura 25. Imagen con ruido gaussiano y posterior filtrado.
a-Ruido gaussiano, b-filtro gaussiano



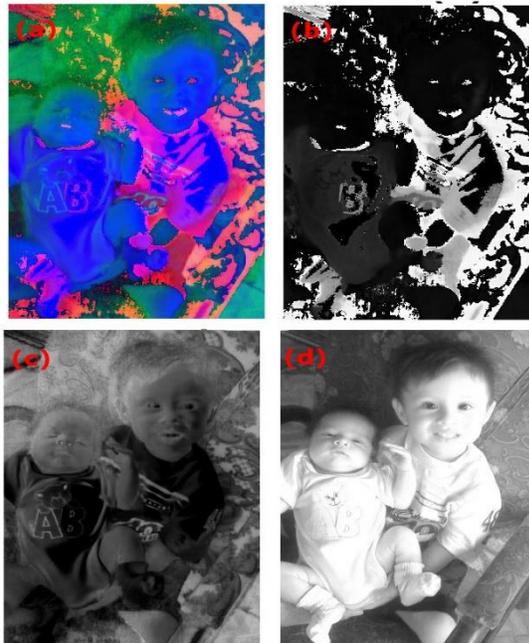
Fuente: Autores

2.7.4. Conversión a otros espacios de color

A continuación se mostraran ejemplos de algunos espacios de color a partir de la transformación de una imagen RGB empleando MatLab.

- Formato HSV: Este modelo de color adquiere su nombre de sus tres componentes (matiz, saturación, valor), las cuales se muestran en la figura 26.

Figura 26. Formato de color HSV y sus respectivos componentes.
a-Formato HSV, b-Matiz, c-Saturación, d-Valor



Fuente: Autores

- Formato YIQ: Este modelo de color recibe su nombre de sus tres componentes (Luminancia, fase, cuadratura), es empleado por el formato de televisión NTSC. Este formato se ha dejado de emplear ya que es impráctico y costoso. En la figura 27 se ven los componentes de este formato.

Figura 27. Espacio de color YIQ y sus respectivos componentes.
 a-Formato YIQ, b-Luminancia (Y), c-Crominancia(I), d-Crominancia(Q)



Fuente: Autores

- Formato YCbCr: Este modelo de color está representado por las componentes (Luma, componente de crominancia azul, componente de crominancia rojo).

Figura 28. Espacio de color YCbCr y sus respectivos componentes.
a-Formato YCbCr, b-Luma (Y), c-Crominancia (Cb), Crominancia (Cr)

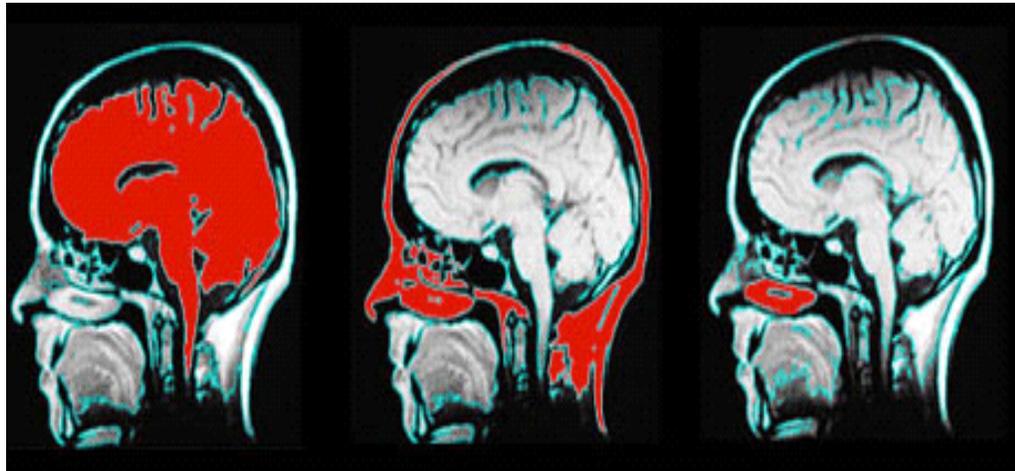


Fuente: Autores

2.7.5. Segmentación

La segmentación consiste en separar regiones cuyas características sean similares, lo cual permitirá un posterior análisis o reconocimiento automático (Esqueda Elizondo, 2002). Así mismo es uno de los pilares del aprendizaje automático ya que la mayoría de imágenes segmentadas eliminan fondos y otros objetos indeseados, permitiendo separar regiones de interés. Por ejemplo, la figura 29 muestra el procesamiento realizado a una imagen médica con 3 segmentaciones de regiones diferentes.

Figura 29. Segmentación de una imagen médica



Fuente: (Wolfram , 2016)

Algunos de las técnicas de segmentación son:

- ✓ Detección de borde
- ✓ Umbralización
- ✓ Operadores morfológicos
- ✓ Análisis Discriminante de Fisher
- ✓ Redes neuronales, entre otras

La segmentación es ampliamente usada en el proceso de pruebas médicas como complemento al conocimiento de los estudiosos en el tema, en casos como:

- ✓ Localización de patologías
- ✓ Estudio de pequeñas desviaciones
- ✓ Cirugías asistidas
- ✓ Análisis de bacterias

2.7.6. Extracción de características

La extracción de características es el paso previo a cualquier proceso de clasificación, ya que de esta manera se reconocen patrones característicos de cualquier objeto que se encuentre dentro de una imagen pre procesada. Las características más comunes son:

- ✓ Color
- ✓ Tamaño
- ✓ Textura

- ✓ Posición

Estas características se subdividen en otras características más específicas con las cuales se puede armar un vector de características para realizar una futura clasificación. Estas características también se clasifican por medio de los tipos de descriptores de la siguiente manera:

- ✓ Descriptores del contorno: Busca los valores 1 conectados sobre la imagen binaria, se aplican técnicas buscando suavizar los cambios
- ✓ Descripción de región: Área, perímetro, geometría, posición, número de agujeros objetos conectados, texturas
- ✓ Descripción de similitud: Correlación con patrones conocidos

3. Capítulo 3. Métodos y materiales

Para el desarrollo de esta investigación, se implementó el método de la herramienta computacional y dos métodos convencionales para su posterior validación, a continuación se describen cada uno de ellos:

3.1. Método gráfico: Conteo de cuadrícula

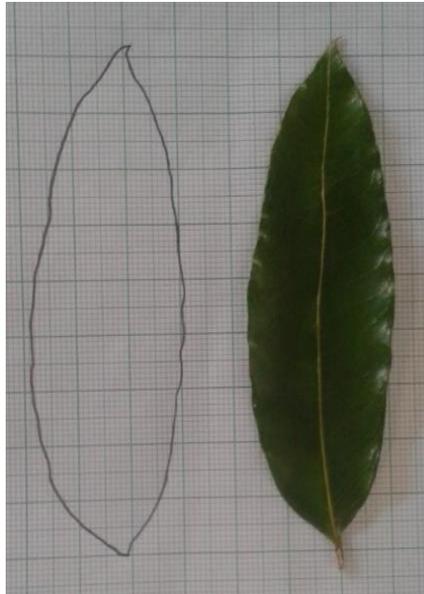
Este método es muy empleado en prácticas universitarias en fisiología vegetal debido a su sencillez, economía, tiempo intermedio de desarrollo y aproximación

al valor real del área foliar. En la Universidad de Cundinamarca este método se ha aplicado con gran fiabilidad, siendo el primer pedestal en la búsqueda de índices fisiológicos que apoyen estudios más profundos de crecimiento.

El proceso para el desarrollo de este método se describe a continuación:

- 1) Calcar el objeto de estudio en una hoja de papel milimetrado: Lo primero es aplanar la hoja para poderla poner sobre el papel milimetrado, luego se procede a sostener firmemente la hoja para realizar el calcado con un lápiz o esfero, como se muestra en la figura 30.

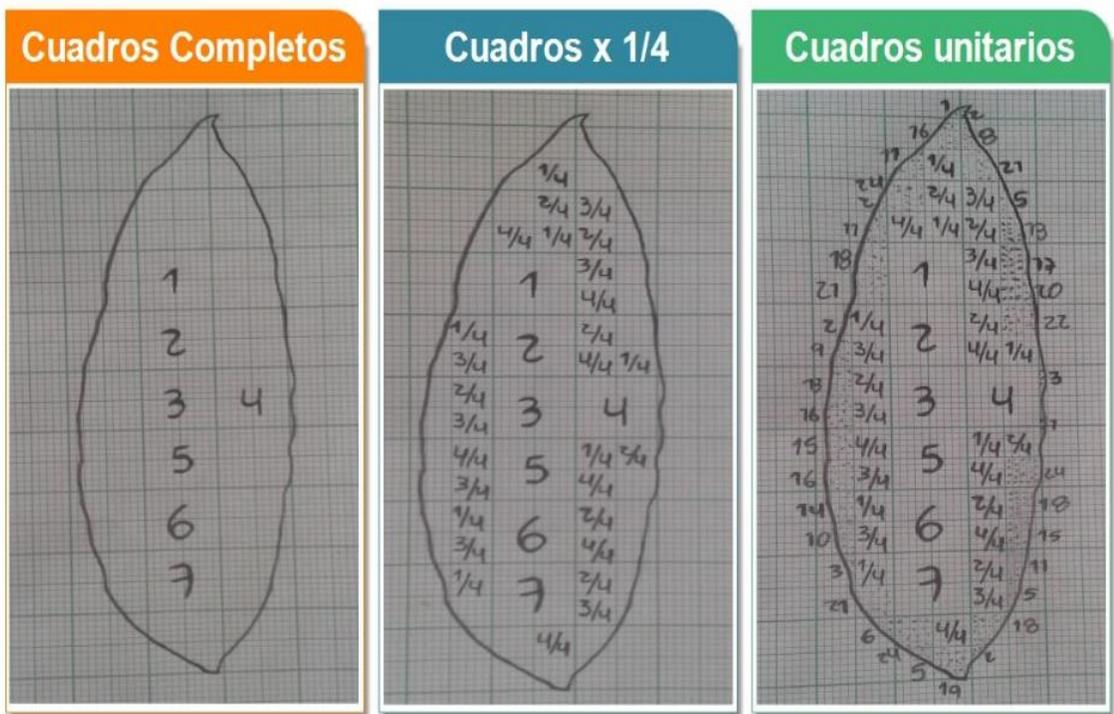
Figura 30. Hoja calcada en papel milimetrado



Fuente: Autores

- 2) Conteo de cuadros: Los cuadros internos al borde realizado se cuentan teniendo en cuenta que cada 100 cuadros pequeños son igual a 1 cm^2 , sin embargo, se toman los cuadros grandes primero y se marcan con números enteros de manera secuencial, luego se marcan los $\frac{1}{4}$ resaltándolos para diferencias con decimales expresados en fraccionarios, por último se cuentan los cuadros que quedan en el borde, el desarrollo secuencial se muestra en la figura 31.

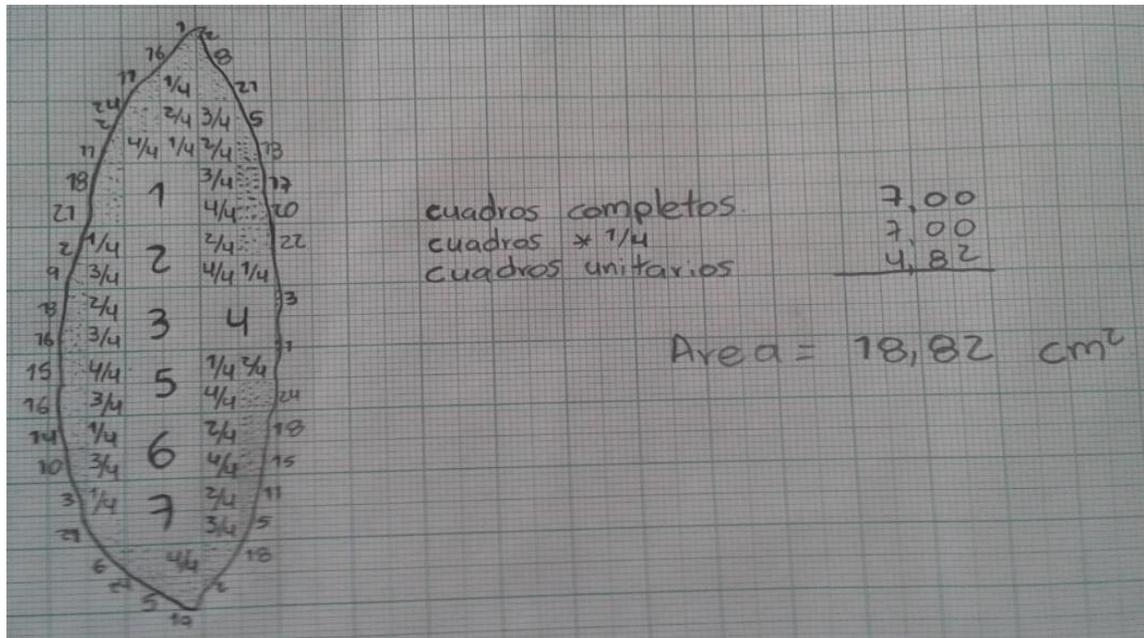
Figura 31. Conteo de cuadrícula



Fuente: Autores

Después de tener marcados todos los cuadros, se procede a realizar la sumatoria como se muestra en la figura 32, en este caso se obtuvo un área de 18,82 cm². El inconveniente de este método es que tiene un alto grado de subjetividad en el momento de calcar la hoja y hacer el conteo de los cuadros.

Figura 32. Sumatoria del área total



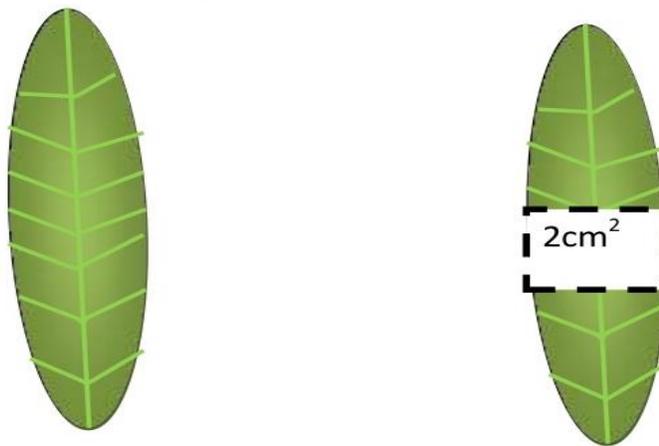
Fuente: Autores

3.2. Método de la balanza analítica

Para la realización de este método (Soticon, 2012) se empleó una balanza analítica, la técnica de medición conto con los siguientes pasos:

1. Recorte de la hoja: A la hoja se le corta un cuadrado que depende del tamaño de la hoja como se muestra en la figura 33.

Figura 33. Recorte a la hoja



Fuente: (Soticon, 2012)

2. Calibración de la balanza analítica: Se realizó la calibración de la balanza analítica siguiendo las instrucciones del fabricante. La figura 34 muestra la balanza adquirida.

3. Figura 34. Balanza analítica



Fuente: Fabricante

4. Área foliar: Se pesa la sección recortada y el restante de la hoja por aparte con el fin de hallar el área foliar empleando la ecuación 1.

$$\text{Área total} = \frac{\text{Peso de la hoja} * \text{area del recuadro en cm cuadrados}}{\text{Peso del recuadro}} \quad (1)$$

3.3. Método implementado con procesamiento de imágenes

Este método se desarrolló con el objetivo de implementar una serie de algoritmos de prueba con el objetivo de encontrar los mejores resultados posibles. El procesamiento de las imágenes fue desarrollo en MatLab el cual trabaja un código muy similar al lenguaje C, empleando un modelo de ciclo de vida en cascada puro (Cantone, 2008). En la figura 35 se muestran las etapas llevada a cabo para la culminación de la investigación.

Figura 35. Etapas llevadas a cabo para el proceso investigativo

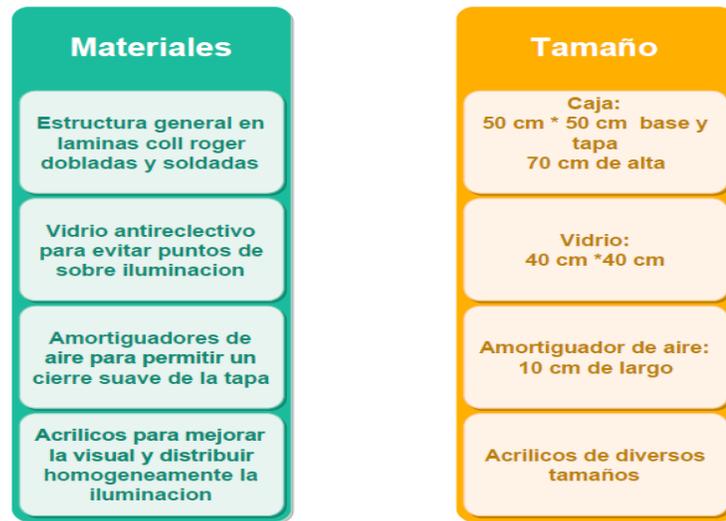


Fuente: Autores

3.3.1. Definición de criterios y restricciones del sistema

Para los criterios y restricciones del sistema se realizaron entrevistas a expertos en la materia los cuales generaron características vitales que debía contener el sistema en todas sus secciones. Lo primero que se estableció fue las dimensiones promedio de las hojas a medir, ya que no se pueden realizar para todos los tamaños de hojas. En segundo lugar se analizó el tipo de vidrio y se probó experimentalmente diferentes tipos, dando mejores resultados el vidrio antireflectivo. Posteriormente, se definieron los materiales del sistema de adquisición de imágenes en metal por la robustez con la que debería contar en sistema, debido a que podrá ser usada en posteriores investigaciones. Finalmente, se tomó en cuenta el cierre del sistema, se requirió que este fuera de cierre suave y se determinó ubicar una serie de acrílicos que dispersaran la iluminación para evitar puntos de sobre iluminación en la imagen. A continuación, en la figura 36 se muestran dos tablas de materiales y tamaños de la herramienta computacional.

Figura 36. Características de materiales y tamaños del sistema de adquisición



Fuente: Autores

En esta sección se determinaron una serie de requerimientos funcionales y no funcionales del sistema. Los ejemplos de estos requerimientos los podemos observar en las tablas 6 y 7, sin embargo, en el anexo muestran a detalle.

Tabla 4. Requerimiento funcional 1

Identificación del requerimiento:	RF01
Nombre del Requerimiento:	Autenticación de Usuario.
Características:	Los usuarios deberán identificarse para acceder al sistema.
Descripción del requerimiento:	Cualquier usuario puede acceder al sistema siempre y cuando tenga la contraseña
Requerimiento NO funcional:	RNF01, RNF02.
Prioridad del requerimiento:	Alta

Fuente: Autores

Tabla 5. Requerimiento no funcional 1

Identificación del requerimiento:	RNF01
Nombre del Requerimiento:	Interfaz del sistema.
Características:	El sistema presentara una interfaz de usuario sencilla para que sea de fácil manejo a los usuarios del sistema.
Descripción del requerimiento:	El sistema debe tener una interfaz de uso intuitiva, sencilla.
Prioridad del requerimiento:	Alta

Fuente: Autores

Para la adquisición de la imagen se determinó el sistema de iluminación que se emplearía, también fue necesario establecer el hardware de captura del sistema teniendo que realizar pruebas entre diferentes tecnologías, para la investigación se probaron dos cámaras. En la tabla 8 se muestran las cámaras donde sobresale la cámara web, ya que la cámara IP distorsiona la imagen al contar con un lente con efecto ojo de pez.

Tabla 6. Cámaras propuestas para realizar la investigación

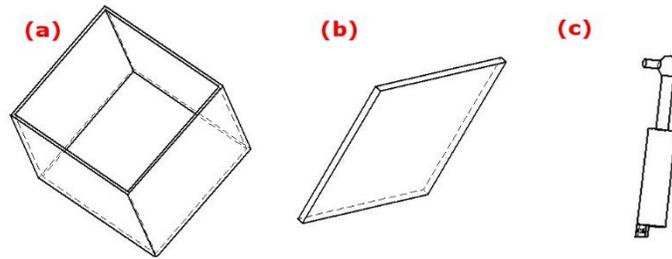
Tipo de cámara	Cámara Logitech c270	Hikvision DS2CD2420FDIW28
Imagen de la cámara		
Captura de video	1280 x 720 píxeles	1920 x 1080 píxeles
Fotos	Hasta 3.0 megapíxeles (mejora por software)	Hasta 2.0 megapíxel
Conexión	Certificación USB 2.0 de alta velocidad (se recomienda)	Soporte Wifi

Fuente: Autores

3.3.2. Diseño del sistema de visión artificial

Para diseñar el sistema de visión artificial fue necesario realizar los esquemas preliminares del sistema de adquisición mediante el software solid edge, donde las piezas principales son: Tapa, caja de base y amortiguador. Estos diseños se ven en la figura 37, donde están los planos esquemáticos de las anteriores piezas mencionadas.

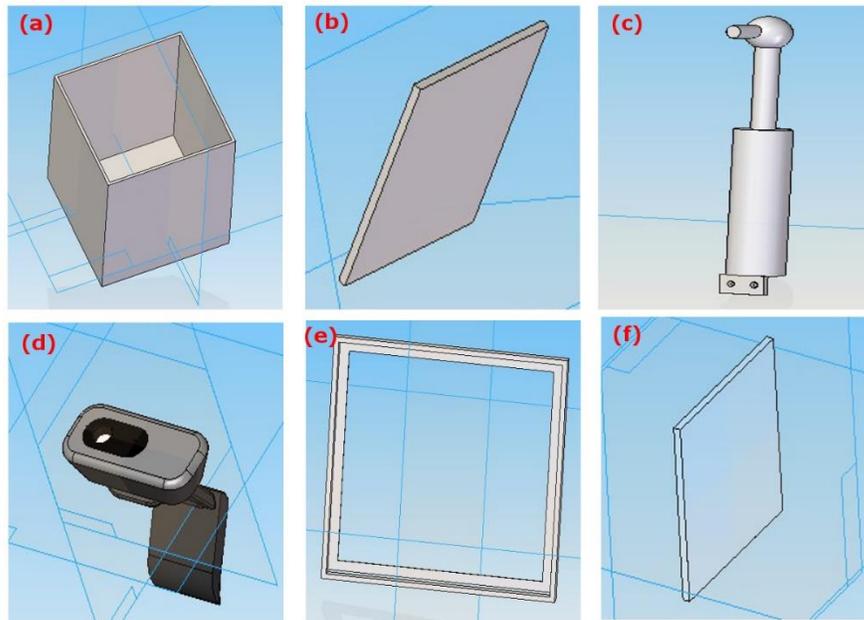
Figura 37. Diseños esquemáticos de partes del sistema de adquisición.
a-Caja, b-Tapa, c-amortiguador



Fuente: Autores

Sin embargo, estos planos dan ideas preliminares de cómo quedaría el sistema, por lo que fue necesario realizar el modelamiento en 3D con el cual se obtuvieron las imágenes en la figura 38. En esta figura se pueden evidenciar los componentes necesarios para el sistema de adquisición el cual es la primera etapa para capturar las hojas para el posterior procesamiento mediante técnicas computacionales. Todos los diseños se elaboraron independientemente y se modificaron muy poco para ir ajustando valores exactos del sistema deseado. No obstante al final se tuvo que reajustar piezas ya que al realizar cierres de la tapa y primeras capturas de las hojas se detallaron pequeños corrimientos del sistema.

Figura 38. Diseños en 3D empleando el software Solid Edge.
a-Caja, b-Tapa, c-Amortiguador, d-Cámara, e- Soporte del vidrio, f- Vidrio



Fuente: Autores

3.3.3. Implementación del sistema físico

El sistema físico se implementó luego de adquirir todos los materiales, partiendo de que la primera cámara que se adquirió fue la cámara IP y al realizar las primeras pruebas se notó el efecto de un lente ojo de pez. Las partes metálicas fueron desarrolladas por un soldador local y luego en el laboratorio se le adaptaron pequeñas piezas para mejorar el sistema. Seguido a esto, se pintó toda la estructura, internamente se aplicó color blanco y externamente se le aplicó una tonalidad gris. La fase final de la metodología fue instalar la cámara Web y adecuar tanto los acrílicos como también el vidrio antireflectivo para proceder con las primeras adquisiciones de hojas. En este punto se ajustó la iluminación comparando en diferentes voltajes la cantidad de la iluminación sobre la imagen. La figura 39 muestra el paso a paso del sistema.

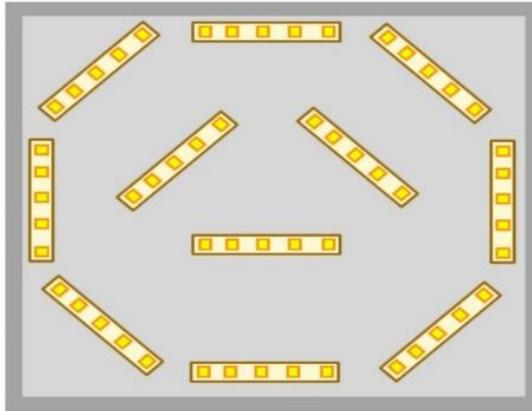
Figura 39. Pasó a paso de la realización del montaje



Fuente: Autores

La iluminación inferior se distribuyó de manera uniforme evitando producir puntos de sobre iluminación, para lo cual se ubicaron como se ven en la figura 40. Esta distribución género muy buenos resultados y no afecto el procesamiento de imágenes.

Figura 40. Distribución de la iluminación en la parte inferior de la caja empleando software Gimp



Fuente: Autores

Finalmente, la herramienta computacional desarrollada fue implementada y se quedó como se puede observar en la figura 41.

Figura 41. Sistema real capturado en el laboratorio



Fuente: Autores

3.3.4. Implementación de algoritmos para el procesamiento de imágenes

Los algoritmos para el procesamiento de imágenes se desarrollaron en el software MatLab, con un computador de la marca Acer el cual cuenta procesador AMD de 1Ghz, memoria RAM de 2GB y sistema operativo de 32 bits. La figura 42, muestra cada una de las etapas del procesamiento necesarias para hallar el área de manera correcta, en este se destaca la ausencia de filtros, debido a que al realizar pruebas de funcionamiento se demostró que para este caso no eran necesarios debido a que se contaba con un ambiente controlado de iluminación el cual permitió obtener imágenes sin ruido.

Figura 42. Procesamiento de la imagen sin filtros



Fuente: Autores

En la figura 43, se muestra el proceso empleado para realizar la clasificación de las hojas estudiadas, donde primero se clasifica si la hoja es de limón, luego se pregunta si esta hoja es de mango, por último se pregunta si es de naranjo, de no ser así, esta es de almendro. Todas las características de clasificación tenidas en cuenta para cada hoja fueron diferentes con el fin de reducir el error en la clasificación.

Figura 43. Clasificación de las hojas trabajadas

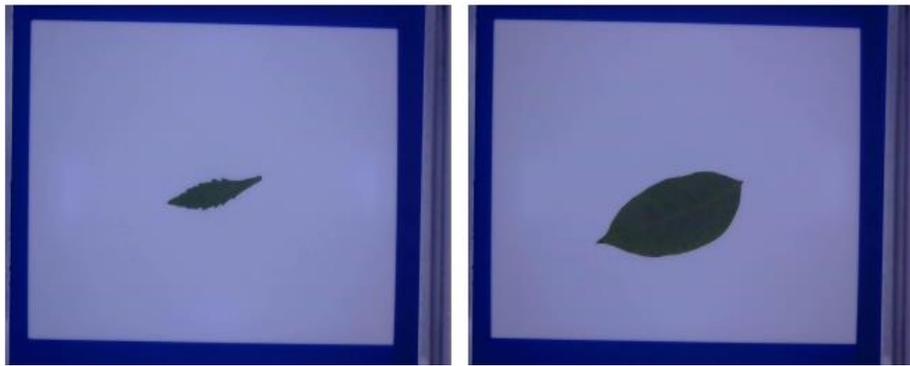


Fuente: Autores

3.3.5. Pruebas de funcionamiento

Con el fin de obtener los mejores resultados en el sistema se realizaron una serie de pruebas luego de estar implementado en su totalidad, estas pruebas fueron importantes para evitar problemas propios de los sistemas de visión artificial, sin embargo el sistema no presento mayores inconvenientes. Lo primero que se realizó fueron capturas de hojas indeterminadas con el fin de calibrar la iluminación del sistema variando el voltaje en la fuente de alimentación, también se calibro la resolución de las imágenes, esta se estableció de 640x480 para evitar saturar el sistema con imágenes muy grandes. En la figura 44, se observan las primeras capturas con poca iluminación, sin embargo, estas imágenes permiten un tratamiento adecuado de la imagen.

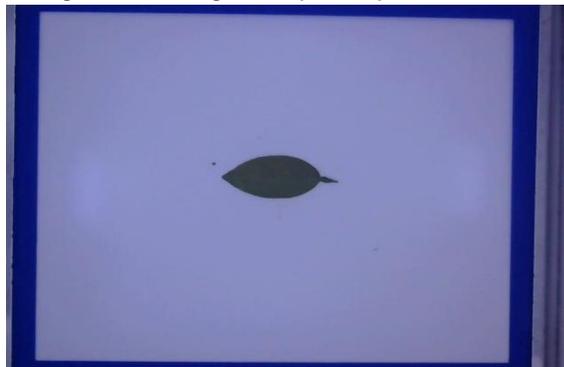
Figura 44. Primeras imágenes con poca iluminación



Fuente: Autores

La figura 45 muestra la imagen adquirida con el sistema poco iluminado, luego de esto, se le realiza la eliminación del contorno, ya que esta información de los bordes no es necesaria.

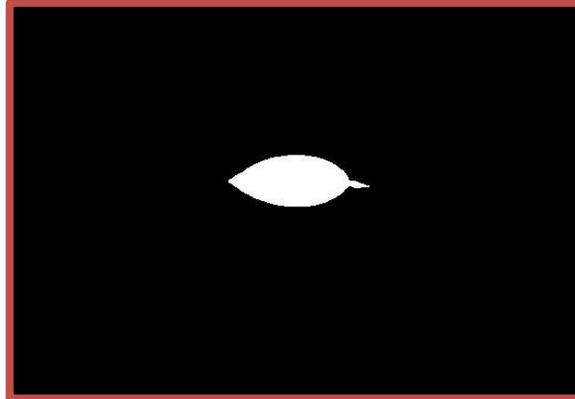
Figura 45. Imagen adquirida por el sistema



Fuente: Autores

La figura 46, muestra la imagen segmentada sin la utilización de filtros, la cual no presenta ninguna alteración en el contorno a simple vista. Esta figura es muy importante, debido a que al estar binarizada se puede contar la cantidad de pixeles que ocupa la hoja, esta medida se convierte a centímetros cuadrados.

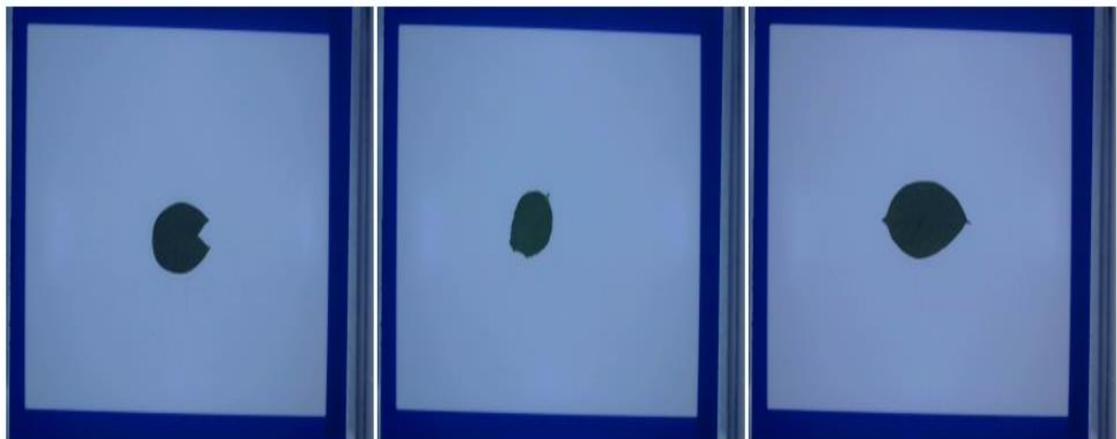
Figura 46. Imagen procesada con el código sin filtros



Fuente: Autores

Luego se procedió a calibrar la iluminación aumentando un poco el voltaje con el objetivo de obtener imágenes visualmente más claras, con lo cual el usuario puede ver mejor cualquier imperfección en el momento de la captura, en la figura 47 se puede ver imágenes con la iluminación mejorada en comparación con las pruebas iniciales.

Figura 47. Capturas con iluminación mejorada



Fuente: Autores

Una prueba muy importante realizada fue cuando se compararon los dos algoritmos de pre procesamiento. En uno de los algoritmos no se aplicaron filtros,

mientras que en el otro si, y a pesar de que los filtros sirven para mejorar la imagen, en este caso los parámetros estaban muy controlados y se generaron pequeñas desviaciones en la medida. En la tabla 9 se puede observar claramente que en las imágenes sin filtros se obtuvieron los resultados más cercanos al valor real.

Tabla 7. Comparación de algoritmos con y sin filtros

Área de las hojas de Naranja			
hoja	Código completo	Código sin filtros	Manual
1	22,8	23,02	23,2
2	25,42	25,63	25,66
3	26,09	26,25	26,22
4	31,94	32,17	31,55
5	28,97	29,15	29,67
6	29,1	29,31	30,18
7	35,3	35,6	36,86
8	35,08	35,32	36,05
9	40,11	40,45	40,78
10	46,01	46,29	46,8

Fuente: Autores

4. Capítulo 4. Análisis de resultados

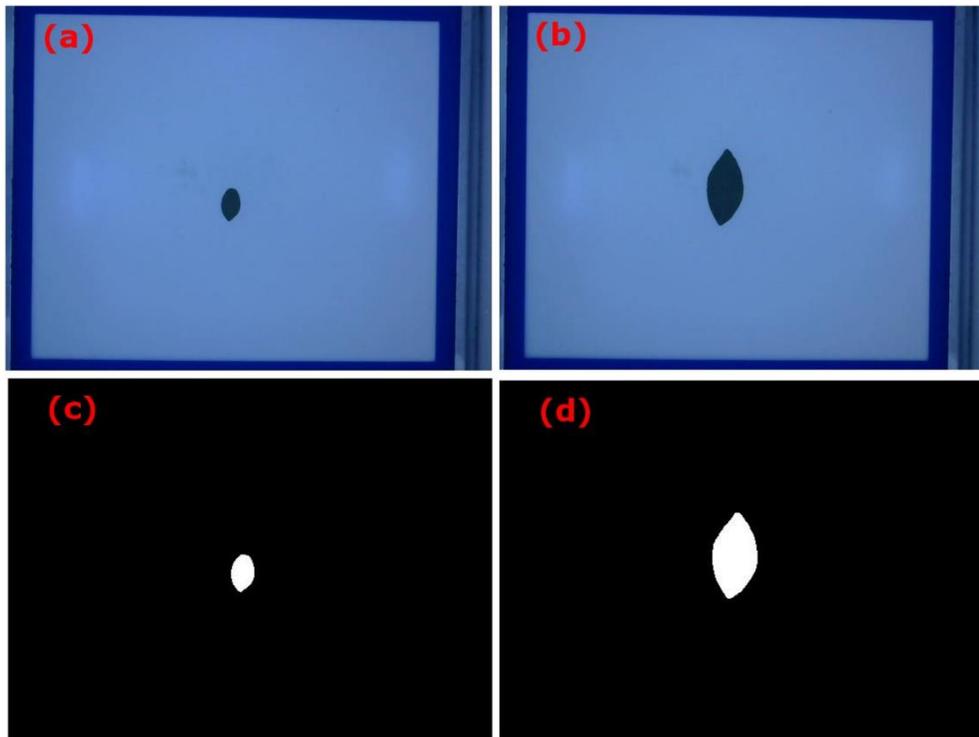
Realización de pruebas funcionales y de desempeño del sistema integrando cada uno de los módulos de visión artificial

El método de segmentación utilizado con la herramienta computacional presentó una alta eficiencia. Además, se realizaron pruebas con diferentes tipos de hojas para comprobar su funcionamiento. En este método se identificó una buena repetitividad en los resultados y todos los valores tienden a aproximarse a los valores del método manual realizados por el experto.

4.1. Resultados de las hojas de almendro

Las hojas de limón se caracterizaron por ser muy pequeñas como se puede ver en la figura 48, sin embargo estas hojas no presentaron dificultades segmentándose de manera correcta.

Figura 48. Imágenes originales y procesadas de limón.
a- Original #3, b-Original #10, c-Procesada #3, d-Procesada #10



Fuente: Autores

Luego de haber segmentado las hojas se procedió a realizar la medición del área con los 3 métodos empleados. La tabla 10 muestra estos valores de área en centímetros cuadrados de las 10 hojas de muestra.

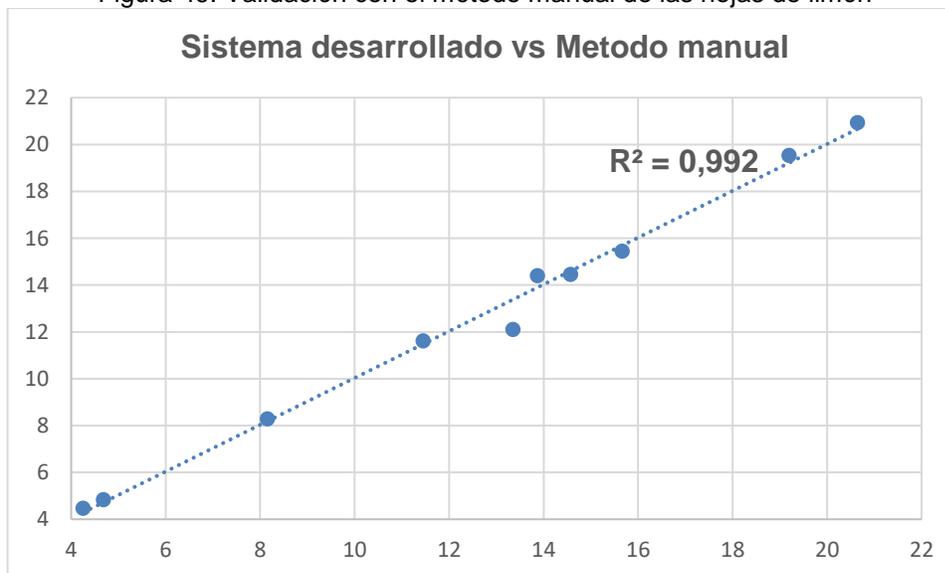
Tabla 8. Hojas de limón comparadas con los diferentes métodos

Limón			
# de hoja	Caja	Balanza	Manual
1	4,25	3,9	4,47
2	8,15	7,73	8,29
3	4,68	4,56	4,84
4	13,35	12,85	12,10
5	13,87	13,1	14,4
6	15,66	13,22	15,45
7	11,45	10,57	11,62
8	20,64	17,82	20,94
9	14,57	13,26	14,46
10	19,19	16,76	19,54

Fuente: Autores

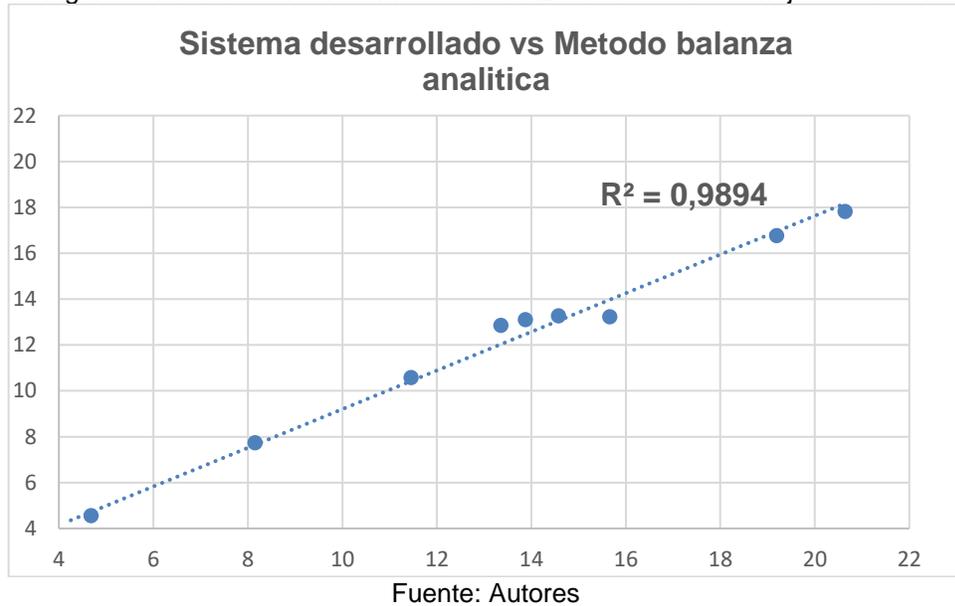
Para la validación de los resultados se desarrollaron las comparaciones del área foliar obtenida con respecto al método manual y al método de la balanza analítica, como se muestran en la figura 49 y 50 respectivamente. Ambos sistemas muestran gran similitud, el primero presenta un coeficiente de determinación de 0,992 con respecto al método manual y el segundo presenta un coeficiente de determinación de 0,9894 con respecto al método de la balanza de precisión.

Figura 49. Validación con el método manual de las hojas de limón



Fuente: Autores

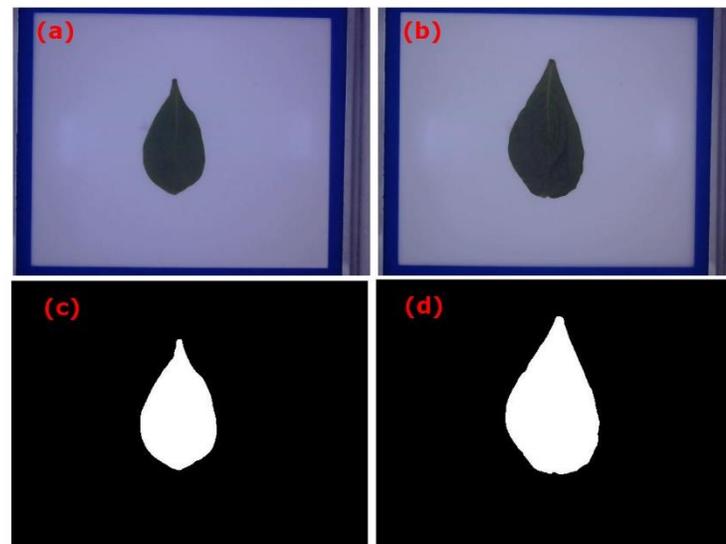
Figura 50. Validación con el método balanza analítica de las hojas de limón



4.2. Resultados de las hojas de almendro

Las hojas de almendro son generalmente muy grandes, sin embargo el sistema se diseñó con la capacidad de capturar hojas aún más grandes, el problema que presentaron estas hojas es que en ocasiones fue necesario aplanarlas previamente. En la figura 51 se muestran dos hojas aleatorias de la muestra.

Figura 51. Imágenes originales y procesadas de almendro. a-Original #2, b-Original #8, c-Procesada #2, d-Procesada #8



Fuente: Autores

Los valores de áreas de este tipo de hojas se muestran en la tabla 11, allí se evidenció que la hoja más pequeña contaba con un área superior a 45 centímetros cuadrados y la hoja más grande media más de 200 centímetros cuadrados, aun así el sistema obtuvo valores muy similares.

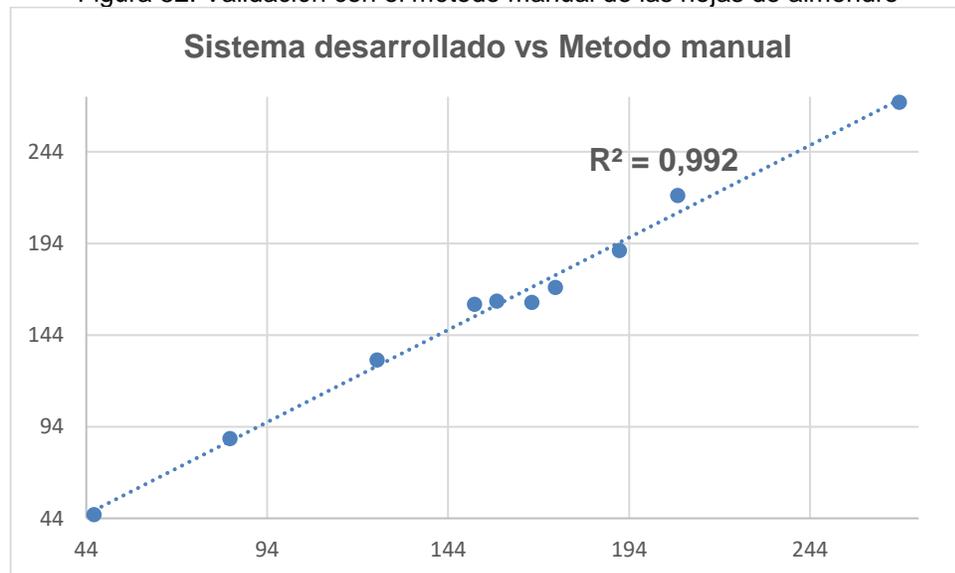
Tabla 9. Hojas de almendro comparadas con los diferentes métodos

Almendro			
# de hoja	Caja	Balanza	Manual
1	46,14	45	45,97
2	83,72	77,85	87,48
3	268,64	186,04	271,02
4	157,4	110,37	162,55
5	151,27	116,31	160,69
6	191,31	136,27	190,18
7	173,66	126,88	169,91
8	124,36	109,89	130,46
9	167,14	136,58	161,84
10	207,41	157,16	220,11

Fuente: Autores

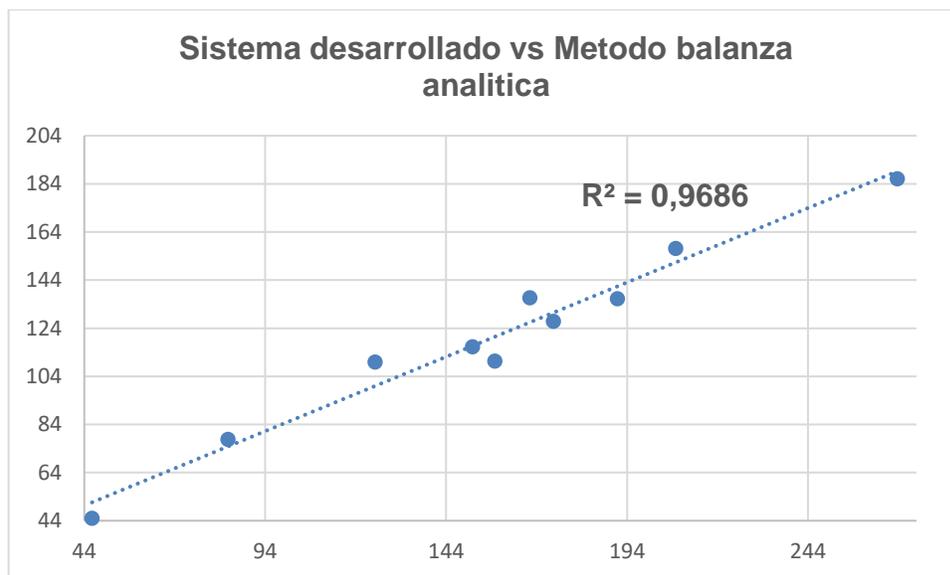
A continuación en las figuras 52 y 53 se muestran los resultados de las correlaciones que presentaron las mediciones de área foliar de las hojas de almendro. La primera validación presento un coeficiente de determinación de 0,992 con respecto al método manual y la segunda presento un coeficiente de determinación de 0,9686 con respecto al método de la balanza de precisión.

Figura 52. Validación con el método manual de las hojas de almendro



Fuente: Autores

Figura 53. Validación con el método balanza analítica de las hojas de almendro

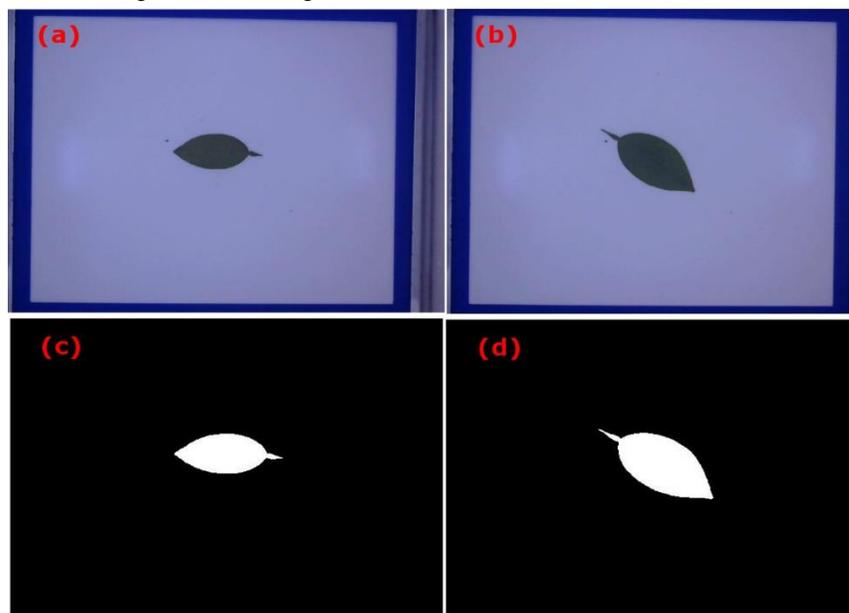


Fuente: Autores

4.3. Resultados de las hojas de naranja

Las hojas de naranja presentan una medida intermedia, por lo cual se adecuan fácilmente al sistema, las imágenes de este tipo de hoja se muestran en la figura 54.

Figura 54. Imágenes originales y procesadas de almendro. a-Original #2, b-Original #7, c-Procesada #2, d-Procesada #7



Fuente: Autores

La tabla 12 muestra los datos obtenidos y deja ver que la varianza en las medidas convencionales con respecto a la medida de la herramienta desarrollada es pequeña.

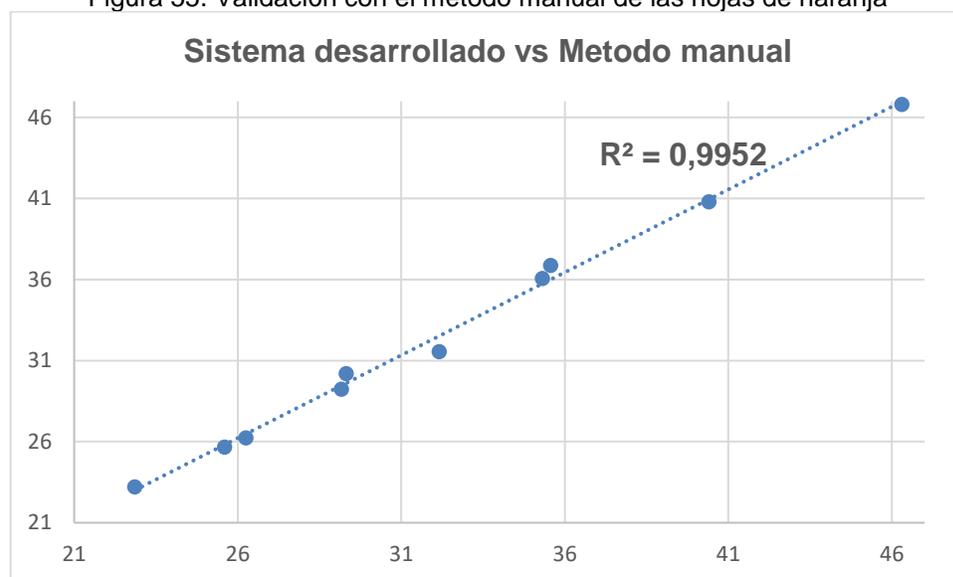
Tabla 10. Hojas de naranja comparadas con los diferentes métodos

Naranja			
# de hoja	Caja	Balanza	Manual
1	22,85	21,98	23,2
2	25,6	24,87	25,66
3	26,25	26,87	26,22
4	32,16	30,23	31,55
5	29,17	29,49	29,67
6	29,31	31,04	30,18
7	35,56	34,69	36,86
8	35,31	34,38	36,05
9	40,4	38,46	40,78
10	46,3	45,56	46,8

Fuente: Autores

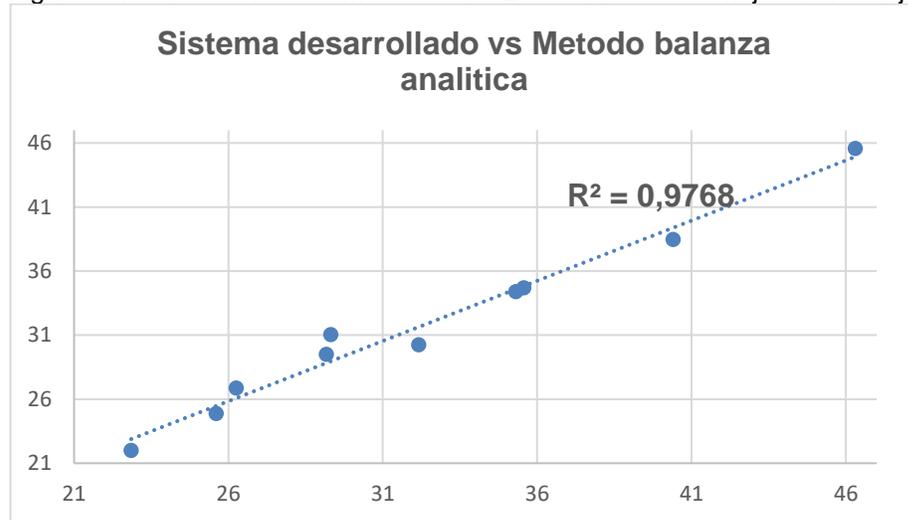
A continuación en las figuras 55 y 56 se muestran los resultados de la correlación que presentaron las mediciones de área foliar de las hojas de naranja. La validación presentó un coeficiente de determinación de 0,9952 con respecto al método manual y un coeficiente de determinación de 0,9768 con respecto al método de la balanza de precisión.

Figura 55. Validación con el método manual de las hojas de naranja



Fuente: Autores

Figura 56. Validación con el método balanza analítica de las hojas de naranja

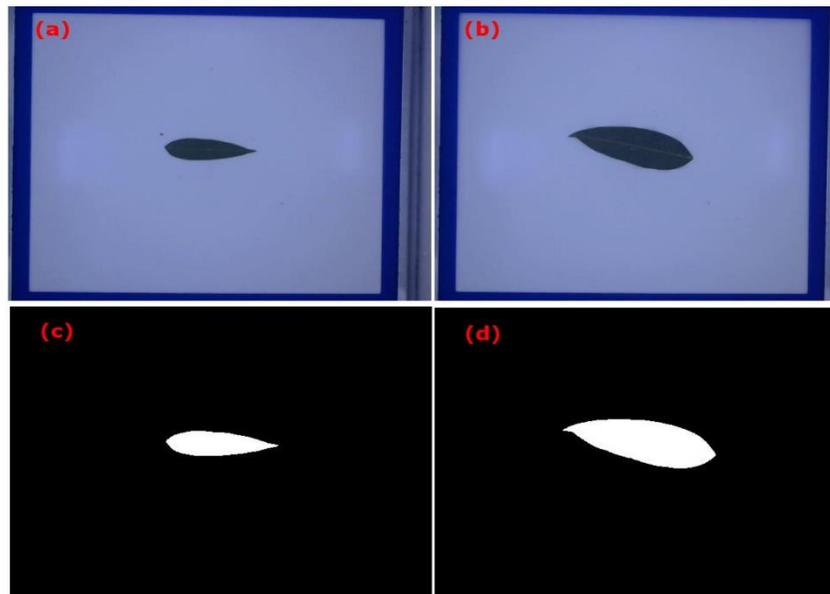


Fuente: Autores

4.4. Resultados de las hojas de mango

Las hojas de mango se adaptaron perfectamente a todos los procesos realizados, en la figura 57 se observan los resultados del proceso de extracción del objeto, en ellos se evidencia que el algoritmo de segmentación presentó buenos resultados.

Figura 57. Imágenes originales y procesadas de mango.
a-Original #1, b-Original #7, c-Procesada #1, d-Procesada #7



Fuente: Autores

Las medidas de las áreas de las hojas de mango se muestran en la tabla 13, estas medidas muestran mucha similitud entre métodos corroborando la precisión de la herramienta computacional.

Tabla 11. Hojas de mango comparadas con los diferentes métodos

Mango			
# de hoja	Caja	Balanza	Manual
1	19,64	19,09	20,18
2	27,75	26,78	28,27
3	30,03	28,78	30,26
4	29,2	27,1	30,36
5	38,22	32,83	39,81
6	40,74	36,68	42,8
7	47,59	42,6	48,94
8	60,06	51,34	63,05
9	87,3	76,67	90,31
10	123,42	99,83	126,98

Fuente: Autores

Las hojas de mango presentaron la correlación más alta de los 4 tipos de hojas con un coeficiente de determinación de 0,9997 con respecto al método manual y un coeficiente de determinación de 0,9965 con respecto al método de la balanza analítica, como se puede ver en las figuras 58 y 59. Estos valores demuestran que la forma de este tipo de hojas alargadas permiten un mejor conteo de cuadrícula y también mejor asimilación al método de la balanza analítica.

Figura 58. Validación con el método manual de las hojas de naranja

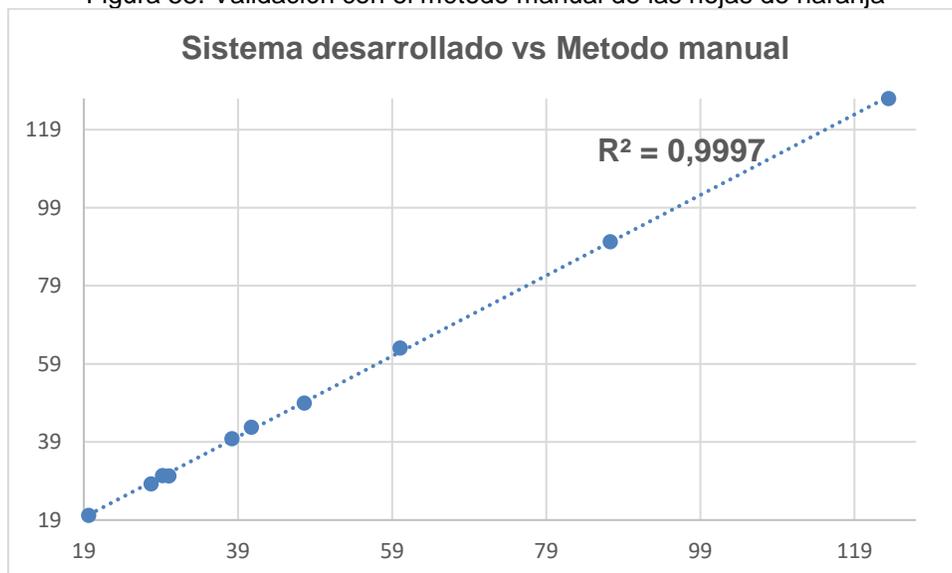
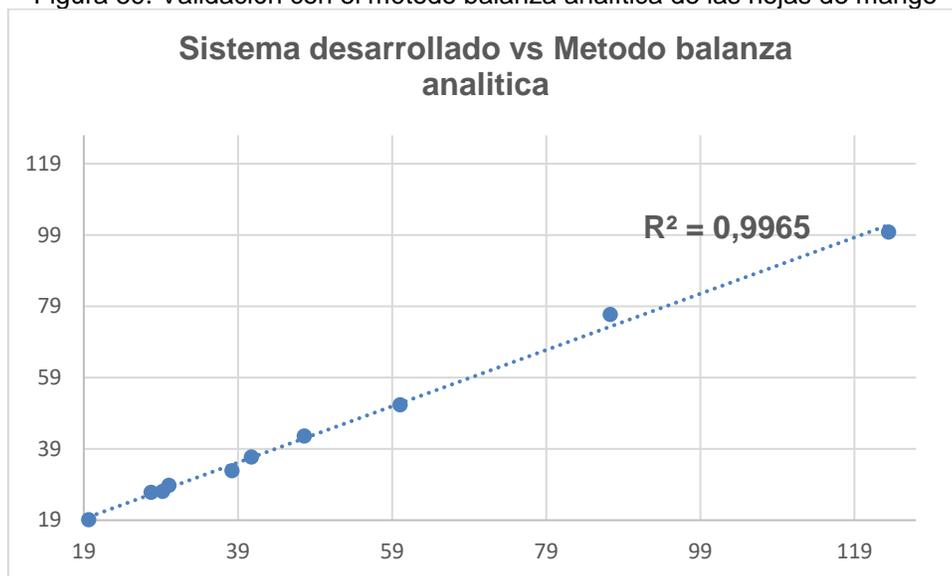


Figura 59. Validación con el método balanza analítica de las hojas de mango



Fuente: Autores

Mediante el proceso de validación estadística de la herramienta computacional con respecto a los métodos convencionales de referencia manual por parte de técnicos expertos, se comprobó que permite el soporte tecnológico en el análisis de área foliar al obtener coeficientes de determinación superiores a 0,99 para las cuatro especies de hojas, indicando el buen desempeño de la herramienta computacional, convirtiéndose en una alternativa útil a nivel nacional para la determinación del área foliar en plantas, ya que ha podido disminuir los errores subjetivos y aumentar la repetitividad en los resultados con respecto a los métodos tradicionales.

4.5. Resultados del proceso de clasificación

La clasificación se realizó a través de la identificación de descriptores morfológicos como la compacidad*esfericidad, excentricidad y compacidad, los cuales permitieron diferenciar las cuatro especies de plantas con una tasa de error muy baja del 5%, en un conjunto de 40 hojas con diferentes tamaños y formas, a continuación en la figura 60 se muestran los porcentajes de acierto evidenciando un 95% de exactitud en la identificación de hojas.

Figura 60. Porcentajes de clasificación de las 40 hojas procesadas

Porcentaje de clasificación

La clasificación de las hojas se realizó con el promedio de los 4 tipos de hojas trabajadas lo cual fue un total de 40 muestras



Fuente: Autores

5. Conclusiones

Con el desarrollo del proyecto de investigación se obtuvo una herramienta computacional mediante el uso de técnicas de procesamiento de imágenes y visión artificial, para determinar el área foliar en plantas y monitorear constantemente su crecimiento. A partir, de un análisis matemático de la imagen permitiendo mejorar la repetitividad en los resultados.

Mediante la herramienta computacional desarrollada se obtuvieron índices de correlación entre el (99,2% y 99,97%) para las cuatro especies de plantas, mostrando claramente los altos índices de precisión del sistema cuando se compara con el método manual o con el método de la balanza de precisión.

Se validó el funcionamiento de la herramienta computacional por medio de la detección de los coeficientes de determinación, los cuales evidencian que el sistema desarrollado determinó el área foliar de las hojas con alta precisión en comparación con los métodos convencionales utilizados en la Universidad de Cundinamarca por técnicos expertos. El sistema obtuvo coeficientes de determinación mayores a 0,9894 para las hojas de limón, coeficientes de determinación mayores a 0,9683 para las hojas de almendro, coeficientes de determinación mayores a 0,9768 para las hojas de naranja y coeficientes de determinación mayores a 0,9965 en las hojas de mango, mostrando la precisión del sistema.

El sistema diseñado es de uso exclusivo de laboratorio, ya que a pesar de contar con una estructura metálica, no es portable debido a su peso y tamaño. Por otra parte, el uso de cámaras de seguridad no son aplicables a este tipo de investigaciones, estas cámaras cuentan con un lente con efecto ojo de pez, los cuales tienden a ampliar el ángulo de visión, lo cual genera distorsiones de la imagen, principalmente en el tamaño de los bordes difiriendo así la medida de su valor real.

El uso de filtros es totalmente dependiente del tipo de aplicación, en este caso este proceso no fue necesario debido a que la variable de iluminación estaba altamente controlada.

El método más impreciso desarrollado durante la investigación fue el de la balanza analítica, este método no se recomienda debido principalmente a que su costo no es justificable con su baja precisión.

Bibliografía

- Aragonés Ferrero, J., & Luján Mora, S. (2008). *Imagen digital*. Obtenido de Repositorio institucional de la Universidad de Alicante: http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/22135/4/gi_v-08_09-03-ImagenDigital.pdf
- Barrera, J., Suarez, D., & Melgarejo, L. M. (2010). Analisis de crecimiento en plantas. En *Experimentos en fisiología vegetal* (págs. 25-38). Bogota: Universidad Nacional de Colombia.
- Bidwell, R. (1993). *Fisiología vegetal*. Mexico: AGT Editor S.A.
- Cantone, D. (2008). *La biblia del programador: Implementación y Debugging*. Buenos Aires: MP Ediciones.
- Esqueda Elizondo, J. J. (2002). Fundamentos de procesamiento de imágenes. *Instituto tecnológico de ciudad madero* (págs. 1-50). Ciudad Madero: Conatec.
- Flores Pulido, L. (08 de Agosto de 2011). *Tipos de imagenes digitales*. Obtenido de Aicitel's Weblog: <https://aicitel.wordpress.com/>
- Gallo, K. (2015). *La Academia Safari Digital*. Obtenido de 02 Pixel Art: <http://digitalsafari.pbworks.com/w/page/84764749/02%20Pixel%20Art>
- Hassan Hajjiab, A. O. (2010). A Vision-based Approach for Nondestructive Leaf Area Estimation. *ESIAT*, 53-56.
- Hernandez G, M. S., Casas F, A. E., Martinez W, O., & Galvis V, J. A. (1995). Analisis y estimacion de parametros e indices de crecimiento del arbol de Maraco a primera floracion. *Agronomia Colombiana*, 182-191.
- HSIEN MING EASLON, A. J. (2014). EASY LEAF AREA: AUTOMATED DIGITAL IMAGE ANALYSIS FOR RAPID AND ACCURATE MEASUREMENT OF LEAF AREA. *Applications in Plant Sciences*, 4.
- Iglesias Garrote, J. L. (11 de 02 de 2015). *Arboles...(Trees)*. Obtenido de <http://arbolespain.blogspot.com.co/2015/02/tipos-de-hojas-compuestas.html>
- Innova Ocular. (2016). *El ojo humano*. Obtenido de Clinica Dr. Soler: <http://drsoler.com/>
- Jiaying Che, C. Z. (2009). Embeded Smart Camera in Meassuring Area of Plant Leaves . *IEEE Computer society*, 6-9.
- Jorge A. Delgado, K. K. (2013). The first Nitrogen Index app for mobile devices: Using portable. *ELSEVIER*, 3.

- Kapil Prashar, R. T. (2015). A Review on Efficient Identification of American Cotton Leaf Diseases through Training Set. *International Journal of Computer Applications*, 8.
- Kulkarni, A. H. (2013). A Leaf Recognition Technique for Plant Classification Using RBPNN and Zernike Moments. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 948-988.
- LI-COR. (2016). *Li-cor impacting lives through science*. Obtenido de https://es.licor.com/env/products/leaf_area/
- Lin, K., Wu, J., Chen, J., & Si, H. (2014). Measurement of plant leaf area based on computer vision. *Sixth international conference on measuring technology and mechatronics automation*, 401-405.
- Lira, J. (1995). *La Percepción Remota: Nuestros ojos desde el espacio*. Mexico: Fondo de cultura económica. Obtenido de <http://www.biblioises.com.ar/Contenido/000/010/63%20LA%20PERCEPCION%20REMOTA%20NUESTROS%20OJOS%20EN%20EL%20ESPACIO.pdf>
- Lissarrague, J. R., Baeza, P., & Sanchez de Miguel, P. (22 de Marzo de 2010). *Fotosíntesis*. Obtenido de OpenCourseWare: <http://ocw.upm.es/produccion-vegetal/viticultura/contenidos>
- Mahdi, M. A.-A. (2012). A new image-processing-based technique for measuring leaf dimensions. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci*, 1588-1594.
- Manuel Campos-Taberner, F. J.-H.-R.-V. (2015). Mapping Leaf Area Index With a Smartphone and Gaussian Processes. *IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS*, 5.
- MathWorks. (2016). *Matlab-Documentación*. Obtenido de <http://es.mathworks.com/help/images/reducing-the-number-of-colors-in-an-image.html>
- MINAGRICULTURA. (29 de 06 de 2016). *MinAgricultura integra proyecto para fortalecer política agroambiental*. Obtenido de <https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/minagricultura-integra-proyecto-para-fortalecer-politica-agroambiental.aspx>
- Ming Sun, J. S. (s.f.). Nondestructive Measurement of Tomato Seedlings during Their Growth Based on Machine Vision. 255-258.
- Molina, R. (2001). *Percepción Visual. El ojo humano*. Obtenido de <https://rubenbernal.wikispaces.com/file/view/PERCEPCIÓN+VISUAL.pdf>
- nutricion, F. A. (15 de Junio de 2009). *Beneficios de las verduras de hoja verde*. Obtenido de <http://www.fanutricion.org.ar/shop/detallenot.asp?notid=12>

- Ordoñez Santiago, C. A. (2005). Formatos de imagen digital. *Revista digital universitaria*, 1-10.
- ORGANIZACION DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACION Y LA AGRICULTURA. (2012). *Fortalecimiento de las políticas agroambientales en países de América Latina y el Caribe*. Obtenido de <http://www.fao.org/in-action/programa-brasil-fao/proyectos/politicas-agroambientales/es/>
- Perez, A. (20 de Diciembre de 2010). *Verduras verdes y hojas comestibles*. Obtenido de Escuela macrobiotica Cal'agnés: <http://agnesmacrobiotica.blogspot.com.co/2010/12/verduras-verdes-y-hojas-comestibles.html>
- Pino, F. (2 de Octubre de 2011). *El espectro visible de la luz*. Obtenido de <http://www.batanga.com/curiosidades/2011/10/02/el-espectro-visible-de-luz>
- pinterest. (2016). *Shapes of simple leaves*. Obtenido de <https://es.pinterest.com/>
- Piyush, C. S. (2012). Fast and accurate method for leaf area measurement. *International journal of computer applications*, 22-25.
- Puell Marín, M. C. (2006). *Optica Fisiologica: El sistema optico del ojo y la vision binocular*. Madrid: Complutense.
- R. Confalonieri a, M. F. (2013). Development of an app for estimating leaf area index using a smartphone. Trueness and precision determination and comparison with other indirect methods. *ELSEVIER*, 8.
- Real jardín botánico, CSIC. (Enero de 2010). *Las Hojas - Talleres de botanica*. Obtenido de www.rjb.csic.es
- Rico-Garcia, E. H.-H.-Z.-R. (2009). Two new methods for the estimation of leaf area using digital photography. *International journal of agriculture & biology*, 397-400.
- Rincon Guerrero, N., Olarte Quintero, M. A., & Perez Naranjo, J. C. (2012). Determinación del Área Foliar en Fotografías Tomadas con una Cámara Web, un Teléfono Celular o una Cámara Semiprofesional. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 65(1).
- Rodriguez, H. (2003). *Iniciacion a la imagen digital*. Obtenido de colorpack soluciones para fotografos&diseñadores: http://www.hugorodriguez.com/cursos/curso-idigital_01.htm
- Sachs, J. (1999). *Digital image basics*. Obtenido de Digital Light&Color: <http://www.dl-c.com/basics.pdf>
- Shivling, V. S. (2011). Plant leaf imaging technique for agronomy. *Image Information Processing (ICIIP), 2011 International Conference on*, 1-5.
- Soticon. (15 de Febrero de 2012). *Area foliar*. Obtenido de <http://es.slideshare.net/soticon/area-foliar>

- Stephen, G. W.-X.-F.-L. (2007). A Leaf Recognition Algorithm for Plant Classification Using Probabilistic Neural Network. *IEEE international symposium on signal processing and information technology*, 11-16.
- Universidad de los Andes. (2003). *Botánica: Las hojas*. Obtenido de Herbario MER:
<http://www.forest.ula.ve/herbariomer/estudiantes5.htm>
- Universidad de Oslo. (18 de Noviembre de 2008). *Digital images and image formats*. Obtenido de CHAPTER 14: <http://www.uio.no/studier/emner/matnat/math/MAT-INF1100/h08/kompendiet/>
- UNIVERSIDAD DEL VALLE. (2016). *Tecnología agroambiental*. Obtenido de <http://eidenar.univalle.edu.co/index.php/tecnologia-agroambiental>
- UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID. (2016). *Grado en ingeniería agroambiental*. (Escuela técnica superior de ingeniería agronómica, alimentaria y de biosistemas) Obtenido de <http://www.etsiaab.upm.es/>
- V.D. Shivling, A. S. (2011). Plant leaf imaging technique for agronomy. *ICIP*, 5.
- Visión Fotográfica. (20 de Agosto de 2011). *La resolución de la imagen digital. 300 dpi vs 72 dpi*. Obtenido de <http://www.ecbloguer.com/visionfotografica/?p=1286>
- Wolfram . (2016). *Computation Meets Knowledge*. Obtenido de <http://www.wolfram.com/>
- Zalikha, Z. P. (2011). Plant leaf identification using Moment invariants & General regression neuronal network. *11th International Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS)*, 430-435.