

MODELO DE UN SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DEL FRUTO
CHONTADURO *BACTRIS GASIPAES* POR SU TAMAÑO, FORMA Y
COLOR MEDIANTE EL SISTEMA DE INSPECCIÓN VISUAL ARTIFICIAL

DIANA CAROLINA MONTILLA PERAFÁN
AMANDA RUIZ HOYOS

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
POPAYÁN, CAUCA
2006

MODELO DE UN SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DEL FRUTO
CHONTADURO *BACTRIS GASIPAES* POR SU TAMAÑO, FORMA Y
COLOR MEDIANTE EL SISTEMA DE INSPECCIÓN VISUAL ARTIFICIAL

DIANA CAROLINA MONTILLA PERAFÁN
AMANDA RUIZ HOYOS

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERA FÍSICA

DIRECTOR
ING. LEONAIRO PENCUE FIERRO

COORDIRECTORA
ING. SANDRA PATRICIA GODOY

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
POPAYÁN, CAUCA
2006

NOTA DE ACEPTACIÓN:

ING. LEONAIRO PENCUE FIERRO
DIRECTOR TRABAJO DE GRADO

ING. LORENA MOTTA
JURADO

ING. JAVIER CORTÉS
JURADO

POPAYÁN, NOVIEMBRE 30 DE 2006

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean manifestar sus agradecimientos a:

Magíster Luis Fernando Echeverri, Coordinador del programa de Ingeniería Física por el constante apoyo, disponibilidad y por permitirnos el acercamiento al entorno empresarial.

Ingenieras Sandra Godoy y Lorena Motta de la facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad del Cauca, por sus asesorías y aportes tenidos en cuenta en este proyecto.

Profesores del departamento de física por crear la base del conocimiento de nuestra carrera.

Grupo WIF por mostrarnos otra faceta del conocimiento, por descubrir valores en el proceso de dar a conocer Ingeniería Física, por generar nuevos sueños y por proyectarnos para ir en busca de ellos y hacerlos realidad.

Grupo de Óptica y Laser en el área de procesamiento de imágenes, por brindar un espacio para compartir conocimientos y permitir acercarnos a sus respectivos trabajos de investigación.

Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Cauca por el soporte económico para dar a conocer nuestro proyecto.

Universidad del Cauca por facilitar los diferentes medios de aprendizaje y por hacer realidad nuestras ideas.

Sé que existe y que si me fe aumenta, con ella puedo mover montañas, sé que camina a mi lado siempre y que en los momentos difíciles me lleva en sus brazos, que nos da fuerza cuando nuestros ojos se empañan de lágrimas, que nos toma en sus manos para calmar nuestras angustias, sé que cuando le permitimos entrar en nuestro corazón, nuestra vida hasta ese entonces tiene sentido y se llena luz, que cuando caminamos los senderos que el ha marcado para cada uno de nosotros, nos acercamos cada vez más al encuentro con Él; a Dios principalmente dedico todos mis afanes, satisfacciones y alegrías vividas a lo largo del periodo de realización de este proyecto de vida.

A ti papá Dios, agradezco haberme regalado la familia que tengo, me premiaste cuando a mi lado colocaste personas tan llenas de ti. A ellos doy gracias por el incondicional apoyo, por las palabras constantes de aliento, por enseñarme el verdadero sentido de la humildad y por sembrarla con esmero en mi corazón...gracias por existir, gracias por abrazarme con la fuerza de los brazos del corazón... gracias por hacer sonreír al cielo cuando éste amenazaba con llorar

También te agradezco, haber colocado a lo largo de mi carera personitas tan especiales...mis amigos. A ustedes les llevaré en mi corazón siempre; cientos de gracias por hacer parte de mi vida, por haberla transformado y llenado de alegría, por permitirme compartir y aprender de cada uno de ustedes, por construir sueños y por pensar en hacer de ellos los más grandes para ir en su búsqueda y hacerlos realidad.

*El mundo está en manos de aquellos que tienen el coraje de soñar
y de correr el riesgo de vivir sus sueños”*

Anónimo

Amy

Sólo Dios me concede los beneficios naturales para hacer lo correcto:

...La felicidad de tener a mis padres, quienes me enseñan a vivir sabia y humildemente en medio de las grandes pruebas de la vida y están aquí para recordarme, que el genio y el talento se esfuman en prometidas ilusiones, sin la constancia.

...El amor de mi hermana, que ha hecho que juntas enfrentemos los desafíos sin darnos por vencidas y ante las desilusiones, levantar los ojos hacia el horizonte y creer de nuevo; y gracias Tita y Dari por la sonrisa de la princesa Laura Isabel, que me hace despertar del corazón la ingenuidad de entender que, en ocasiones, el mundo puede ser mágico.

...La existencia de mis abuelos, tios, primos como seres que me aman desde el momento en que reconocieron algo de ellos dentro de mí.

...El corazón de Alexander, que hace parte de un amor firme, profundo y cotidiano para emprender grandes acciones.

...La alegría de encontrar a mi compañera Amanda para crear juntas una meta que trasciende los límites de nuestros sueños.

...La amistad de Nancy, Chucho, Liliana y Diego que nació con vocación de eternidad y la huella de infinidad de amigos que valoran la existencia de mi cariño con el único sello aceptado por Dios.

...El apoyo incondicional de los profesores Luís Fernando y Leonairo, quienes han estado en el transcurso de nuestro proyecto y el inicio del reconocimiento como Ingeniera Física.

Diana Carolina

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1.1. Información nutricional.	28
Tabla 1.2. Características del fruto para su aplicación en conservas.	30
Tabla 2.1. Factores de calidad extrínsecos e intrínsecos para frutas y hortalizas de consumo en fresco.	36
Tabla 2.2. Parámetros que definen la calidad de un producto hortofrutícola.	43
Tabla 6.1. Parámetros para determinar el número de imágenes a capturar según el tamaño.	81
Tabla 6.2. Tamaño de la imagen-franjas.	82
Tabla 6.3. Centroides finales para la clasificación por tamaño.	83
Tabla 6.4. Funciones de decisión para la clasificación.	83
Tabla 6.5. Decisiones para clasificar con un nuevo valor de área.	84
Tabla 6.6. Criterios de clasificación por tamaño para su aplicación final.	85
Tabla 6.7. Evaluación de los frutos por tamaño.	85
Tabla 6.8. Rangos RGB para las diferentes tonalidades del chontaduro.	86
Tabla 6.9. Fracciones de área correspondientes a cada clase de color.	93
Tabla 6.11. Funciones de decisión para la clasificación.	95

Tabla 6.12. Clasificación por color por comparacion de valores dw.	95
Tabla 6.13. Evaluación de la clasificación por color.	95
Tabla 6.14. Rangos RGB para defectos en chontaduro amarillo.	97
Tabla 6.15. Rangos RGB para chontaduros rojos.	98
Tabla 6.16. Rangos RGB para chontaduros naranjas.	98
Tabla 6.17. Rangos RGB para chontaduros verdes.	98
Tabla 6.18. Rangos de área y criterios de clasificación para defectos tipo 1 y tipo 2.	103
Tabla 6.19. Criterios de clasificación para defectos tipo 3.	103
Tabla 6.20. Evaluación de la clasificación por defectos.	104
Tabla 6.21. Condiciones para determinar la presencia de cáliz.	106
Tabla 6.22. Centroides finales para la clasificación por forma.	107
Tabla 6.23. Criterios de Clasificación por forma.	107
Tabla 6.24. Evaluación del clasificador por forma.	108
Tabla 6.25. Evaluación final del sistema.	109
Tabla 6.26. Tiempos de ejecución empleados por el sistema.	110

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1.1. Gama de frutos chontaduros en El Tambo.	26
Figura 2.1. Parámetros más importantes que debe cumplir un producto hortofrutícola, según tres formas de entender la calidad en la cadena de producción y consumo.	38
Figura 2.2. Chontaduros en conserva.	39
Figura 2.3. Presentación de chontaduros en mermelada.	41
Figura 2.4. Presentación de chontaduros en harinas.	42
Figura 3.1. Esquema de un proceso de análisis de imágenes.	47
Figura 4.1. Estrategias de iluminación. a) Iluminación difusa y b) Iluminación posterior.	53
Figura 4.2. Iluminadores usados, para capturar la imagen del fruto en escena.	54
Figura 4.3. Esquema general del proceso de reconocimiento de un chontaduro.	58
Figura 5.1. Esquema simplificado del SIVA para la clasificación de chontaduros.	63
Figura 5.2. Cámara CCD y objetivo empleados.	64
Figura 5.3. Disposición del difusor y de la lámpara fluorescente en la cámara de iluminación difusa.	64

Figura 5.4. Banda giro-transportadora implementada.	65
Figura 5.5. Sistema de Adquisición de imágenes.	66
Figura 5.6. Cinco imágenes capturadas en diferentes posiciones de un fruto.	67
Figura 5.7. Imágenes adquiridas en movimiento con cámara CCD.	67
Figura 5.8. Cinco imágenes del chontaduro con franjas para concatenar y evaluar.	68
Figura 5.9. (a) Imagen capturada desde la cámara: Imagen RGB, y (b) Imagen preprocesada: Imagen-franjas.	68
Figura 5.10. Esquema para calcular la superficie de la franja.	69
Figura 5.11. Esquema general secuencial de las rutinas	70
Figura 5.12. Diagrama de bloque del proceso de adquisición de imagen.	71
Figura 5.13. Diagrama de la rutina de evaluación por tamaño.	72
Figura 5.14. Diagrama de tareas para la obtención de la imagen franjas.	73
Figura 5.15. Diagrama de bloque de las tareas de clasificación por color.	75
Figura 5.16. Diagrama de bloque de las tareas de clasificación por defectos.	77
Figura 5.17. Diagrama de bloques de las tareas de clasificación por tamaño.	78
Figura 5.18. Diagrama de bloques de las tareas de evaluación y clasificación por presencia de cáliz.	79

Figura 5.19. Diagrama de bloques de la descripción de tareas de la evaluación y clasificaron por forma.	80
Figura 6.1. Localización del fondo, (a) imagen segmentada y b) histogramas RGB.	82
Figura 6.2. Segmentación de la fruta, para clasificar por tamaño.	83
Figura 6.3. Clasificación de imágenes por tamaño.(a) pequeños, (b) medianos y (c) grandes.	84
Figura 6.4. Gama de colores en los chontaduros. a) Paleta de colores y b) Imagen segmentada con los rangos RGB.	86
Figura 6.5. Valores RGB verdes en imagen franjas. (a) Segmentación y (b) histogramas.	88
Figura 6.6. Valores RGB amarillo en imagen franjas. (a) Segmentación e (b) histogramas.	89
Figura 6.7. Valores RGB naranja en imagen franjas. (a) Segmentación e (b) histogramas.	90
Figura 6.8. Valores RGB rojo en imagen franjas. (a) Segmentación e (b) histogramas.	91
Figura 6.9. Segmentación por color de los chontaduros. (a) % de píxeles detectados en chontaduro rojo, (b) % de píxeles detectados en chontaduro naranja, (c) % de píxeles detectados en chontaduro amarillo y (d) % de píxeles detectados en chontaduro verde.	92
Figura 6.10. Correlación entre las variables del clasificador por color.	94

Figura 6.11. Procesado de imagen franjas para defectos. a) Imagen franjas y b) Imagen procesada.	96
Figura 6.12. Defectos en el chontaduro.	97
Figura 6.13. Imágenes de chontaduros naranja, originales y segmentadas para detección de defectos. a) defectos tipo 1, b) defectos tipo 2 y c) defectos tipo 3.	99
Figura 6.14. Imágenes de chontaduros amarillos, originales y segmentadas para detección de defectos. a) defectos tipo 1, b) defectos tipo 2 y c) defectos tipo 3.	100
Figura 6.15. Imágenes de chontaduros rojos, originales y segmentadas para detección de defectos. a) defectos tipo 1, b) defectos tipo 2 y c) defectos tipo 3.	101
Figura 6.16. Imágenes de chontaduros verdes, originales y segmentadas para detección de defectos. a) defectos tipo 1, b) defectos tipo 2 y c) defectos tipo 3.	102
Figura 6.17. Evaluación de los rangos RGB para presencia de cáliz. a) Frutos en el punto máximo de maduración, b) Frutos con zonas verdes en la piel, c) Frutos sin caliz y con zonas verdes en la piel.	105
Figura 6.18. Segmentación para clasificar por forma.	107
Figura 6.19. Clasificación por forma. (a) Alargados y (b) redondos.	108
Figura 7.1. Prototipo implementado. (a) Dispensador de chontaduros y cámara de iluminación, (b) banda giro-transportadora y mecanismo de posicionamiento	112, 113

GLOSARIO

BROMATOLÓGICO: Se encarga del estudio de los alimentos y de las materias alimenticias en cuanto a producción, manipulación, elaboración, distribución y marketing. Así como la producción de materias alimenticias y su relación con la sanidad.

CALIBRE: Parámetro relacionado con el tamaño del fruto.

CALIZ: Es la parte verde del fruto. Envuelta con función protectora, formada por hojas modificadas, generalmente verdes, llamadas sépalos.

DESTRÍO: Es el proceso de clasificación de un producto en las distintas calidades que pueda tener. También se denomina destrío a los productos rechazados de dicho proceso de clasificación por ser de una calidad inaceptable.

NUTRACEÚTICA: Técnica que pretende mejorar las características de un producto agroalimentario con la incorporación de determinadas sustancias.

EPIDERMIS: Tejido primario externo, usualmente de sólo una capa de células, que cubre la planta.

ESTÍPITE: Elemento en forma de tronco de pirámide invertido que puede tener funciones de soporte.

FITOPATOLOGÍA: Ciencia que estudia las enfermedades y plagas de las plantas.

MACANILLA: Aceite pastoso, producido por la semilla del chontaduro.

MAGULLADURAS: Oscurecimiento de la piel y ablandamiento del fruto en la zona afectada.

MESOCARPIO: Porción carnosa del fruto. Pulpa.

ORGANOLÉPTICA: Son el conjunto de descripciones de las características físicas que tiene la materia en general, como por ejemplo su [sabor](#), [textura](#), [olor](#) [color](#) . Todas estas sensaciones producen al comer una experiencia agradable o desagradable.

PALMITO: Es una palma erecta que en su estado adulto puede alcanzar hasta 20 m de altura. Su tallo es cilíndrico, con un diámetro de 10 a 25 cm. En algunos casos puede haber un pequeño grado de conicidad, de modo que la base es ligeramente más gruesa o más delgada que la porción central del tallo.

PANÍCULA O INFLORESCENCIA: Racemosa compuesta de racimos en la que los mismos van decreciendo de tamaño hacia el [ápice](#). En otras palabras, un racimo ramificado de flores, en el que las ramas son los racimos.

PEDÚNCULO: se llama pedúnculo a la ramita, o rabillo que sostiene la [inflorescencia simple](#). Es una característica definitoria de la [planta](#)

QUEQUES: Producto comestible a base de harina, huevo y mantequilla.

SÉMOLA: La sémola es la harina gruesa que procede del [trigo](#) y de otros cereales con la cual se fabrican diversas [pastas](#) alimenticias (raviolis, spaguettis, fideos...).

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	19
1 EL CHONTADURO BACTRIS GASIPAES. Y PERSPECTIVAS DE AGROINDUSTRIALIZACIÓN	26
1.1 ORIGEN Y DISTRIBUCIÓN	26
1.2 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA	27
1.3 TAXONOMÍA	27
1.4 VALOR NUTRICIONAL	28
1.5 PRINCIPALES ENFERMEDADES	28
1.6 PRODUCCIÓN	29
1.7 VARIEDADES	29
1.8 CARACTERÍSTICAS Y USOS DEL FRUTO	30
1.9 PROCESO DE ESTANDARIZACIÓN DE CONSERVAS, MERMELADA Y HARINA DE CHONTADURO	31
1.9.1 Características del fruto para el ingreso a proceso apto para aplicación en conservas.	31
1.9.2 Características del fruto para el ingreso a proceso, apto para aplicación en mermelada.	31
1.9.3 Características del fruto para el ingreso a proceso, apto para aplicación en harinas.	32
1.10 AGROINDUSTRIALIZACIÓN DEL CHONTADURO	32

2 LA CALIDAD DE LAS FRUTAS	35
2.1 ¿QUE ES LA CALIDAD?	35
2.2 FACTORES DE CALIDAD	35
2.2.1 Calidad legal	37
2.2.2 Calidad comercial	37
2.2.3 Calidad para el consumidor final	37
2.3 FACTORES DE CALIDAD EN EL CHONTADURO.	38
2.3.1 Aplicación en conservas	38
2.3.2 Aplicación en mermeladas	40
2.3.3 Aplicación en harinas	41
2.4 PARÁMETROS DE CALIDAD	42
2.4.1 Parámetros de calidad que se pueden cuantificar con un sistema de visión.	43
3 CLASIFICACIÓN INDUSTRIAL DE FRUTAS	45
3.1 SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN ACTUALES	45
3.1.1 Sistemas de clasificación manual.	45
3.1.2 Sistemas de clasificación semiautomáticos.	46
3.2 INSPECCIÓN VISUAL AUTOMATIZADA	46
3.2.1 Esquema general de un proceso de análisis de imágenes.	47
3.2.2 Ventajas de la inspección visual automatizada.	48
3.2.3 Desventajas de la inspección visual automatizada.	49

4. TÉCNICAS DE VISIÓN UTILIZADAS PARA LA CLASIFICACIÓN DEL CHONTADURO	52
4.1 LA ILUMINACIÓN	52
4.1.1 Estrategias de iluminación.	52
4.1.2 Tipos de iluminación	53
4.2 ADQUISICIÓN DE LAS IMÁGENES	55
4.3 TARJETAS DIGITALIZADORAS (<i>FRAME GRABERS</i>)	55
4.4 SEGMENTACIÓN	56
4.5 RECONOCIMIENTO DE OBJETOS	57
4.5.1 Estructura del clasificador.	58
4.5.2 Agrupamiento de datos: K Medias.	60
5 MODELO DE INSPECCIÓN VISUAL AUTOMÁTICO PARA LA CLASIFICACIÓN EN LÍNEA DEL FRUTO CHONTADURO	62
5.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA	62
5.2 DISEÑO DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES	64
5.2.1 El sistema de iluminación	64
5.2.2 Sistema mecánico	65
5.3 TIPOS DE IMÁGENES QUE SE EMPLEAN	67
5.4 ARQUITECTURA DEL SISTEMA DESARROLLADO	70
6 RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DEL FRUTO CHONTADURO	81

6.1 NÚMERO DE IMÁGENES A CAPTURAR	81
6.2 CLASIFICACIÓN POR TAMAÑO	82
6.3 DETECCIÓN DE COLOR	85
6.4 DETECCIÓN DE DEFECTOS	96
6.5 PRESENCIA DE CÁLIZ	104
6.6 CLASIFICACIÓN POR FORMA	106
6.7 EVALUACIÓN FINAL DEL SISTEMA	109
7 PROTOTIPO PARA LA CLASIFICACIÓN DE CHONTADUROS - SISTEMA DE INSPECCIÓN VISUAL AUTOMÁTICO	111
8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	115
BIBLIOGRAFÍA	117

INTRODUCCIÓN

MARCO DEL PROYECTO

EL presente proyecto se enmarca en el ámbito científico de la inspección automatizada, con el empleo de técnicas de visión e inteligencia artificial para la clasificación de frutos de la palma de chontaduro.

El CREPIC (Centro Regional de Productividad e Innovación del Cauca) es una organización que promueve la innovación y el mejoramiento de la productividad y competitividad en las organizaciones regionales, a través de la articulación, integración y desarrollo de las capacidades de los actores sociales, con el propósito de elevar la calidad de vida y el bienestar de la comunidad¹. Esta entidad en asociación con la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad del Cauca, Cámara de Comercio del Cauca y COOPROCHONTA (Cooperativa de Productores de Chontaduro), lideraron el proyecto macro: Fortalecimiento Integral de la Minicadena de la Palma de Chontaduro en el Departamento del Cauca. Con la ejecución de este proyecto se beneficiaron directamente los productores de chontaduro de la vereda Cuatro Esquinas del municipio de El Tambo (Cauca); comunidad que no cuenta con recursos económicos suficientes para desarrollar proceso de agregación de valor a su producto, es decir, la transformación de productos derivados, pues, el bajo poder de negociación que tienen frente a los intermediarios y distribuidores de su producto en grandes centros de acopio, la incipiente capacidad de trabajar con herramientas de calidad para el manejo del fruto y el insuficiente trabajo en equipo, los ha llevado a una situación de total desarticulación con los posteriores eslabones de la cadena productiva del fruto.

Los cultivadores de chontaduro de El Tambo son concientes de la necesidad de aprovechar las bondades de este trabajo articulado con organizaciones que hacen parte de la cadena

¹ CREPIC, Centro Regional de Productividad e Innovación del Cauca. Fortalecimiento integral de la minicadena de la palma de chontaduro en el departamento del Cauca. Popayán, 2002. p. 1.

productiva, debido a que pueden surgir e incursionar con los derivados de este fruto inicialmente en mercados locales y obtener beneficios de las altas cantidades cosechadas que, como en años anteriores, pueden ser de alrededor de las dos mil (2,000) toneladas².

Por falta de proyección a mediano y largo plazo con este producto y la marcada desarticulación de la cadena productiva, las entidades anteriormente mencionadas se trazaron como objetivo primordial la consolidación sistemática de los eslabones de la minicadena agroindustrial de la palma de chontaduro, y como metas específicas –entre otras- estandarización de los procesos de transformación del fruto de chontaduro en productos con valor agregado (conservas, mermeladas, harinas) y elaboración del plan de negocios, en el que se identificaron los países potenciales para comercializar el producto a través de un proceso de inteligencia de mercados; éstas actividades fueron resueltas en el proceso de investigación desarrollado en las plantas piloto de la Facultad de Ciencias Agropecuarias y por la Cámara de Comercio del Cauca a través de su Área de Comercio Exterior, respectivamente.

El encadenamiento de la agricultura de América Latina con la industria, sigue siendo un factor de desarrollo económico importante, de creación de riqueza y de empleo. En la agricultura mundial, la continua globalización y apertura de los mercados hacen imprescindible un esfuerzo para ofrecer productos de alta calidad, plenamente garantizada, ya que será éste el factor decisivo para su permanencia en el mercado, en competencia con países cuyos costos de producción son sensiblemente más bajos, o para abrir nuevos mercados muy exigentes³. Para lograrlo, la industria ha estado ligada a la sistematización de sus procesos, en consecuencia, uno de los objetivos primordiales de la industria es alcanzar el mayor grado posible de automatización. La industria agroalimentaria no es una excepción, y cada vez podemos encontrar más ejemplos de tareas realizadas de manera automática, en todos sus sectores: agricultura, ganadería o pesca.

2 CREPIC, Op, cit., p. 5

3 ESPINAL, Carlos F. Globalización e Integración Económica, Perspectiva Agrícola y Tecnológica para América Latina. Colombia, 2002, p. 7.

Actualmente, la falta de automatización de los procesos industriales en Colombia y otros países en vía de desarrollo, hace que los costos de producción sean muy elevados (fitosanitarios, herramientas, maquinaria, mano de obra para la recolección y selección de la fruta por calibres, color y defectos, etc.), así como los costos de manipulación en las centrales hortofrutícolas (trabajo manual en la tarea de selección, manipulación de contenedores de fruta, almacenamiento y conservación del producto, manejo y empaquetado final del producto, etc.) y todo ello, en gran parte, para garantizar la calidad de las exportaciones.

De igual forma, el alto costo en tiempo y mano de obra en las centrales hortofrutícolas, ha hecho promover y desarrollar sistemas capaces de resolver las tareas de forma automática. Una de las mayores dificultades dentro de la inspección es la supervisión de la apariencia visual. Ésta es encargada, en la mayoría de las ocasiones, a revisores humanos. El sistema de visión humano es adecuado para su funcionamiento en un mundo de variedad y cambio, mientras que para el proceso de inspección visual industrial, se requiere de la observación de una escena repetida de forma que se puedan detectar anomalías, por tal razón la exactitud del sistema humano disminuye debido al carácter monótono de esta inspección. El resultado es una inspección lenta, cara y errática. La inspección visual automatizada es, obviamente, la alternativa a los revisores humanos, liberándolos de tan arduo trabajo⁴.

La disminución de los costos de los componentes electrónicos y el aumento considerable de confiabilidad, precisión, rentabilidad e incremento de la relación costo/beneficio, hacen que la inspección automática del producto esté cada vez más introducida en el sector agrícola y en gran parte de los procesos industriales, sobre todo en aquellos que requieren un trabajo repetitivo o de gran precisión⁵. Los sistemas automáticos de inspección no solo permiten la selección de fruta a alta velocidad, sino también la aplicación de criterios objetivos de calidad que se mantienen constantes en el tiempo. Esta notable ventaja, hace que exista una demanda creciente de sistemas capaces de separar la fruta por color y categorías y, además sistemas que

4 ALEIXOS, Nuria. Desarrollo de técnicas de visión artificial utilizando procesadores digitales de señal. Valencia, 1999, p.10.

5 Ibid., p.12.

determinan el origen o causa del defecto, con el fin de seleccionar el mercado al que puede dirigirse la fruta: exportación, mercado interior, o incluso, para desviar hacia la industria parte del producto que en la actualidad simplemente se destruye.

Entre los posibles escenarios de los SIVA (Sistemas de Inspección Visual Automatizada), este proyecto se ha centrado en plantear una solución al problema de la sobreproducción del chontaduro en las diferentes regiones del país y del posicionamiento de este exótico fruto en mercados internacionales, usando la inspección visual y el procesamiento digital de imágenes como herramienta para la clasificación del fruto en distintas categorías y para el control de calidad; ya que es evidente que, entre los parámetros más importantes que definen la calidad de la fruta, están su aspecto externo y su color.

ALCANCE DEL PROYECTO. Los dos objetivos principales de la aplicación de técnicas postcosecha a los productos hortofrutícolas son mantener la calidad (apariencia, textura, sabor, valor nutritivo y sanitario) y reducir las pérdidas entre la cosecha y el consumo. La clave para alcanzar estos objetivos es un manejo eficiente durante el período de postcosecha, insertando tecnología con un alto nivel de desarrollo que permita la evacuación rápida del producto para su posterior clasificación (color, frutos de desecho, presencia de defectos, tamaño y forma). El uso de tecnologías avanzadas mediante la inversión de capital en maquinarias y técnicas modernas, ofrecen ventajas en las operaciones a gran escala, frecuentemente estas opciones no son factibles para los productores a pequeña escala por la simple razón de ser economías de bajo capital⁶.

En países desarrollados, las innovaciones tecnológicas en postcosecha más recientes tienen como objetivos disminuir el uso de mano de obra debido a su alto costo y satisfacer el deseo de que el producto altamente atractivo para el consumidor.

Las causas más comunes de pérdidas postcosecha en los países en vía de desarrollo y

⁶ Manual de práctica de manejo postcosecha de los productos hortofrutícolas a pequeña escala. CALIFORNIA, 1996, p.20

particularmente de la población objetivo, incluyen el manejo poco cuidadoso del producto y la falta de sistemas adecuados para el enfriamiento y el mantenimiento de la temperatura. A estos problemas se suman la falta de clasificación del producto antes de su almacenamiento y el uso de materiales inadecuados para el empaque. En general, si se minimiza el manejo brusco, si se realiza una preselección para eliminar el producto dañado y/o podrido y si existe un manejo eficiente de la temperatura, se reducirán las pérdidas y la vida útil del producto será mucho mayor.

Actualmente, la producción de chontaduro que se genera en ésta región solo se comercializa bajo la presentación en fresco, hacia los municipios y departamentos vecinos, y en la mayoría de los casos con total ausencia de prácticas de manejo postcosecha. La oferta del fruto solo es posible durante los dos periodos de cosecha que se presentan al año, lo que hace que se genere escasez en algunos meses.

La investigación realizada enmarcada en el proyecto macro buscó una alternativa que permitiera la generación de valor agregado, así como la prolongación de la vida útil y el mantenimiento de las características organolépticas del fruto. Se llevaron a cabo una serie de pruebas con el fin de estructurar el proceso de elaboración de conservas manteniendo el fruto en salmuera y en almíbar; de igual manera se probó la conservación mediante la fabricación de mermeladas y harinas, éste ultimo producto por ser una materia prima importante para la transformación de otros subproductos alimentarios y no alimentarios. El proceso de estandarización de los cuatro productos se realizó a partir de cinco aspectos fundamentales: elección de una variedad de fruto adecuada para cada proceso, pH, sólidos solubles del producto final, tratamiento térmico de conservación y empaque de cada uno; para que su presentación comercial fuera atractiva y competitiva en el mercado. Estos resultados son utilizados en este proyecto que tiene como objetivo ofrecer una solución metódica para el diseño de sistemas SIVA y para la clasificación automática del fruto de la palma de chontaduro en diferentes categorías.

La consecución de este objetivo debe cubrir los parámetros y criterios para el diseño del sistema de iluminación sobre los frutos, estrategias de arquitectura de adquisición de escenarios SIVA, la elaboración de algoritmos de detección y la representación virtual de color, defectos, presencia de cáliz, junto con la selección de las mejores características para clasificar por tamaño y forma, y por último la implementación de actuadores, que son los que finalmente depositan el fruto en el espacio asignado dependiendo de su estado y/o condición. Como marco del desarrollo experimental del proyecto, así como de la aplicación industrial, se ha implementado un SIVA a modo de prototipo, que es capaz de clasificar un fruto según su aplicación en las distintas categorías: mermeladas, conservas y harinas.

ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

La configuración del proyecto en capítulos viene dada como sigue: un capítulo inicial en el que se enmarca el trabajo desarrollado en esta aplicación.

El siguiente capítulo está dedicado al chontaduro, fruto de estudio en este proyecto; se detallan tanto los valores fisicoquímicos del fruto como las amplias posibilidades de agroindustrialización.

Un segundo capítulo que amplía temáticas relacionadas con el control de calidad de frutas y el del fruto de la palma de chontaduro.

En el capítulo 3 se refieren aspectos importantes de los sistemas de inspección visual artificial; tópico esencial para el desarrollo total de la aplicación puesto que en el modelo de clasificación implementado se encuentran inmersas diferentes disciplinas que permiten al final obtener un sistema autónomo de clasificación de frutos.

En el capítulo 4 se describen las diferentes técnicas de visión utilizadas para implementar sistemas de inspección visual artificial e incluye los diferentes tipos de iluminación, pasando

por las cámaras CCD (*Charge Coupled Devices*), tarjetas digitalizadoras de imágenes hasta la técnica de segmentación, características y parámetros de clasificación empleadas en el proyecto.

En el capítulo 5 se describe con detalle, el modelo de clasificación del fruto, que incluye los sistemas de iluminación, mecánico y actuadores implementados y, los diferentes algoritmos que inician con el preprocesamiento de las imágenes hasta la clasificación final.

Para finalizar en el capítulo 6 se evalúa la fiabilidad de los algoritmos implementados y en el capítulo 7 se describe el funcionamiento del prototipo implementado y se muestra el porcentaje de fiabilidad y los tiempos que el sistema toma en clasificar el fruto. Adicionalmente se hacen algunas recomendaciones para mejoras del sistema.

1. EL CHONTADURO BACTRIS GASIPAES Y PERSPECTIVAS DE AGROINDUSTRIALIZACIÓN

1.1 ORIGEN Y DISTRIBUCIÓN

EL chontaduro fruto importante de la agrobiodiversidad del trópico húmedo de América Latina, se encuentra bien representado en las regiones del Pacífico y Amazonía Colombiana, con lluvias entre 1.900 a 5.000 mm al año y temperaturas medias entre 23 a 28°C; ha sido cultivada por los indígenas del trópico americano desde la época precolombina, particularmente para el consumo de sus frutos¹. Estas condiciones se dan en el área tropical entre 0 a 800 msnm; debido a ello, este fruto puede desarrollarse en la región de Cuatro Esquinas Tambo y su variedad se ve representada en la figura 1.1.

Figura 2.1. Gama de frutos chontaduros en El Tambo.



Fuente: Autores.

Entre los usos del chontaduro se tienen los siguientes: Producción de Frutas: pulpa, harina y aceite (consumo humano); concentrado y enlaje (consumo animal); Producción Vegetativa: palmito (consumo humano), madera y hojas (construcción), ornamentales.

El aporte en nutrientes de este fruto, cultivado artesanalmente, y cosechado dos veces al año,

¹ REYES, Rafael. El cultivo de chontaduro (*Bactris Gasipaes* K.) para palmito. CORPOICA No 5. Colombia, 1997, p. 1.

lo hace gran exponente de la nutraceutica (es decir aquellos que además de ser alimentos cumplen la función medicinal)²; éstas propiedades del fruto, que lo hacen uno de los más exóticos de la región, lo proyectan para la industrialización en territorios nacional e internacional.

1.2 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

Palmas erectas que alcanzan hasta 20 m. de altura y un diámetro de entre 15 y 30 cm, se caracteriza por la formación de hijuelos en la base del estúpito. La gran mayoría de las razas presentan tronco con espinas que varían en número, longitud y diámetro. El follaje está compuesto de una corona de 15 a 25 anillos, con las hojas insertadas a diferentes ángulos, las hojas tiernas sin expandir en el centro de la corona forman lo que se denomina el palmito. Las inflorescencias formadas por numerosas flores masculinas y femeninas se disponen en panículas debajo de la copa de las hojas. Los frutos varían en forma y composición, pueden ser ovoides, cónicos y redondeados y tienen un tamaño que varia entre los 3 y 8 cm; se encuentran frutos con altos contenidos de harina o de aceite³.

1.3 TAXONOMÍA

La especie recibe distintos nombres comunes. Así, se denomina *pijuayo* y *chonta* en el Perú; *chontaduro* y *pijuayo* en Ecuador; *pijuayo*, *pichiguao* y *macana*, en Venezuela; *parépon* en la Guayana Francesa; *amana* en Surinam; *pupunha* y *pirijao* en Brasil; *tembé* en Bolivia; *pejibaye*, *pijuayo* y *pijibay* en Costa Rica y Nicaragua, y *pijuayo* en Panamá. En Colombia se le conoce con diversos nombres, según las regiones, los dialectos indígenas y los culturales, así: *cachipay* en Caquetá, Cundinamarca, Huila y Tolima, *chichaqui* en Mariquita (Tolima), *pichiguoo* en Bajo Atrato, Chocó, Río Sinú (Córdoba), *pipire* Llanos Orientales, Vaupés, *pupugna* en Amazonas y Vaupés.

² RIOS, A. Perspectivas para la agroindustrialización del chontaduro *Bactris gassipaes* en la zona de influencia del municipio de Quibdo. Choco, 1997, p. 5.

³ REYES, Rafael. Op cit., p. 10.

Este fruto con diferente denominación en distintas regiones recibe como nombre científico *Bactris gasipaes*. y pertenece a la familia *Arecaceae – palmae*⁴.

1.4 VALOR NUTRICIONAL⁵

Los análisis físico-químicos realizados sobre 100 grs. de parte comestible revelan según tabla 1.1, el valor nutricional de éste fruto.

Tabla 1.1. Información nutricional.

VALOR NUTRICIONAL	%	VALOR NUTRICIONAL	%
Carbohidratos:	37.6	Calcio:	23 mgr.
Agua:	52.2	Fósforo:	47 mgr.
Grasa:	4.6	Hierro:	0.7
Proteína:	3.3	Calorías:	185
Fibra:	1.4	Aceite:	2-60

Fuente: Cartilla básica de extensión No 11 “El Chontaduro”.

1.5 PRINCIPALES ENFERMEDADES

En el chontaduro se encuentran dos principales enfermedades causadas por hongos. Adicionalmente presentan daños mecánicos en la epidermis o piel a causa de las espinas de la palma o al proceso de cosecha, estos daños provocan susceptibilidad al fruto para su contaminación.

La pudrición negra del fruto es causada por el hongo, *Ceratocystis spp.* El fruto se suaviza y su

⁴ CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL CAUCA. El Chontaduro. Popayán, 2001, p. 3.

⁵ Ibid., p.27.

piel cambia a color negro. La pulpa se pone primero de color amarilla y después negra. A estos defectos se denominan tipo 1.

La pudrición blanca del fruto, causada por el hongo *Monilia sp*, se destaca cuando parte de la superficie se pone blancuzca y huele mal⁶. La denominación de estos defectos es de tipo 2.

Por último, los defectos causados por daños mecánicos, espinas de la planta o deformaciones se les llaman tipo 3.

Las denominaciones de estos defectos solamente se asignaron para este proyecto con el objeto de generar facilidad de distinción.

1.6 PRODUCCIÓN

Un racimo normal puede contener entre 50 a 100 frutos, con un rendimiento promedio de frutos por hectárea, año de 20 toneladas. Cada racimo pesa en promedio entre 4 y 7 kilogramos, aunque se ha llegado a encontrar racimos con más de 25 kilos. El fruto de chontaduro no tiene pedúnculo, como otras frutas, sino que nace pegado directamente de las espigas; varía mucho en la forma, color y tamaño. El crecimiento y formación se realiza en dos fases: en la primera el fruto crece en tamaño y peso, y en la segunda ocurre la maduración del fruto. Dependiendo del tamaño del fruto, las razas se clasifican en: microcarpas (frutos con peso menor a 20gr.), mesocarpas (frutos con peso entre 21 y 70 gr.) y macrocarpas (frutos con peso superior a 70 gr.)⁷:

1.7 VARIEDADES

⁶ CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL CAUCA. Op. cit., p. 24.

⁷ Ibid., p. 25.

En la región de El Tambo se cosechan diferentes variedades de chontaduro, aquellas que no han sido estandarizadas a nivel nacional; por esta razón la Facultad de Agroindustria realizó en su investigación pruebas para lograr estandarizar los procesos para la elaboración de subproductos. Entre los resultados se definieron tres tipos de variedades para su aplicación exclusiva en conservas (Tabla 1.2)⁸.

Tabla 1.2. Características del fruto para su aplicación en conservas.

VARIETADES	CARACTERÍSTICAS
Variedad 1	frutos con pigmentación naranja y forma cónica
Variedad 2	frutos con pigmentación roja y forma cónica achatada
Variedad 3	frutos con pigmentación roja y forma cónica alargada

Fuente: Proyecto de estandarización de productos con chontaduro.
Planta piloto Agroindustria

1.8 CARACTERÍSTICAS Y USOS DEL FRUTO

De acuerdo con las variedades, los frutos maduros pueden tener un color verde amarillento o, por el contrario, tomar una coloración dorada, anaranjada, bermeja o carmínea. Los frutos verdes o amarillos contienen más lípidos y proteínas que los rojos, mas ricos en caroteno. Los frutos se emplean para la alimentación humana y animal. Se pueden conservar en salmuera, jarabe o transformarse en harina; esta harina, puede ser utilizada tal cual en la preparación de sémola, galletas o queques, así como servir de base para bebidas alcoholizadas después de la fermentación. De la pulpa, también se puede extraer un aceite muy suave; de las semillas se extrae un aceite de palma comestible y pastoso, la mantequilla de macanilla; de las variedades de fruto rojo, se extrae un pigmento alimenticio para darle color al arroz y a otros productos⁹.

⁸ GODOY, Sandra. Proyecto: fortalecimiento integral de la minicadena de la palma de chontaduro estandarización de productos con chontaduro. Popayán, 2004, p. 12.

⁹ GODOY, Sandra. Op. cit., p. 13.

1.9 PROCESO DE ESTANDARIZACIÓN DE CONSERVAS, MERMELADA Y HARINA DE CHONTADURO¹⁰

1.9.1 CARACTERÍSTICAS DEL FRUTO PARA EL INGRESO A PROCESO, APTO PARA APLICACIÓN EN CONSERVAS. En cuanto a las características de la materia prima, es necesario tener en cuenta que el factor influyente en la decisión de compra de un fruto en conserva es la presentación del producto, razón por la cual es importante que se controlen factores como la forma, el tamaño, la sanidad del fruto, el estado de madurez y la ausencia de daños mecánicos o microbiológicos en la epidermis.

Para los frutos elegidos que correspondan a la variedad roja de forma cónica y alargada, se aceptan con diámetros entre 3.0 y 3.5 cm. y con una longitud entre 4.5 y 5 cm; frutos con dimensiones superiores dificultan el envasado. Si hay ausencia total de daños el fruto es destinado a conservas con cáscara; en caso contrario se toleran daños mecánicos superficiales, más no microbiológicos para conservas en que el chontaduro va desprovisto de su cáscara.

1.9.2 CARACTERÍSTICAS DEL FRUTO PARA EL INGRESO A PROCESO, APTO PARA LA APLICACIÓN EN MERMELADAS. Las características del chontaduro que ingresa al proceso de elaboración de mermelada no son tan exigentes como las que se requieren para la elaboración de conservas, por eso el fruto debe cumplir con:

¹⁰ Ibid., p. 15.

- Ausencia de daños causados por insectos u hongos. Cuando un insecto ataca el fruto, deja dentro del mismo sus larvas las cuales se desarrollan y de procesarse se introduce no sólo contaminación sino también proteína animal lo cual es prohibido por la norma; así mismo si se presentan daños por hongos se altera la calidad microbiológica del producto final.
- Ausencia de espinas en el mesocarpio o pulpa. La calidad microbiológica de la mermelada se ve alterada al presenciar este tipo de defectos, por que permiten el ingreso de microorganismos, hongos y levaduras.
- Se aceptan leves daños mecánicos en la epidermis del fruto. De los daños mecánicos que se producen en el fruto a causa de la manipulación durante el transporte, se aceptan sólo aquellos golpes o rasguños superficiales y muy pequeños que no representen una amenaza posterior durante el proceso.
- Frutos cuyo contenido graso no sea excesivo. De las variedades trabajadas se identificó que las amarillas poseen mayor cantidad de grasa lo cual se ve reflejado por la presencia de pequeñas vetas de grasa en el producto, desmejorando su apariencia y haciéndolo susceptible de sufrir procesos de oxidación durante la etapa de almacenamiento. Por tanto las variedades rojas por poseer menores contenidos de grasa aportan mejores características al producto final en los aspectos antes mencionados.

1.9.3 CARACTERÍSTICAS DEL FRUTO PARA EL INGRESO A PROCESO, APTO PARA APLICACIÓN EN HARINAS. Debe considerarse que la materia prima destinada para la elaboración de harina de chontaduro es de segunda y tercera clase, en el proceso de selección deben retirarse los frutos que presenten sobremadurez o que estén infectados por hongos o fitopatologías.

1.10 AGROINDUSTRIALIZACIÓN DEL CHONTADURO

El chontaduro es un fruto que cada día adquiere mayor importancia tanto en el ámbito nacional como en el internacional, debido a su alto valor nutritivo. Algunas autoridades científicas lo han denominado el “huevo vegetal” para resaltar su valor nutritivo y ningún otro producto agrícola ha recibido este calificativo. La demanda como fruto cocido (forma actual de consumo) es cada día creciente llegando a tal magnitud que los precios se han incrementado en casi un 300% en los últimos tres años.

Existen otras alternativas de consumo como son: la harina de chontaduro - la cual se obtiene luego de los procesos de precocción o escaldado, deshidratación y reducción de tamaño y molienda - es un producto con alto potencial para el consumo humano, en presentaciones tales como: tortas, galletas, pan, pastas, pasabocas, entre otros. Las características nutricionales de esta harina son excepcionales y pueden suplir la necesidad de proteínas, vitamina A, y de minerales necesarias para la alimentación diaria de algunas comunidades detectadas como vulnerables desde el punto de vista alimenticio. Es también importante considerarla como posible materia prima en la producción de concentrados, con el fin de utilizarse para consumo animal, con la posibilidad de aprovechar la cáscara, y otros subproductos como la semilla. El palmito es otro producto obtenido del corazón de la palma de chontaduro.

La palma de chontaduro es una especie potencial para el desarrollo de la agroindustria que beneficia la producción de fruto o de palmito. En Colombia la investigación de la especie fue iniciada por la Secretaría de Agricultura del Valle del Cauca y continuada por instituciones como las Universidades del Valle y Nacional sede Palmira. El programa de Ingeniería Agroindustrial de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad del Cauca realizó estudios físico-químicos del fruto, dirigido principalmente a su aprovechamiento, logrando estandarizar los procesos de transformación en productos con valor agregado (conservas, mermelada, harina para nutrición humana). En el municipio de Quibdó (Chocó) se ha pensado en agroindustrializar, pues, los estudios adelantados para la obtención de harinas revelan la posibilidad de diversificar el producto. Los análisis bromatológicos y estudios realizados revelan que el chontaduro es uno de los productos vegetales más completos como alimento.

Hace 5 años en un informe del INCORA (Instituto Colombiano de Reforma Agrícola) se solicitaban por parte del gobierno Holandés aproximadamente 12 toneladas de harina de chontaduro al mes, actitud que muestra el interés internacional por este exótico fruto. Esto motivó a los agricultores de las zonas de producción a establecer cultivos comerciales ante las buenas perspectivas de su mercadeo nacional e internacional.

Sobre las perspectivas futuras del mercado internacional se indica que la posibilidad de la expansión es amplia, estando limitada solo por la falta de diversificación y promoción de sus derivados. La competencia siempre estará presente, la cual será por calidad, precios y diversidad de productos. La evolución de la tecnología del cultivo, con aumentos del rendimiento y una reducción de los costos de producción, que incluye la introducción de nuevas variedades, contribuirán a la competitividad de los países productores. Sin embargo, el fomento del cultivo debe ser bien planificado y requiere involucrar productores con vocación empresarial que le den manejo técnico al cultivo. Esto permitirá la obtención de producciones rentables como resultado de una organización de producción y comercialización adecuada, acorde a las necesidades del mercado nacional e internacional¹¹.

Siendo el chontaduro altamente perecedero (vida útil de aproximadamente 5 días) y cultivado en zonas alejadas, se hace necesario implementar sistemas automáticos que clasifiquen de forma rápida y eficaz el producto, así como realizar estudios científicos y técnicos para su conservación.

¹¹ REYES, Rafael. Op. cit., p. 30.

2. LA CALIDAD DE LAS FRUTAS

LAS frutas y hortalizas son productos perecederos y tras la recolección sufren un deterioro más o menos acusado. En el momento de la cosecha termina la acumulación de materias básicas y de agua desde la planta madre, pero el fruto sigue teniendo vida propia: consume sus reservas, va perdiendo agua y, con el tiempo, acaba envejeciendo para secarse o podrirse¹². Por este motivo, una vez cosechada, la fruta se selecciona en las líneas de confección para eliminar la fruta defectuosa o demasiado pequeña y agrupar la fruta restante en diferentes categorías comerciales según el calibre, el color y los defectos externos.

2.1 ¿QUÉ ES CALIDAD?

En la actualidad, se relaciona la calidad de un producto con las cualidades y características que éste presenta, así como los procesos de producción que ha sufrido desde su origen hasta que llega al consumidor¹³.

En el caso de frutas y hortalizas la calidad consiste en ofrecer un producto cuyas características más importantes son el calibre, la firmeza, el color, la calidad gustativa y la ausencia de defectos.

2.2 FACTORES DE CALIDAD

En la calidad de las frutas, hay que tener en cuenta una serie de factores que dependen únicamente de las condiciones intrínsecas del fruto y otros factores que dependen de las manipulaciones o transformaciones que sufre, y que pueden mantener o deteriorar su estado original.

¹² PONS, Rosa. Evaluación de métodos no destructivos, para determinar la calidad de la fruta. Valencia, 2000, p. 5.

¹³ MAZUZ, C.. Calidad de frutos cítricos. Valencia: Ediciones de Horticultura S.L, 1995, p. 10.

Además de los parámetros intrínsecos del producto, existen otros factores a tener en cuenta en el concepto de calidad y que influyen en la venta de frutas y hortalizas: la presentación en envases atractivos y adecuados, la información proporcionada al consumidor y las exigencias del distribuidor.

Se puede hablar de los factores intrínsecos, definidos por las características fisiológicas del fruto (*parámetros* si son medibles y *atributos* si no lo son), y de los factores extrínsecos, relacionados con la presentación del producto¹⁴. En la tabla 2.1 aparecen algunos de estos factores de calidad.

Tabla 2.1. Factores de calidad extrínsecos e intrínsecos para frutas y hortalizas de consumo en fresco.

FACTORES INTRÍNSECOS		FACTORES EXTRÍNSECOS
<i>Parámetros</i>	<i>Atributos</i>	
Calibre, Peso	Estado de desarrollo	Presentación del producto
Firmeza, Color	Olor, Textura	Homogeneidad
Contenido en zumo	Facilidad de pelado	Facilidad consumo
Contenido en sólidos solubles	Sabor,	Envases adecuados
Contenido en ácido cítrico	Comestibilidad	

Fuente: Tesis Doctoral. “Calidad de Frutos Citricos”.

La cadena de alimentación para los productos hortofrutícolas se inicia en el productor, continúa en la central, donde se clasifica la fruta que llegará al distribuidor (un mercado mayorista y una cadena de supermercados) y de ahí al consumidor final.

Sobre las frutas y hortalizas que se mueven en esta cadena influyen varios factores que pueden englobarse en tres modos de entender la calidad:

¹⁴ MAZUZ, Op. cit., p. 15.

2.2.1 CALIDAD LEGAL. Es la que dictan las Normas de Calidad “para una homogeneización y mayor transparencia del mercado de frutas y hortalizas, así como para contribuir a mejorar la calidad y las condiciones higiénico-sanitarias de estos productos, satisfacer en mayor medida las exigencias del consumidor, favorecer una competencia leal y aumentar la renta agrícola”¹⁵. Estas Normas, fijan entre otros parámetros, unas condiciones mínimas de calibre y de aspecto de la fruta.

2.2.2 CALIDAD COMERCIAL. Es la que tienen en cuenta la central hortofrutícola y también el distribuidor. Estaría basada en las Normas de calidad, que son en definitiva unos requisitos legales que cumplir, pero tiene en cuenta otros factores, como las características de firmeza de la fruta, para que pueda soportar la manipulación en la central y el transporte, unos factores intrínsecos del producto, como son frescura, tamaño y color. y otros factores extrínsecos, relacionados con las exigencias del distribuidor, como puntualidad en los envíos, tipificación del producto, envases adecuados y etiquetaje correcto¹⁶.

2.2.3 CALIDAD PARA EL CONSUMIDOR FINAL. Es la que desea adquirir fruta con unos buenos atributos fisiológicos: buen aspecto, buen sabor y elevado valor nutritivo. Además, con un precio ajustado y una presentación correcta. Los *deseos* del consumidor final se recogen parcialmente en las Normas de Calidad y a través de las exigencias del distribuidor¹⁷.

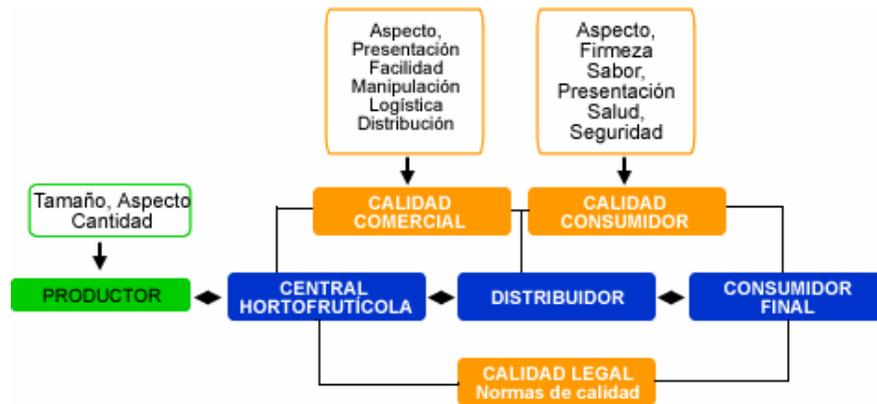
En la figura 2.1 se esquematiza la cadena de producción y consumo de frutas y hortalizas, con los parámetros más importantes que debe presentar el producto en cada una de las tres formas de entender la calidad.

¹⁵ MAPA, Ministerio de agricultura, pesca y alimentación. Normas de calidad para frutas y hortalizas. Valencia, 1992. p. 15.

¹⁶ PONS, Op. cit., p. 28.

¹⁷ Ibid, p. 30

Figura 2.1. Parámetros más importantes que debe cumplir un producto hortofrutícola, según tres formas de entender la calidad en la cadena de producción y consumo.



Fuente: Tesis doctoral. “Evaluación de métodos no destructivos, para determinar la calidad de la fruta”.

El distribuidor constituye un eslabón intermedio entre la central hortofrutícola y el consumidor y exige unas cualidades propias del consumidor al mismo tiempo que persigue unos objetivos similares a los de la central. La calidad que desea el consumidor es la más importante, pues es quien compra el producto. El consumidor, en el momento de la compra, se fija en el aspecto del fruto, en su firmeza, en el aroma, en la forma de presentación y en el precio. También se puede fijar en la etiqueta, para conocer el origen de la fruta, la presencia o no de pesticidas, la categoría y la marca. Una vez que ya ha comprado el producto, se fijará en el sabor y en la textura, de manera que, si queda satisfecho, es probable que busque de nuevo ese mismo producto y con la misma marca.

La calidad organoléptica es otro aspecto importante, que hoy en día también se empieza a cuidar. Sin embargo, la determinación en la central de parámetros como la firmeza, el dulzor y el aroma, no resulta sencilla, ya que los métodos utilizados son de tipo destructivo o bien de difícil implementación en línea.

2.3 FACTORES DE CALIDAD EN EL CHONTADURO

2.3.1 APLICACIÓN EN CONSERVAS. A lo largo de la estructuración del proceso para la elaboración de chontaduro en conserva (figura 2.2), se llevaron a cabo una serie de pruebas en las cuales las características de la materia prima suministrada variaron, en cuanto a calidad y variedad; principalmente se trabajó con tres tipos de frutos, diferenciados esencialmente por su forma y coloración.

Figura 2.2. Chontaduros en conserva.



Fuente: Proyecto de estandarización de productos con chontaduro. Planta piloto Agroindustria

De las tres variedades de chontaduro mencionadas anteriormente, los frutos con pigmentación roja y forma cónica alargada fueron los que presentaron el mejor comportamiento; ese mejor comportamiento se vio reflejado en facilidad de acomodación al interior del envase, color atractivo, fácil pelado y especialmente, en la escasa migración de grasa del fruto hacia el líquido de gobierno en las conservas de chontaduro tanto con cáscara como sin cáscara; este comportamiento se da, ya que las variedades rojas son más ricas en carotenos que en lípidos, mientras que en las amarillas ocurre el caso inverso. En cuanto a la variedad roja achatada, se descartó ya su forma dificulta la acomodación en el envase, y por otra parte, el pelado de esta variedad es difícil ya que la cáscara viene bastante adherida al fruto, lo que hace que al pelarlo el aspecto del fruto se vea afectado.

- **Formas para la presentación del fruto:** de las cuatro posibles formas de presentación sometidas a evaluación (chontaduro con cáscara, chontaduro sin cáscara, mitades y cuartos), se decidió descartar aquellas en que el chontaduro era fraccionado, es decir, las correspondientes a mitades y cuartos, debido a que generaban, a lo largo del almacenamiento, una gran cantidad de sólidos sedimentados a manera de pulpa, que afectan la apariencia del producto.

De las dos presentaciones elegidas, la correspondiente a los chontaduros enteros con cáscara es la más atractiva, gracias al brillo y transparencia que se obtiene en el líquido de gobierno. En cuanto a la presentación en que los chontaduros se envasan enteros y sin cáscara, se decidió optar por ella, a pesar de la presencia de una leve cantidad de sólidos precipitados, ya que esta presentación actualmente no está disponible en el mercado y se constituye en una alternativa atractiva para el consumidor pues le ofrece un producto listo para consumir, que no requiere pelado.

La cantidad de sólidos precipitados que se genera en la presentación de los frutos enteros sin cáscara, se puede ver aminorada mediante un acabado apropiado del pelado, es decir, redondeando puntas y evitando dejar fracciones semi-sueltas que más tarde se puedan desprender.

- **Firmeza del fruto:** se buscó igualmente incrementar la firmeza del fruto, con el fin de disminuir el desprendimiento de sólidos y su posterior precipitación en el envase, mediante la adición de cloruro de calcio al líquido de gobierno. El cloruro de calcio es un aditivo alimentario utilizado como endurecedor en algunos vegetales en conserva.
- **Características del envase:** frascos de vidrio de 12 cm de profundidad y 7.8 cm de diámetro, con tapa rosca metálica dorada, previamente esterilizados en agua a temperatura de ebullición, durante 30 minutos.

2.3.2 APLICACIÓN EN MERMELADAS. La calidad final de la mermelada (figura 2.3) va a depender necesariamente de las características de sanidad, madurez y composición de las frutas que se empleen.

Figura 2.3. Presentación de chontaduros en mermelada.



Fuente: Proyecto de estandarización de productos con chontaduro.
Planta piloto Agroindustria

Los frutos destinados a la elaboración de mermeladas deben estar sanos. Si se emplean frutas con principios de descomposición en las que sus características de color, aroma o sabor hayan cambiado, deben ser descartadas. Estos cambios generalmente se producen por hallarse rotas, magulladas, o sobremaduras. Cualquiera de estos estados favorece el desarrollo de microorganismos. Estos últimos invaden las frutas entrando por las heridas causadas por maltratos o perforaciones de insectos. El grado de madurez de las frutas influye en las características fisicoquímicas y sensoriales del producto final. Es así como las frutas pintonas no han desarrollado completamente su color, aromas y sabores característicos, lo cual afecta las características organolépticas del producto final.

2.3.3 APLICACIÓN EN HARINAS. Cada variedad de chontaduro presenta cualidades diferentes en cada una de las etapas en la obtención de harina (figura 2.4); por lo tanto, se hizo

necesario establecer la humedad del fruto, para cada variedad, y estimar la pérdida de peso durante la deshidratación.

Figura 2.4. Presentación de chontaduros en harinas.



Fuente: Proyecto de estandarización de productos con chontaduro.
Planta piloto Agroindustria

Una vez tamizada, clasificada y seleccionada, la harina se puede empaquetar en un empaque flexible no respirable, de resistencia mecánica alta, y que cierre con una selladora convencional. Se busca evitar que entre humedad del medio al producto, se pierdan características de olor y sabor, y que haya contaminación con insectos o materias extrañas. Sin embargo, las cantidades a ubicar en cada empaque y el tipo del mismo, dependen de las necesidades del cliente y las condiciones de almacenamiento.

2.4 PARÁMETROS DE CALIDAD

Hasta hace unos años, lo único que se exigía de un producto alimentario era su presencia en el mercado al menor precio posible, ya que la principal preocupación era garantizar una

alimentación diaria aceptable¹⁸. Pero en la actualidad, la presencia de excedentes alimentarios hace que el mercado sea cada vez más competitivo y, por tanto, cuide la presentación de su producto, añadiéndole valor a través de procesos como el control de la calidad. En la tabla 2.2 se muestra cuáles son en conjunto los parámetros más importantes que definen la calidad de una fruta o de una hortaliza¹⁹.

Tabla 2.2. Parámetros que definen la calidad de un producto hortofrutícola.

Calidad visual	Aspecto	Calibre, Forma, Color, Ausencia de defectos
Calidad mecánica	Firmeza	Dureza, Textura de la pulpa
Calidad gustativa	Sabor	Contenido interno en azúcares, Acidez Relación: Azúcares/Acidez Aroma
Calidad nutricional	Salud	Valor nutritivo
Calidad higiénica	Seguridad	Ausencia de residuos tóxicos y de organismos dañinos para la salud

Fuente: Artículo “Influencia de los factores de producción y manejo en las propiedades físicas y susceptibilidad a daños mecánicos de variedades de manzana y pera”.

La medida de ciertos parámetros de calidad requiere técnicas especiales de laboratorio o instrumentos complejos. Estas medidas suelen ser destructivas. Entre ellas, podemos considerar las que se utilizan para cuantificar o tipificar la textura, para la que se utiliza el texturómetro, o la firmeza del fruto, medible con el penetrómetro. Características como, por ejemplo, el tamaño o calibre, el peso o el color se pueden medir mediante tests no destructivos²⁰.

¹⁸ ROMOJARO, F. Criterios de calidad del fruto. Cambios durante la maduración. Identificación de criterios no destructivos. Madrid, 1994. p. 21.

¹⁹ GARCIA, J. Influencia de los factores de producción y manejo en las propiedades físicas y susceptibilidad a daños mecánicos de variedades de manzana y pera. Madrid, 1994. p. 26.

²⁰ ALEIXOS, Op. cit., p. 36.

Este segundo grupo es el objetivo de este proyecto, en el que, a través del diseño de un sistema de visión, se desarrolla un sistema automático para clasificar chontaduros a través del cálculo de los parámetros de calidad relacionados con el aspecto exterior del fruto sin dañarlo.

2.4.1 PARÁMETROS DE CALIDAD QUE SE PUEDEN CUANTIFICAR CON UN SISTEMA DE VISIÓN. Son susceptibles de medirse con un sistema de visión artificial aquellos factores de la calidad que se refieren al tamaño, calibre o volumen, forma, color exterior, defectos y presencia o ausencia de pedúnculo.

El tamaño, calibre o volumen es el primer factor de calidad en el mercado. Según las diferentes normas de calidad, todas las especies se clasifican en clases que van desde un calibre mínimo hasta un máximo, desechándose la fruta que presente un calibre por debajo del mínimo o sobrepase el máximo. Para calcular el volumen se puede combinar esta medida con la del peso, lo que nos puede dar una idea de la densidad del fruto y, ésta se puede utilizar para detectar algunos defectos, tales como las frutas heladas o las bufadas. Adicionalmente los frutos que presentan deformaciones anormales no deben llegar al consumidor.

El color es otro parámetro que influye bastante en la decisión de compra por parte del consumidor. Gracias a este podemos tener una idea de la madurez del fruto, así como de su condición. Además, la cuantificación del color externo se hace necesaria en las líneas de clasificación y empaquetado para poder determinar el destino de la fruta, sea éste la cámara de desverdización o conservación o el transporte inmediato hasta el lugar de destino. Para la comercialización puede ser necesario que el color de los frutos de una caja sea homogéneo.

Los defectos en la piel están tipificados y relativamente cuantificados, según recoge cada norma (para el caso del chontaduro no hay norma de calidad establecida), en las que, dependiendo del fruto y la variedad, se establecen categorías. Según la cuantía y gravedad, el fruto será directamente destruido o pasará a las siguientes trías. Hay defectos que se extienden

rápidamente por toda la fruta y con el tiempo contaminan otras; razón importante para detectar correctamente los defectos en las frutas.

3. CLASIFICACIÓN INDUSTRIAL DE FRUTAS

LAS frutas se clasifican normalmente tres veces, en trías que se ejecutan secuencialmente. En la primera tria se eliminan los frutos verdes, los frutos por debajo del calibre mínimo y los frutos con graves defectos. En la segunda, se controla la fruta teniendo en cuenta las tolerancias de calidad y siempre que el defecto o alteración no sea excluyente. Por último, se hace la selección previa al enmallado, embolsado, granel o encajado automático.

3.1 SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN ACTUALES

Los sistemas para la clasificación de fruta actualmente implantados en los almacenes son de dos tipos: manuales y semiautomáticos.

3.1.1 SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN MANUAL. En los sistemas manuales, las trías las realiza el personal situado en diferentes puntos de la línea del calibrador (hoy en día, las trías se hacen manualmente en la mayoría de los almacenes).

Dentro de las desventajas de éstos sistemas esta la falta de objetividad que es uno de los factores que frecuentemente se presenta debido a las condiciones de iluminación (que varían a lo largo del tiempo), el cansancio y el estado de ánimo.

En un estudio realizado con distintas variedades de manzana, donde se comparan varios parámetros de forma, tamaño y color, una de las conclusiones a las que llega es la limitada capacidad humana para reproducir la estimación de la calidad, lo que define como

"inconsistencia". Además, a medida que se incrementa el número de parámetros que se consideran en la toma de decisión, el error en la clasificación también aumenta²¹.

3.1.2 SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN SEMIAUTOMÁTICOS. En estos sistemas, parte de la tría se realiza automáticamente, con sistemas de visión artificial u otros mecanismos; éstos miden normalmente el tamaño, el peso y el color, sin embargo, la tendencia es automatizar completamente el proceso de tría. Últimamente, este tipo de módulos están apareciendo en el mercado para la clasificación de fruta por defectos, pero los resultados que se obtienen no son fiables debido a las técnicas empleadas y a la poca resolución con la que trabajan²².

Un buen sistema semiautomático de selección puede reducir los costos de producción al reducir el exceso de maquinaria dedicada al mismo propósito, reducir mano de obra y manejar gran volumen de fruta en poco tiempo.

En los sistemas semiautomáticos, el factor humano influye en el sentido de que, tras un período de tiempo determinado, el criterio y la capacidad de decisión se ven afectados, influyendo notoriamente en los resultados de la clasificación.

3.2 INSPECCIÓN VISUAL AUTOMATIZADA

La construcción de un SIVA, requiere de la intervención de múltiples disciplinas, tales como la automática, la visión e inteligencia artificial o la mecánica.

La visión por computador, el análisis automático de imágenes mediante ordenadores empleando la técnica de procesamiento digital de imágenes, está recibiendo un interés creciente, tanto desde el punto de vista académico como industrial, dado el rango, cada vez

²¹ PAULUS, I. Use of image analysis to investigate human quality classification of apples. Journal Agriculture Engineering Research 68. 1997, p. 341-353.

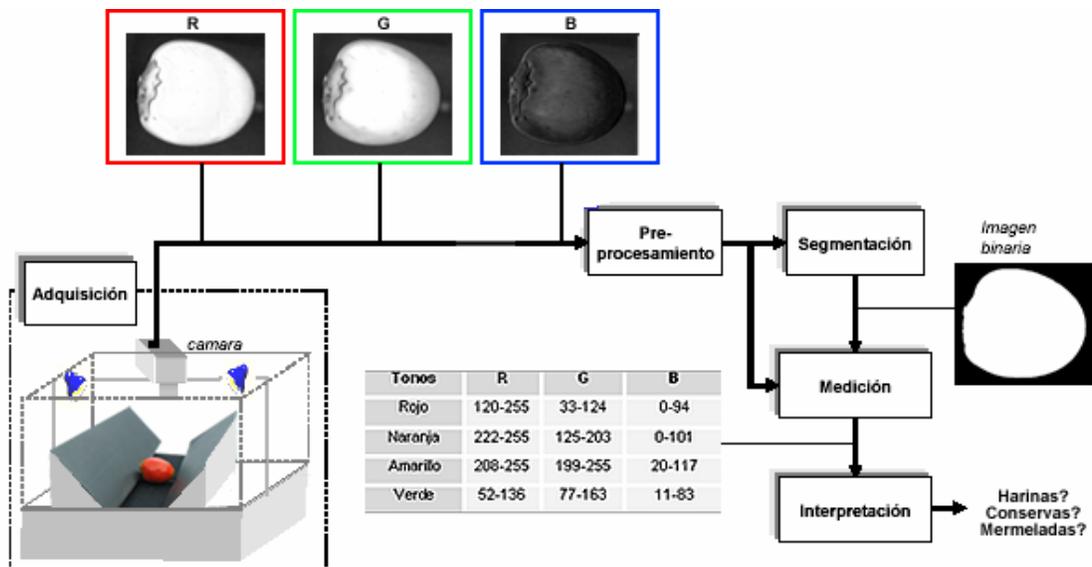
²² Manual para el mejoramiento del manejo poscosecha de frutas y hortalizas, PARTE II (Control de calidad, almacenamiento y transporte), p. 4, 11-13.

mayor, de problemas que es capaz de solucionar. Estos sistemas de percepción se están implantando en la industria, en la automatización de procesos, obtención de información cuantitativa / cualitativa, con dos fines: Lograr una mayor interacción entre las máquinas y el entorno que las rodea y, conseguir un control de calidad total de los productos fabricados.

La automatización de las tareas de inspección visual se convierte en exigencia en sectores productivos con altos niveles de competencia, aún siendo de una gran complejidad, con unos costos elevados, aunque decrecientes, y enmarcado en un contexto internacional de economías abiertas.

3.2.1 ESQUEMA GENERAL DE UN PROCESO DE ANÁLISIS DE IMÁGENES. El esquema típico del análisis de imágenes para el estudio de un alimento se ilustra en la figura 3.1.

Figura 3.1. Esquema de un proceso de análisis de imágenes.



Fuente: Autores.

Las cinco etapas de este análisis general se destacan a lo largo del proyecto, encontrando métodos para cumplir con el objetivo que cada etapa contiene.

En la etapa de adquisición se obtiene la imagen adecuada del objeto de estudio. Dependiendo de la aplicación la imagen puede ser una fotografía, radiografía y termografía.

El preprocesamiento se hace con el fin de mejorar la calidad de la imagen obtenida, en esta se emplean ciertos filtros digitales que eliminan el ruido o bien aumentan el contraste.

En la segmentación se trata de identificar en la imagen cuáles son los píxeles que pertenecen a un objeto. En este caso la salida es una imagen binaria constituida por píxeles de dos tonalidades que significan 'objeto' o 'no-objeto'.

Una vez identificado los objetos de estudio en la imagen, se extraen sus características y se realiza una medición objetiva de ciertos atributos de interés. Por último, se hace la interpretación de acuerdo a los valores obtenidos y se establecen los criterios de clasificación para el reconocimiento final del objeto.

El modelo de la figura 3.1 se utilizó en este trabajo para la determinación del grado de maduración de la fruta. En este caso se mide el color y a partir de esta información se determina si la fruta cumple con las normas para salir al mercado.

3.2.2 VENTAJAS DE LA INSPECCIÓN VISUAL AUTOMATIZADA. Normalmente, muchas técnicas de inspección son ejecutadas con la intervención de dispositivos que se ponen en contacto con el objeto a examinar, necesitando, a veces, detenerlos y colocarlos según posición y orientación. Mientras en la filosofía SIVA, la posibilidad de colocar los sensores ópticos en los lugares apropiados, permitirán las observaciones sin necesidades de detención. Además, los controles visuales no implican contactos con los objetos, disminuyendo los riesgos de deterioro de los productos.

Tradicionalmente, las operaciones de inspección suelen realizarse al finalizar el ensamblaje del producto. Sin embargo, la inspección durante el proceso de producción ofrece ciertas ventajas.

En el caso de sólo detectar fallos en la última fase, los materiales empleados, el tiempo consumido y la mano de obra utilizada, han sido desperdiciados. Por ejemplo, dentro de la industria de PCB (*Printed Circuit Board*), se ha estimado que encontrar un fallo antes de montar los componentes sobre el circuito impreso, costaría alrededor de 25 centavos, mientras el mismo defecto localizado al término del montaje de componentes, tendría un coste aproximado de 40 dólares²³. Nada impide utilizar SIVA en cualquier parte del proceso, a diferencia de los inspectores humanos que requieren un determinado espacio y un ambiente salubre.

El desarrollo de las técnicas automáticas no destructivas para el control de la calidad de frutas y hortalizas se fundamenta en el incremento de la productividad y la especialización de cultivos por regiones, para poder manejar y dar salida a un volumen creciente de producción; en la disponibilidad de mano de obra estacional que cada vez es más difícil, pues se ve también afectada por los ciclos económicos y sociales propios de cada región; en el desarrollo de nuevos sensores que permiten detectar lesiones y anomalías no visibles por los humanos; y en la repetibilidad, pues se puede conseguir con sistemas automatizados capaces siempre de aplicar los mismos criterios de decisión²⁴.

3.2.3 DESVENTAJAS DE LA INSPECCIÓN VISUAL AUTOMATIZADA. La automatización de los diferentes procesos industriales esta siendo realizada de manera lenta si se compara con otros eslabones de la cadena de producción, como transporte de materias primas o más recientemente la mecanización y ensamblaje de productos.

Su complejidad viene originada, por la cantidad de capacidad de razonamiento que es necesaria implementar, ya sea para aceptar o rechazar un producto o clasificarlo según un tipo de defecto. La complicación del problema es tan elevada, que el diseño se orienta a la inspección

²³ PLATERO, Carlos. Inspección automatizada de superficies homogéneas mediante Visión Artificial. Valencia. 1997, p. 58.

²⁴ BELLON, V. La calidad de la producción y la automatización, situación actual y perspectivas. Revista Valenciana d'Estudis Autonomics, No. 14, 1992. p. 297-329.

de una tarea altamente especificada, excepto unos pocos sistemas experimentales. Aunque los sistemas actuales son cada vez más precisos, aún se necesita de algoritmos más complejos y de mayor resolución en las imágenes para calcular las características de la fruta con mayor precisión. La visión artificial aplicada a la inspección de frutas en líneas automatizadas tiene, entre otros, los siguientes problemas²⁵.

- **La iluminación.** Para el correcto análisis de la imagen, se requiere que la iluminación de la escena sea uniforme, evitando sombras que puedan enmascarar el color o los defectos de la piel. Sin embargo, en este tipo de instalaciones siempre hay fuentes de luz externa que interfieren, como la que entra por alguna claraboya o ventana del almacén o focos para realizar otras tareas. Parte del diseño del sistema de iluminación tendrá que evitar estas influencias externas no deseadas. Además, debe ser lo suficientemente potente para iluminar adecuadamente toda la escena, lo que muchas veces produce ciertos brillos en la superficie de la fruta. Estos brillos, que saturan zonas de la imagen, pueden ocultar parte de la superficie del fruto, y por tanto, hacer que el sistema de visión artificial proporcione resultados erróneos. Para evitar este tipo de problemas se pueden utilizar los filtros polarizantes.
- **El color del fondo de las imágenes.** Los algoritmos de segmentación utilizan la información de color para poder discriminar las diferentes regiones que aparecen en una imagen (cáliz, piel, fondo y diferentes tipos de defectos). En estas imágenes, el color del fondo se puede elegir, mientras que los colores de los frutos vienen dados. Una adecuada selección puede simplificar la detección.
- **La limpieza de la zona de la imagen.** En los almacenes se trabaja con gran volumen de fruta y ésta entra sucia del campo. Al pasar la fruta por la línea, los rodillos,

²⁵ BELLON, V. La calidad de la producción y la automatización, situación actual y perspectivas. Revista Valenciana d'Estudis Autònomicos, No. 14, 1992. p. 297-329.

filtros y objetivos se cubren de polvo que, cuando es iluminado, produce efectos indeseados en la imagen, afectando negativamente su posterior análisis.

- La resolución de las imágenes. Influye en la medida de los calibres y otras características geométricas y morfológicas, pero más aún en la detección de los defectos. Hay defectos que, a ciertas resoluciones, son imposibles de detectar. Por otro lado, a menor resolución, mayor velocidad en el procesamiento de las imágenes. La maquinaria actual trabaja con resoluciones muy bajas para cubrir las necesidades de tiempo real, lo que impide la detección de ciertos defectos. Por tanto, se debe llegar a una solución de compromiso entre velocidad de proceso y resolución.
- La necesidad de procesamiento a muy alta velocidad. A menudo en los industrias se alcanzan velocidades de trabajo realmente elevadas, lo cual es un problema a la hora de diseñar algoritmos de tratamiento de imagen. El costo temporal de estos algoritmos suele ser muy elevado, y depende de la cantidad de parámetros que se deseen calcular, del número de imágenes que se procesen y de su tamaño. Para conseguir un sistema fiable, preciso y rápido, se puede utilizar un *hardware* específico para estas tareas, al mismo tiempo que se optimizan los algoritmos de visión. Esto añade otros problemas, sobre todo porque se requiere una programación específica (programación a bajo nivel), que, además, varía mucho según la arquitectura del procesador que se utilice.

4. TÉCNICAS DE VISIÓN UTILIZADAS PARA LA CLASIFICACIÓN DEL FRUTO CHONTADURO

4.1 ILUMINACIÓN

LA iluminación es un factor importante en un sistema de visión para poder obtener imágenes de calidad que faciliten en lo posible su posterior tratamiento y extracción de información. En general, en ambientes controlados, se intenta aumentar el componente difuso de la reflectancia y reducir en lo posible el componente especular, que enmascara las propiedades ópticas del objeto de estudio.

El propósito de la iluminación utilizada en las aplicaciones de visión es controlar la forma en que la cámara va a ver el objeto y el sistema de iluminación por tanto debe ajustarse al objeto a iluminar. Si se utiliza una iluminación adecuada, la aplicación se resolverá más fácilmente, de lo contrario puede que sea imposible de remediar. Una iluminación apropiada permitirá emplear menos filtros en la imagen y por tanto aumentar la velocidad de proceso en esa aplicación.

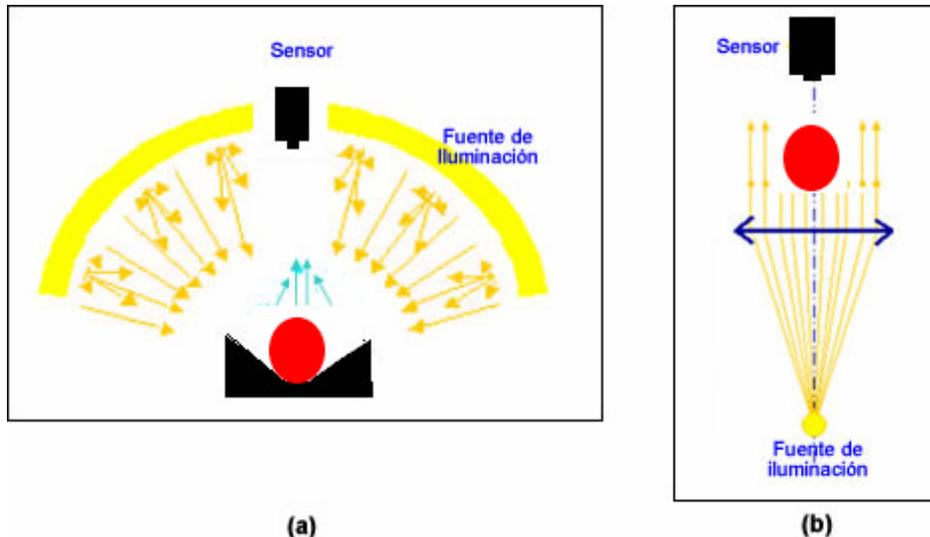
4.1.1 ESTRATEGIAS DE ILUMINACIÓN. Se han utilizado distintas estrategias de iluminación dependiendo de las necesidades de la aplicación²⁶, en la figura 4.1 se describen algunas de ellos.

La iluminación difusa (figura 4.1 (a)), se utiliza para obtener una uniformidad en toda la escena evitando sombras y saturaciones; una gran parte de las aplicaciones utilizan este tipo de iluminación, para facilitar la segmentación y extracción de características de las imágenes.

²⁶ DE LA ESCALERA, A. Visión por computador. Fundamentos y métodos, Madrid: Pearson Educación. S. A., 2001, p. 12-20.

La iluminación posterior (figura 4.1 (b)), puede utilizarse con dos objetivos distintos: para realzar la forma del contorno de un objeto, o para obtener información sobre su opacidad o transparencia.

Figura 4.1. Estrategias de iluminación. a) Iluminación difusa y b) Iluminación posterior.



Fuente: “Visión por computador fundamentos y métodos”

También existe la luz estructurada, que consiste en hacer que el rayo de luz atraviese una estructura con bandas (rejilla) u otros trazados geométricos que, al proyectar su sombra sobre el producto, permitan extraer información sobre su volumen.

Con la luz estroboscópica, consistente en la aplicación de destellos de luz de gran intensidad a intervalos de tiempo muy cortos, se evita el efecto borroso de la imagen provocada por el movimiento del producto en las cintas transportadoras.

4.1.2 TIPOS DE ILUMINACIÓN. Hay cuatro tipos de iluminación distintas utilizadas para resolver las aplicaciones de visión: fibra óptica, fluorescentes, LED (*Light Emitting Diodes*) y laser. Hay cuatro factores que condiciona el tipo de iluminación: intensidad lumínica, duración, flexibilidad de diseños y precio. Los sistemas de iluminación para aplicaciones industriales pueden emitir luz de forma continua o de forma pulsada (estroboscópica).

La iluminación por fluorescente es un tipo de iluminación que no presenta un balance de color uniforme, incorporando longitudes de onda mayoritariamente azules. La vida media de este dispositivo es algo superior a las 10000 horas y consumen, según el tipo, hasta un 85% menos energía manteniendo la misma luminosidad. Actualmente, los tubos fluorescentes proporcionan una máxima eficacia luminosa para temperaturas que oscilen entre los 45 y 50°C, que fácilmente se alcanzan en aplicaciones de visión artificial.

En inspecciones donde se requiere una gran intensidad de iluminación y una larga longitud, se utilizan fluorescentes de apertura pues la luz se emite solo en una dirección y con un ángulo muy estrecho, esto permite que la intensidad lumínica pueda ser hasta 10 veces superior a la de un fluorescente estándar.

Para la correcta iluminación de la escena, en este proyecto, se emplearon tubos fluorescentes de forma anular (anillos de luz) , figura 4.2, que proporcionan una gran intensidad de luz uniforme suficiente para adquirir a un tiempo de obturación pequeño, parámetro requerido en esta aplicación para la captura de las imágenes del fruto en movimiento.

Figura 4.2. Iluminadores usados, para capturar la imagen del fruto en escena.



Fuente: Autores.

La iluminación por LED, se utiliza en aplicaciones donde no se requiera una gran intensidad de iluminación; proporcionan una intensidad relativa a un costo muy interesante, y tienen una larga vida: aprox. 100.000 horas. Si los LED se conectan a un sistema estroboscópico se pueden alcanzar potencias lumínicas muy similares a los de la luz halógena.

4.2 ADQUISICIÓN DE LAS IMÁGENES

Para adquirir las imágenes las más utilizadas son las de tipo CCD, que pueden ser monocromas o en color, lineales o matriciales.

Las cámaras lineales tienen interés en aplicaciones en las que se transporta el objeto debajo de la cámara ya que la imagen del objeto completo se adquiere línea a línea mientras avanza, un problema de este tipo de cámaras es el solapamiento.

Las cámaras matriciales, pueden tomar imágenes del objeto completo. Dentro de estas existen las monocromáticas, las cámaras en color y las cámaras multiespectrales.

Con las monocromáticas se adquieren imágenes compuestas por niveles de grises que son adecuadas para estimar el tamaño y la forma, así como defectos que tienen un gran contraste con la piel sana; con las cámaras en color que sirven para estimar color, madurez y defectos y las cámaras multiespectrales que proporcionan imágenes fuera del visible y una buena estimación de color por su disponibilidad de sensores.

4.3 TARJETAS DIGITALIZADORAS (*FRAME GRABBERS*)

En las aplicaciones de visión industrial y de análisis de imagen para entorno científico es necesario tomar las imágenes con la mejor calidad posible y enviarlas a la memoria del ordenador con el fin de procesarlas, analizarlas y /o visualizarlas.

Las cámaras que se utilizan en estos entornos presentan una serie de requisitos que en la mayoría de ocasiones no son estándar. Las especificaciones y precios de las placas de captura de imagen varían enormemente y por tanto se deben tener en cuenta los requisitos técnicos de cada *frame grabber* para su elección.

Con la llegada del bus PCI, *Peripheral Component Interconnect*, se consiguió aumentar la velocidad de transferencia y por tanto realizar la visualización de la imagen en tiempo real sin necesidad de *hardware* gráfico adicional. El bus PCI también permitió por tanto transportar la imagen hasta el procesador en tiempos muy cortos y mediante los modernos procesadores se ha logrado hacer gran parte de los procesos en tiempo real. En la actualidad aparte del bus PCI se utiliza *frame grabbers* sobre otros tipos de arquitecturas como PCI-64, PCI-EXPRESS, PCMCIA *Personal Computer Memory Card International Association*.

Los *frame grabbers* "inteligentes" con procesadores a bordo se utilizan en aplicaciones donde la velocidad o la potencia de proceso no pueden ser resueltos por los ordenadores convencionales. Ofrecen una gran potencia de proceso y análisis, liberando al ordenador para que pueda realizar otras tareas de control. Los requisitos que se utilizan en entornos industriales y científicos son muy diferentes de los que se utilizan en entornos multimedia, y deben incorporar características especiales tales como: adquisición por *trigger*, *frame reset*, control de *strobe* e inclusión de Entradas / Salidas digitales. Se han dividido los *frame grabbers* en categorías distintas. En cada una de éstas hay un rango de modelos que presentan características diferentes y que en algunas ocasiones pueden coincidir. Las categorías son:

- Estándar análogos
- Avanzados análogos
- Avanzados digitales
- Con procesadores

- PCMCIA
- Placas de captura *Firewire*

4.4 SEGMENTACIÓN

La segmentación autónoma es una de las tareas más difíciles del procesamiento de imágenes; en esta aplicación se empleó la técnica de umbralización basada en el color; que consiste en realizar una segmentación para cada una de las componentes del color. Cuando se trabaja en el sistema RGB (*Red, Green, Blue*) –espacio de color empleado en el desarrollo de ésta aplicación-, el color de cada uno de los puntos de una imagen está definido por tres componentes: roja verde y azul. Para identificar los puntos de un determinado color se comprueba que los niveles de sus tres componentes corresponden a los del color buscado. Hay que resaltar que “rojo” no se corresponde con la componente “roja” de la imagen – ya que el color blanco tiene también una componente roja máxima-; sino con aquellos píxeles que tengan máximo de rojo y mínimo de las otras dos componentes. Por ello una umbralización por color tendrá la forma de²⁷³³:

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & \begin{aligned} R_a &\leq f_r(x, y) \leq R_b \\ V_a &\leq f_v(x, y) \leq V_b \\ A_a &\leq f_a(x, y) \leq A_b \end{aligned} \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases} \quad (1)$$

Donde $f_r(x, y)$, $f_v(x, y)$ y $f_a(x, y)$ son, respectivamente, las funciones que dan los niveles de rojo, verde y azul de cada uno de los puntos de la imagen. Así en el proceso de segmentación se tiene una imagen con sus tres componentes. Después habría que realizar una operación lógica AND entre las tres ya que los píxeles que interesan son los que han pasado la umbralización en las tres componentes. Al igual que en otros métodos, existen píxeles que no

²⁷ DE LA ESCALERA, Op.cit., p. 211.

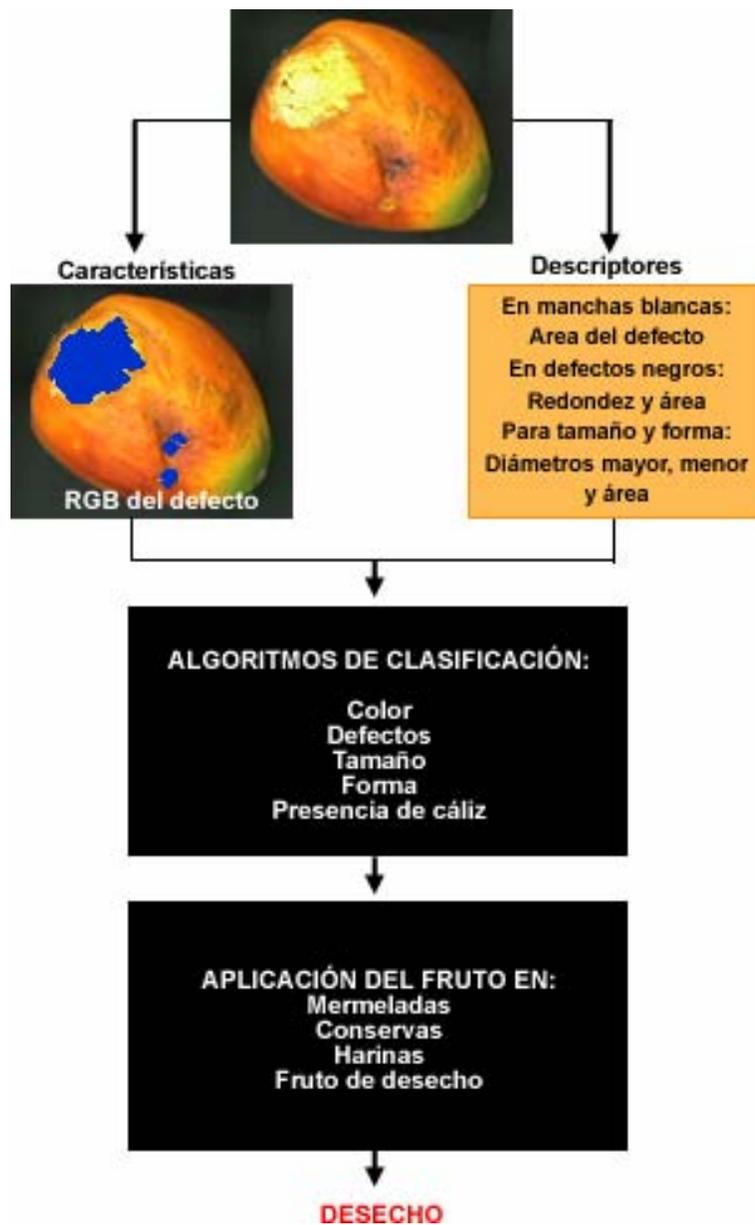
interesan, y que también se eliminarán posteriormente con ayuda de las transformaciones morfológicas.

4.5 RECONOCIMIENTO DE OBJETOS

El reconocimiento de objetos es la última etapa dentro de un sistema de visión por computador. A partir de las características encontradas y de los posibles objetos que el conocimiento a priori del problema se espera que puedan aparecer, el sistema debe determinar qué objetos están presentes en la imagen. Esta etapa es la de mayor grado de abstracción de todas las que forman un sistema de visión y a menudo se realizan fuertes simplificaciones para que funcione con éxito.

4.5.1 ESTRUCTURA DE UN CLASIFICADOR. La estructura general puede observarse en la figura 4.3.

Figura 4.3. Esquema general del proceso de reconocimiento de un chontaduro.



Fuente: Autores.

En particular para este modelo de clasificación, a partir de la imagen procesada se obtienen una serie de características (color, tamaño y forma), y/o descriptores (combinación de histogramas RGB, área, perímetro, diámetros mayor y menor, factor de forma, redondez) que definen cada objeto (fruto, defecto); características y descriptores utilizados en los diferentes algoritmos de

clasificación (clasificación por color, detección de defectos en la superficie del fruto, reconocimiento de cáliz y clasificación por tamaño y forma).

Por otro lado, del análisis por parte de un operador humano de las imágenes de prueba se habrá obtenido una base de datos que contiene los modelos de los objetos que puedan aparecer en la imagen. El contenido de esta base de datos irá muy ligado al tipo de características que se van a obtener de la imagen. También con éstas imágenes de prueba se realizarán una serie de hipótesis (número de objetos posibles, cómo se distribuyen los valores) que forman las hipótesis sobre los posibles candidatos que pueden aparecer en la imagen. Por último se debe diseñar un clasificador que reconozca el objeto a la vista de la información extraída de la imagen y los posibles candidatos.

Las características elegidas deben de cumplir cuatro propiedades de gran importancia para el desarrollo de una buena clasificación. Deben tomar valores significativamente distintos para las diferentes clases (discriminación), deben tomar valores similares para todos los objetos de la misma clase (fiabilidad), no deben estar correladas unas con otras ya que si no reflejarían la misma propiedad del objeto (independencia) y el número de características debe ser el más pequeño posible ya que de lo contrario la complejidad aumenta considerablemente (número)²⁸
34 .

El reconocimiento de objetos tiene tres enfoques principales. Un reconocimiento estadístico que se usará, como su nombre lo indica, la teoría de probabilidades para emparejar el objeto a clasificar con el de la base de datos cuya probabilidad sea mayor. Son métodos denominados *a priori* ya que se suponen el conocimiento de toda la información necesaria y suficiente para la clasificación, es decir el número de objetos posibles y el tipo y valores concretos de sus funciones de probabilidad. Como segundo enfoque se tiene el reconocimiento sintáctico, que trata de analizar la estructura de los objetos (por ejemplo el esqueleto) y por último el reconocimiento mediante redes neuronales que constituye la técnica más reciente y trata de

²⁸ DE LA ESCALERA, Op.cit., p. 253

imitar el modelo y funcionamiento de los sistemas biológicos, cómo las redes de neuronas que almacenan y manipulan la información.

4.5.2 AGRUPAMIENTO DE DATOS: K-MEDIAS. Dado el conjunto W , de N chontaduros, se quiere encontrar la partición W_1, W_2, \dots, W_b tal que cada uno de los N chontaduros se encuentre solamente en un grupo W_i y que cada chontaduro sea más similar a los del mismo grupo que a los asignados a los otros grupos.

Para poder definir medidas de semejanza entre los chontaduros a agrupar en cada partición W_i , éstos se representan mediante vectores $\mathbf{v} = (v_1, v_2, \dots, v_m)$, donde cada componente del vector es el valor de un atributo del chontaduro. De esta forma, cada uno de los objetos a agrupar es un punto en un Espacio Euclideo de 4 dimensiones, R^4 .

Se define al centroide \mathbf{K} de un grupo de elementos en el subconjunto W_i , que contiene h elementos \mathbf{v}_j como:

$$K_{W_i} = \frac{\sum_{j=1}^h V_j}{h} \quad (2)$$

Lo que es simplemente el promedio de los vectores del conjunto de entrenamiento que componen el grupo.

Para generar los centroides K_w se empleo un *software* de aplicación estadístico basado en *clustering*. Inicialmente, se seleccionan los centroides aleatorios K_w del conjunto de entrada W . Se calculan las distancias de los vectores a cada uno de los centroides. Los vectores se asignan a aquellos grupos, cuya distancia es mínima con respecto a todos los centroides. Estos se actualizan como el valor medio de todos los vectores asignados a ese grupo. Se repiten los anteriores pasos hasta que se satisface algún criterio de convergencia. Por ultimo se obtienen

los centroides finales K_w que junto con los componentes de un vector aleatorio \mathbf{V} de un nuevo conjunto, se asocian a un valor d_w para cada uno de los grupos W_b y se crean las funciones de decisión así:

$$d_{wi} = \sqrt{\sum_{j=1}^4 (V_j - K_j)^2} \quad (3)$$

Estas funciones determinan los criterios de clasificación para el nuevo conjunto de objetos.

5. MODELO DE INSPECCIÓN VISUAL AUTOMÁTICO PARA LA CLASIFICACIÓN EN LÍNEA DEL FRUTO CHONTADURO

EN este capítulo se describe el Sistema de Inspección Visual Automático aplicado directamente a la clasificación del fruto chontaduro por color, tamaño, forma, reconocimiento del cáliz y detección de diferentes tipos de defectos en la superficie del fruto, para su posterior aplicación en diferentes derivados.

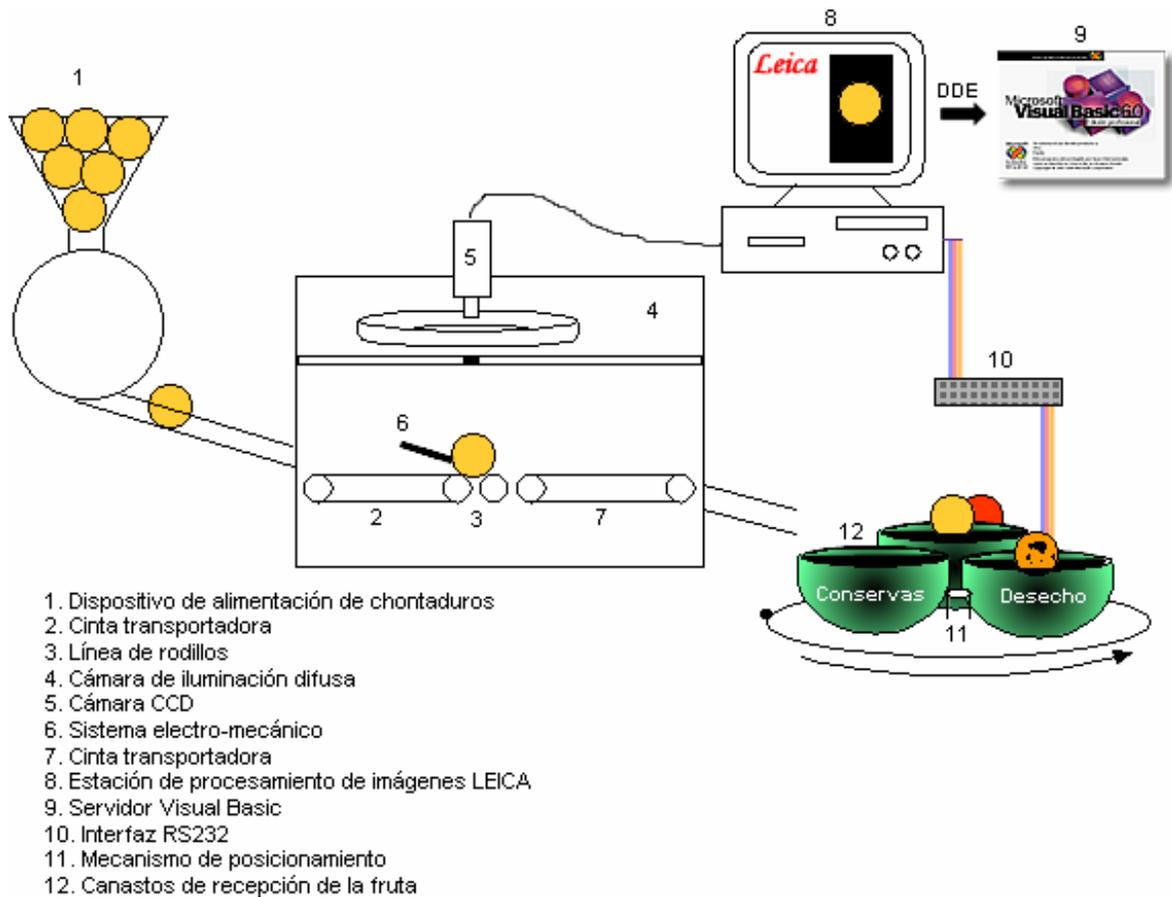
5.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA

En la figura 5.1 se describe el Sistema de Inspección Visual Automático en calidad de prototipo, implementado para clasificar chontaduros. Dependiendo del color, presencia o ausencia de defectos, presencia o ausencia de cáliz, tamaño y forma, cada fruto tiene su aplicación final en conservas, mermeladas y harinas.

El dispositivo de alimentación de chontaduros (1), ubica cada 5 s aproximadamente un fruto en la primera cinta (2), el chontaduro avanza hasta posicionarse sobre la línea de rodillos (3), lo que hace girar la fruta a su paso por el sistema de visión, el cual, está protegido del exterior por una caja cerrada -cámara de iluminación difusa (4)-. En esta sección mientras el chontaduro rota lentamente, la cámara CCD (5) adquiere un determinado número de imágenes dependiendo del tamaño; posteriormente un sistema electro-mecánico (6) desplaza el fruto hacia una segunda cinta transportadora (7); las imágenes son enviadas a la estación LEICA (8) donde se realiza el procesamiento pertinente de cada una de ellas, el algoritmo de clasificación envía un valor característico si el fruto se clasificó como conserva, mermelada, harina o desecho, a una nueva aplicación: Visual Basic (9) haciendo uso del Intercambio Dinámico de Datos (DDE) -las aplicaciones se comunican entre si estableciendo una comunicación cliente-servidor-; en este programa se configura el envío de datos por puerto serial. La interfaz RS232 (10) acondiciona la señal para la alimentación respectiva del controlador -motor paso a paso

unipolar-, aquel que dependiendo del numero de pasos configurado, hará girar una plataforma (11) en la que se encuentran los módulos receptores de los chontaduros. Una vez depositado el fruto en el espacio asignado (12), la plataforma vuelve a su estado inicial y espera una nueva señal para ejecutar la tarea de clasificación.

Figura 5.1. Esquema simplificado del SIVA para la clasificación de chontaduros.



Fuente: Autores.

El sistema de visión esta compuesto por tubos fluorescentes, un difusor de material translúcido y la cámara JVC profesional TK_C1380U (figura 5.2) de arquitectura *Interline Transfer* y un objetivo *Cosmicar/Pentax* 12 mm, ajustada a 18 dB de ganancia, se adquirieron imágenes a color de los frutos en movimiento, que constan de tres bandas: roja (R), verde (G) y azul (B) de la

misma escena. La cámara y la óptica se ajustaron para obtener una resolución de 0,145 mm/píxel y un tamaño de imagen de 400 x 400 píxeles.

En muchas aplicaciones de visión artificial y especialmente en ésta, se hizo necesario aumentar la velocidad de obturación y trabajar a 1/1000; tiempo de obturación configurado de forma electrónica.

Figura 5.2. Cámara CCD y objetivo empleados.



Fuente: Manual del fabricante.

5.2 DISEÑO DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES

5.2.1 SISTEMA DE ILUMINACIÓN. En el diseño de la cámara de iluminación difusa (figura 5.3), se utilizó una lámpara fluorescente de 54 vatios compuesta por 2 iluminadores anulares ubicada en la parte superior de la cámara difusora, y en frente de la línea de rotación del fruto.

Figura 5.3. Disposición del difusor y de la lámpara fluorescente en la cámara de iluminación difusa.



Fuente: Autores.

Se acopló un difusor a la cámara de iluminación para eliminar reflejos y aumentar el efecto difusor. Los iluminadores proporcionan una luz brillante, y su forma circular hace que la luz se extienda de forma uniforme en 360°, evitando cualquier tipo de sombras.

5.2.2 SISTEMA MECÁNICO. Uno de los objetivos iniciales era diseñar un sistema que permitiera rotar el fruto y en lo posible que lo hiciera sobre un eje. Implementarlo teniendo en cuenta éstas consideraciones era importante porque se necesitaba tener control sobre las imágenes capturadas.

Adquirir imágenes de toda la superficie del fruto en movimiento, haciendo un barrido completo de cada chontaduro se logró con la banda que se muestra en la figura 5.4.

Figura 5.4. Banda giro-transportadora implementada.



Fuente: Autores.

Esta unidad fue diseñada especialmente para rotar y evacuar cada fruto después de ser inspeccionado por el sistema de visión, permitiendo obtener imágenes adecuadas de los frutos.

La primera cinta se mueve a una velocidad de 2 cm/s y los rodillos de 21mm de diámetro externo giran a 9 rpm. La segunda cinta transporta el fruto hacia un próximo mecanismo donde finalmente los actuadores realizan el proceso físico de clasificación.

El color negro de la banda giro-transportadora proporciona un buen contraste entre el fruto y el fondo de la imagen captada, facilitando el proceso de segmentación.

En las condiciones de iluminación y de rotación de cada chontaduro, el sistema de adquisición (figura 5.5), captura una imagen cada segundo.

Figura 5.5. Sistema de Adquisición de imágenes



Fuente: Autores.

Con la configuración diseñada para este trabajo, la fruta de tamaño pequeño da una vuelta en 5 segundos. Con la relación de este tiempo y el tiempo de captura de cada imagen se obtiene el número de imágenes, así:

$$n^{\circ} \text{ de Imágenes} = \frac{t_{\text{empleado por la fruta en dar una vuelta}}}{t_{\text{de captura de la cámara}}} = \frac{5.2}{1} \cong 5 \quad (4)$$

Se pueden obtener 5 a 7 imágenes de la misma fruta girando según su tamaño, y una vez adquiridas, por el efecto de un brazo electro-mecánico se empuja el fruto hacia la segunda cinta.

Figura 5.6. Cinco imágenes capturadas en diferentes posiciones de un fruto.



Fuente: Autores.

En la figura 5.6 se aprecia el movimiento de rotación de un chontaduro sobre sí mismo, esquema donde se puede observar el recorrido de una fruta desde que entra en el campo de visión de la cámara hasta que sale de éste, con una velocidad de rotación, de aproximadamente 11.5 rpm. Esta velocidad de rotación varía según el tamaño del fruto.

5.3 TIPOS DE IMÁGENES QUE SE EMPLEAN

En la figura 5.7 se muestran imágenes capturadas por el sistema de visión de los frutos en rotación.

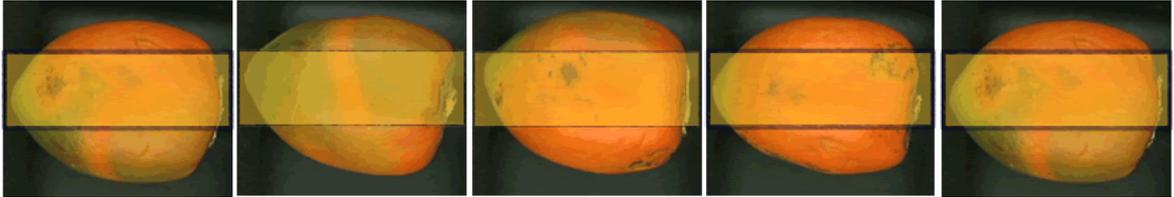
Figura 5.7. Imágenes adquiridas en movimiento con cámara CCD.



Fuente: Autores.

Se captura un número determinado de imágenes, según su tamaño, que sirven para analizar toda la superficie de la piel de cada fruto. El análisis es muy costoso computacionalmente, ya que implica barrer las imágenes enteras. Sin embargo, no es lógico analizar completamente la superficie de cada fruta en todas las imágenes que se capturan, porque mucha superficie de la piel se repite en las imágenes consecutivas. Por tanto, se decide seleccionar una pequeña franja del centro de cada fruto en cada imagen capturada. Como se muestra en la figura 5.8.

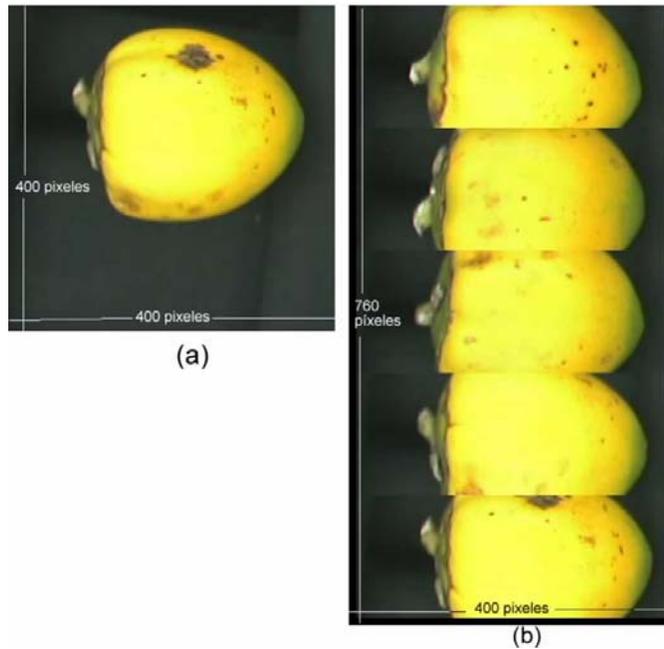
Figura 5.8. Cinco imágenes del chontaduro con franjas para concatenar y evaluar.



Fuente: Autores.

Con las imágenes adquiridas, se hace un preprocesado que consiste en tomar las franjas centrales de cada imagen para concatenarlas y componer la superficie completa de la fruta en una sola imagen llamada *imagen-franjas*, el tamaño de esta nueva imagen depende de la clasificación por tamaño y para el caso de un chontaduro pequeño es de 400 x 760 píxeles. En la siguiente figura se describen las dos imágenes que se usan durante el procesamiento.

Figura 5.9. (a) Imagen capturada desde la cámara: Imagen RGB, y (b) Imagen preprocesada: Imagen-franjas.

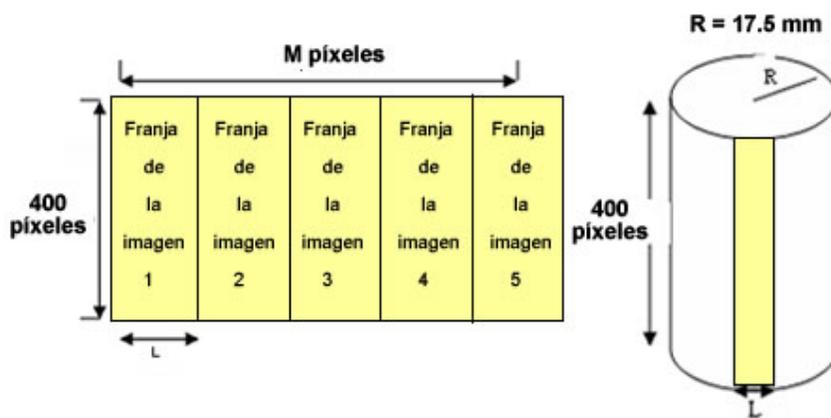


Fuente: Autores.

Para determinar el tamaño y la forma se usa la imagen de la figura 5.9 (a), que corresponde a una de las imágenes que captura la cámara y sobre la *imagen-franjas*, figura 5.9 (b) se hace el análisis de color, detección de áreas defectuosas y presencia de cáliz.

Si la fruta se describe como un cilindro de un diámetro de 3.2 cm (correspondiente al de un chontaduro pequeño) que rota sobre la banda, del cual se toman las imágenes a medida que gira, se debe calcular la superficie del cilindro que se toma en cada imagen para barrerlo totalmente. Esta superficie corresponde a la franja de la imagen.

Figura 5.10. Esquema para calcular la superficie de la franja.



Fuente: Autores.

Así, se calcula L en la figura 5.10 para que, tras unir las 5 franjas de superficie de cada una de las 5 imágenes, se obtenga una imagen con una superficie S , la superficie total del cilindro; la altura del cilindro h se hace igual al ancho de la imagen capturada. Por tanto:

$$S_{tira} = \frac{2\pi R h}{n^{\circ} \text{imágenes}} = Lh \quad (5)$$

Con lo que se obtiene una longitud L de 20 mm. La resolución de las imágenes es de 0.145 mm/píxel, lo que significa que la longitud L de la franja será de 138 píxeles y el valor del alto de la imagen de 690 píxeles (datos para un chontaduro pequeño).

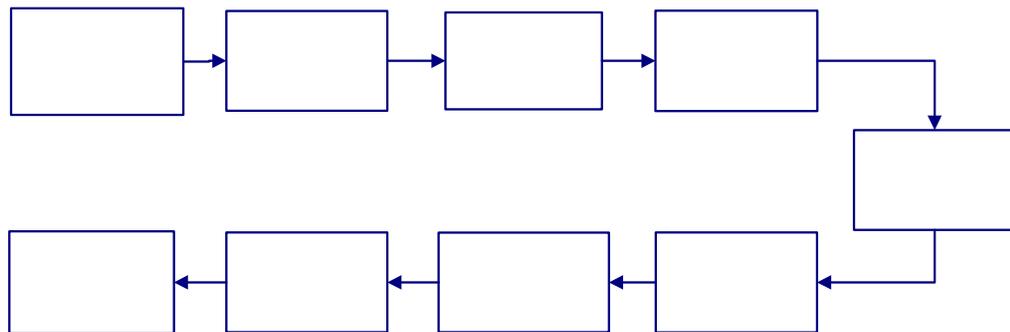
5.4 ARQUITECTURA DEL SISTEMA DESARROLLADO

El desarrollo del *software* implementado en Leica, se detalla en el siguiente apartado. Como el objetivo es evaluar y clasificar el fruto, se realizaron los siguientes diagramas que describen secuencialmente los pasos para establecer los criterios de clasificación.

Para la clasificación final de cada chontaduro se implementaron diferentes algoritmos (evaluación de tamaño, evaluación de color, evaluación y clasificación de defectos, evaluación de presencia de cáliz y evaluación de forma), con el propósito de obtener un sistema de clasificación *software* flexible; por lo tanto se diseñaron los procesos en forma independiente que a la vez permiten disminuir la velocidad de procesamiento en las imágenes a clasificar; por ejemplo, el sistema evalúa inicialmente si un fruto es de desecho cuando el área de piel afectada es mayor que la de piel sana, por lo que es innecesario hacer el llamado de rutinas que determinan el color, que detectan la presencia de cáliz y que definen la forma del fruto.

Los procesos o rutinas generales implementados en este sistema siguen los pasos típicos del análisis de imágenes, para evaluar y clasificar según características predeterminadas. En la figura 5.11 se muestran las etapas que realiza el sistema en un orden establecido a lo largo de la ejecución proyecto.

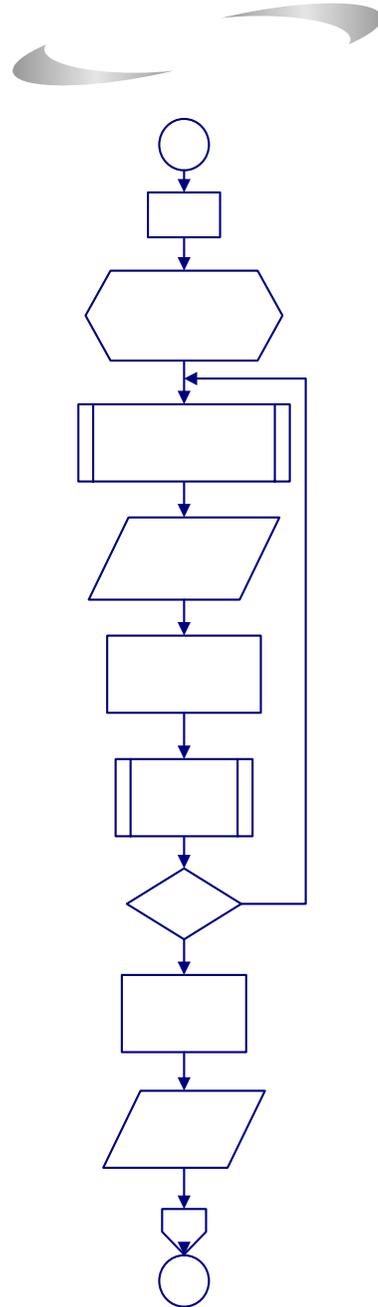
Figura 5.11. Esquema general secuencial de las rutinas



Fuente: Autores.

En la rutina de “adquisición de imagen” (figura 5.12), se realizan los pasos de acondicionamiento o configuración de la cámara y el proceso de detección de la fruta en el sistema de rotación, con el fin de dar inicio a la captura de la imagen

Figura 5.12. Diagrama de bloque del proceso de adquisición de imagen.



Fuente: Autores.

Esta rutina se implementó con el propósito de compilar todo el proceso *software* de clasificación, solo cuando se detectara en la banda giro-transportadora la presencia del fruto; se

ADQU

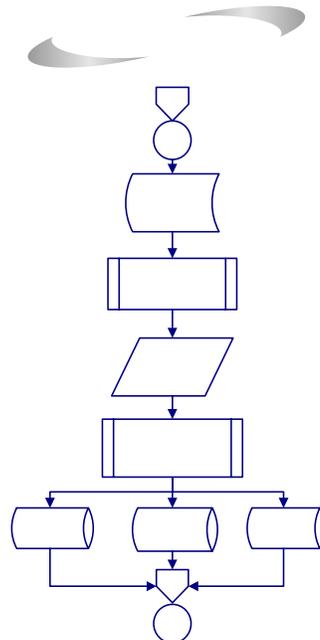
UBI

hizo creando una ventana de evaluación que constantemente observa y mide el valor RGB y lo compara con el RGB del fondo previamente establecido.

Una vez capturada la imagen inicial, se evalúa el tamaño de la fruta haciendo uso del clasificador de mínima distancia K-medias, el cual agrupó los datos correspondientes al área de una muestra de entrenamiento en tres conglomerados: grandes, medianos y pequeños; cada vez que el sistema evalúa una nueva imagen mide el área del fruto y la ubica en uno de estos tres conglomerados dependiendo de la distancia euclídea a cada centroide (ver figura 5.13).

Se adquiere un número de imágenes específico para cada fruto según su tamaño y se concatenan para crear la imagen-franjas; esta tarea se realizó con el fin de minimizar la repetibilidad de las imágenes, ya que en este estudio se había limitado el número de imágenes a cinco, previo análisis matemático (ecuación 4) realizado con el radio promedio de una muestra de chontaduros.

Figura 5.13. Diagrama de la rutina de evaluación por tamaño.

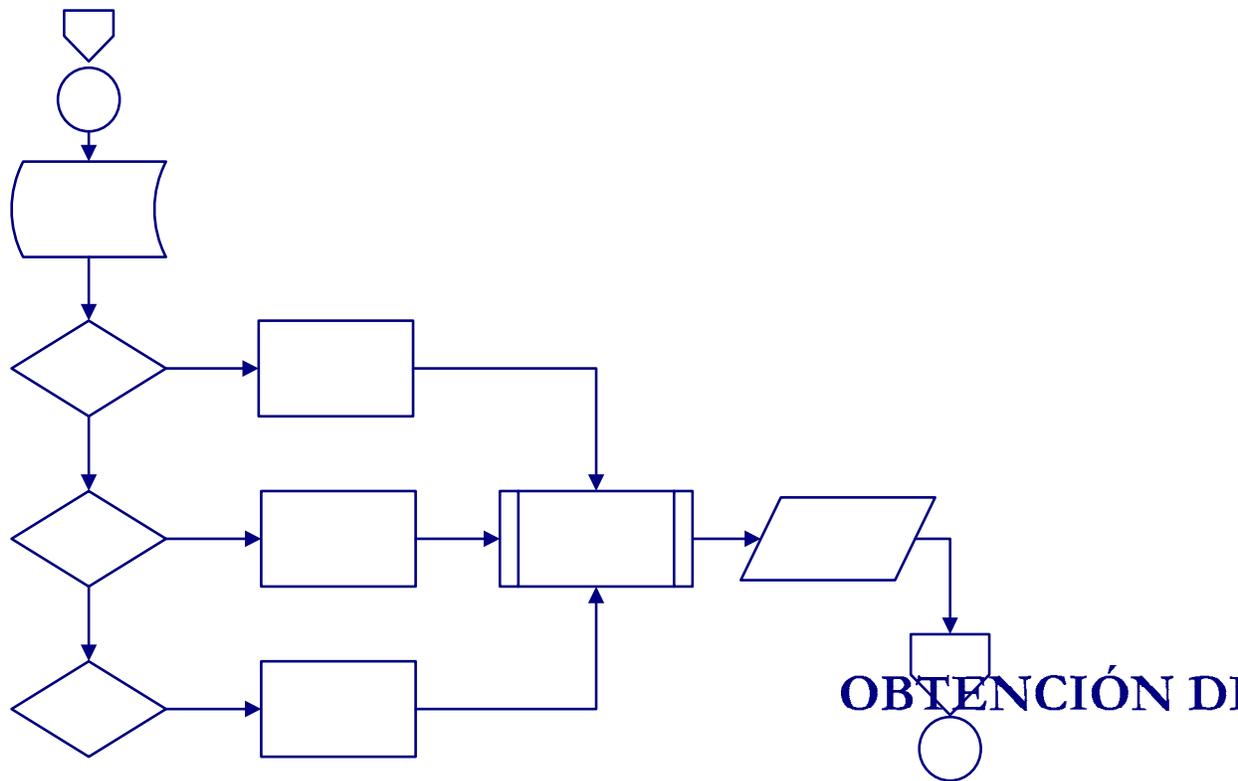


Fuente: Autores.

La rutina de “obtención de imagen-franjas” (figura 5.14) captura un cierto número de imágenes dependiendo de los datos dados por el proceso anterior, con ellas se hace el pre-procesamiento de concatenación que generará la imagen de estudio en este proyecto.

De esta forma, si el fruto es grande el sistema adquiere siete imágenes, si es mediano adquiere seis y si es pequeño adquiere cinco.

Figura 5.14. Diagrama de tareas para la obtención de la imagen franjas



Fuente: Autores.

Con la imagen-franjas obtenida, se inicia el proceso de umbralización con valores RGB específicos para cada color (figura 5.15); en el caso de las tonalidades naranja y verde se hizo necesario detectar diversos RGB por su amplia gama de colores presentes en los chontaduros para finalmente establecer un sólo rango.

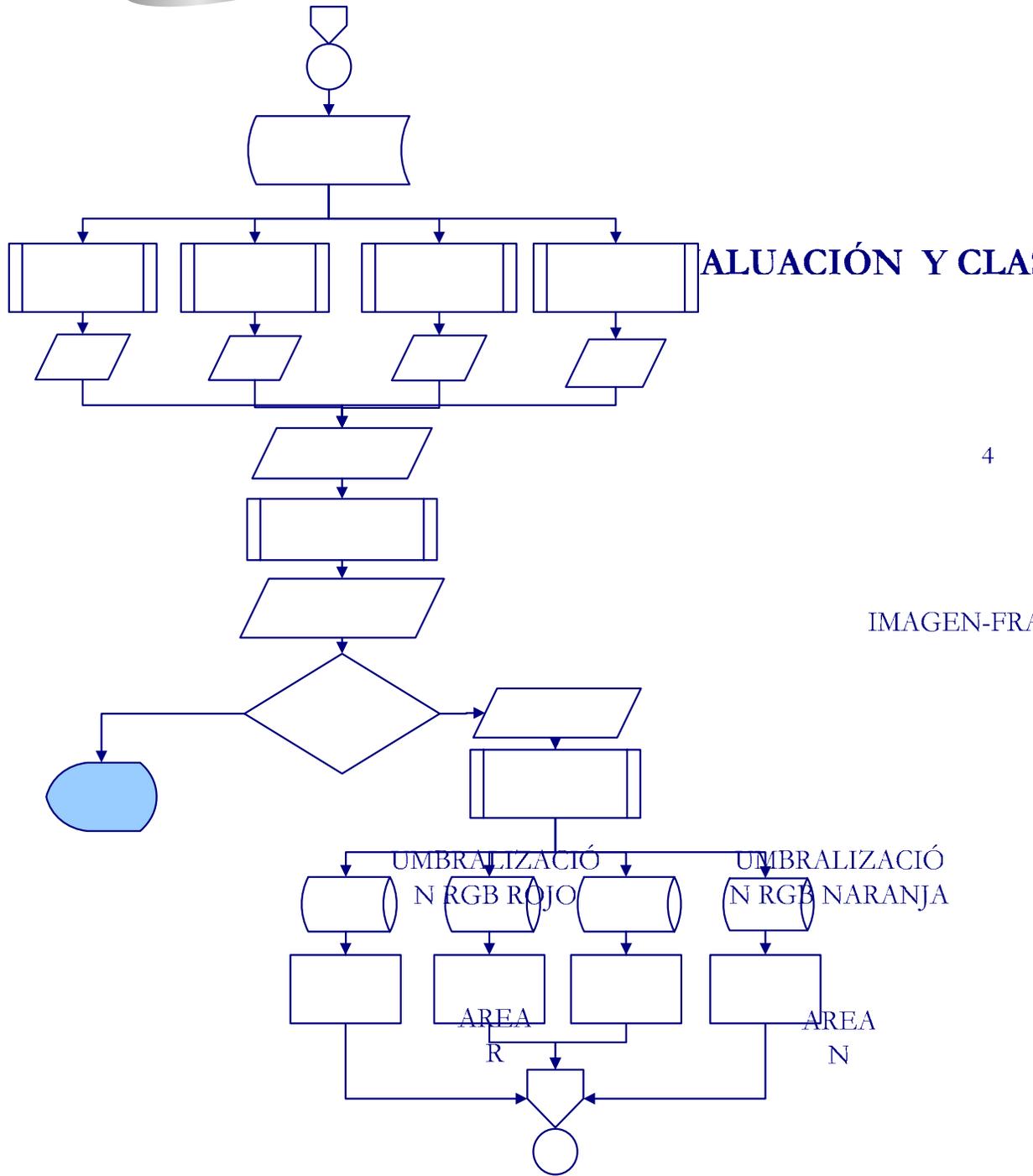
Cada agrupación de píxeles pertenecientes a cada imagen binaria obtenida después del proceso de segmentación, es cuantificado y almacenado en una variable (área r, área n, área a, área v) y la suma de ellas corresponde al área total de la superficie del fruto en estado aceptable denominado en éste caso área piel sana.

Antes de clasificar el fruto por color, se vió la necesidad de rechazar frutos con un alto grado de daños causados por microorganismos; se realizó hallando la diferencia entre el área estimada correspondiente a la superficie del chontaduro y el área piel sana, diferencia a la que se denominó área defectuosa. Este valor se compara con el área total de la superficie; si es mayor el fruto se clasifica para desecho, de lo contrario el sistema inicia la rutina de “clasificación por color”.

Se da comienzo a este procedimiento hallando las fracciones de área de cada color y por medio de los centroides encontrados en el estudio *a priori* del clasificador, se determina el color predominante en cada chontaduro.

Una vez el sistema determine el color del fruto en inspección se procede al llamado de su respectiva rutina de evaluación y clasificación por defectos.

Figura 5.15. Diagrama de bloque de las tareas de clasificación por color.



Fuente: Autores.

AREA I
SAN

DETECCIÓN
DE DESH

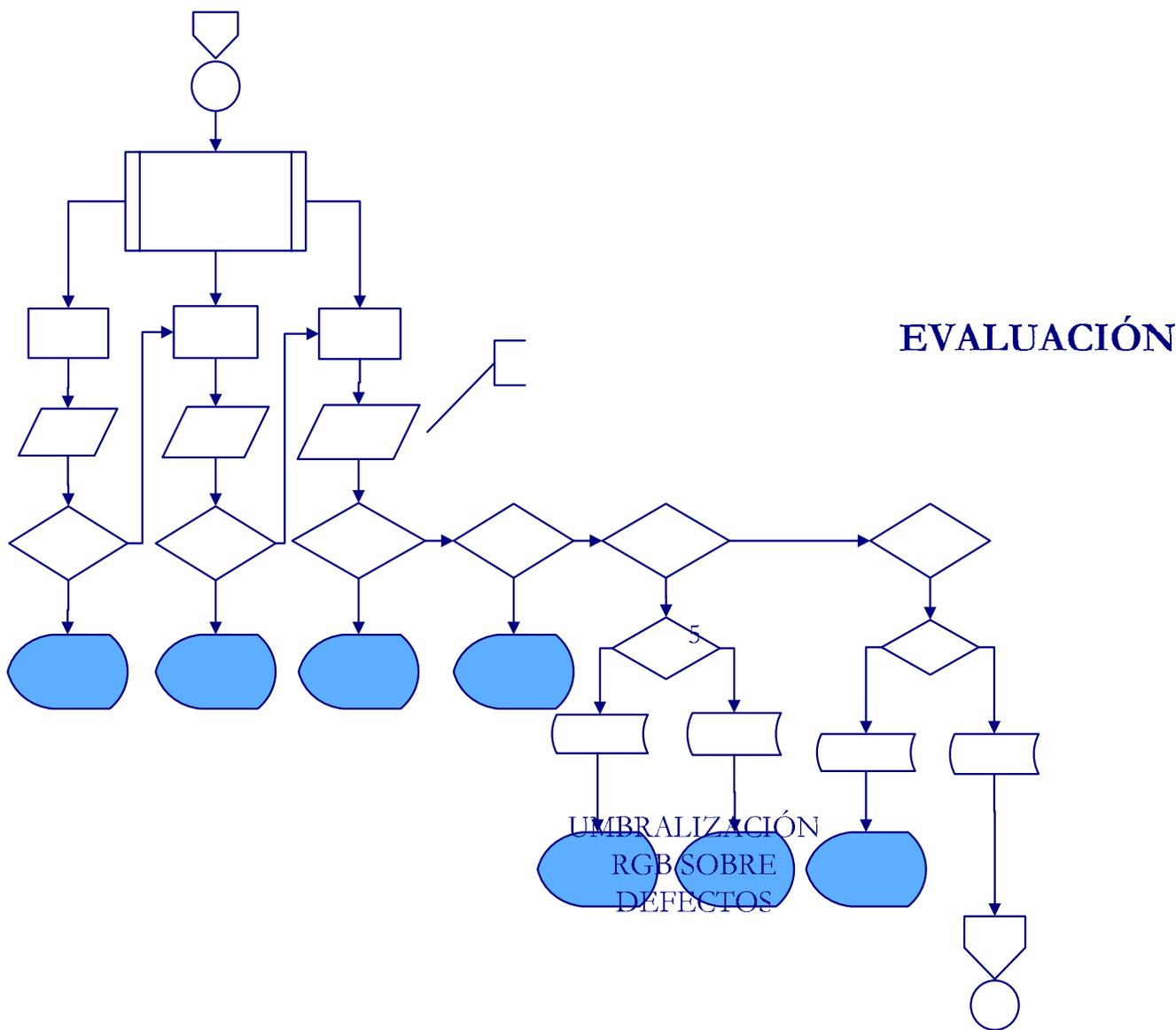
Al igual que en la clasificación por color se encuentran los valores RGB de los diferentes defectos por el método de umbralización. Ésta técnica se implementó aprovechando las características de color de los defectos presentes en algunos chontaduros (tipo 1 y tipo 2), ya que son realmente perjudiciales por contaminar a frutos que se encuentran en contacto con ellos.

La cuantificación de los píxeles segmentados propios de los defectos tipo 1 y tipo 2 se almacenan en una imagen binaria y se asignan a una variable denominada área para luego evaluar su pertenencia en los rangos predefinidos. El algoritmo empieza evaluando los defectos tipo 1; en caso de detectar su presencia el sistema clasifica el fruto como desecho, de lo contrario procede a evaluar los defectos tipo 2; si el área de ellos pertenece al rango, el fruto es clasificado como desecho sino evalúa la presencia de defectos tipo 3. Para estandarizar los rangos de área, fue necesario realizar un entrenamiento con chontaduros que presentaran defectos de estos tipos; durante este proceso se observó la detección de zonas que no correspondían a los defectos anteriormente mencionados y se eliminaron mediante el tratamiento de la imagen con operaciones morfológicas.

Debido a que los defectos tipo 3 son netamente superficiales y no alteran la composición química del fruto, se optó por detectar dos valores RGB y medir el porcentaje de área. Para la clasificación del fruto con este tipo de defectos se trabajó bajo el criterio dado por investigadoras que hicieron parte del proyecto de agroindustrialización del chontaduro.

Si el porcentaje de área es grande el chontaduro se clasifica como desecho, si se tiene un valor intermedio tendría su aplicación en harinas; si es pequeño el sistema examina el color de fruto; este es clasificado para harinas si es verde o amarillo y para mermeladas si es rojo o naranja. Por último, si el porcentaje de área es mínimo y el fruto posee coloraciones verde o amarillo, éste es clasificado para harinas, sino se opta por desprestigiar los defectos detectados, y el chontaduro es aplicado posiblemente para conservas (ver figura 5.16).

Figura 5.16. Diagrama de bloque de las tareas de clasificación por defectos.



Fuente: Autores.

Los chontaduros que no presentan defectos pasan a ser evaluados por el algoritmo de “clasificación por tamaño”; dependiendo del tamaño del fruto el sistema decide la aplicación

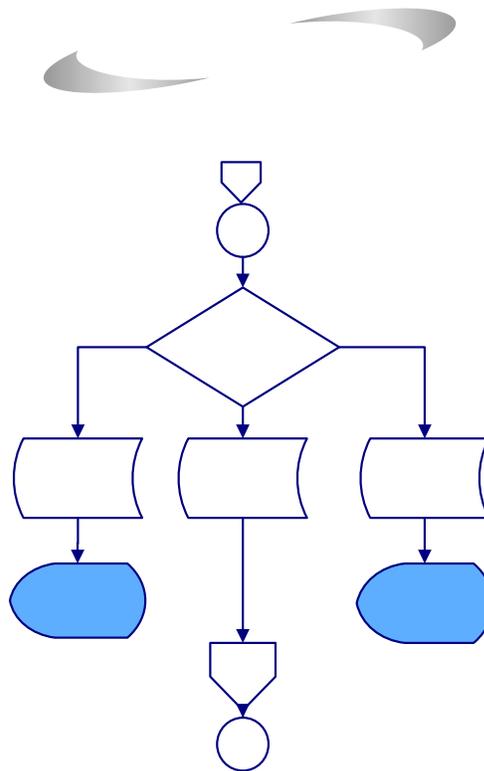
AREA

AREA

% DE
AREA.
%A

final para la que es apto (figura 5.17). Cuando el fruto es mediano se debe detectar la presencia de cáliz (figura 5.18) ya que de no poseerlo se convierte en una fuente de ingreso de microorganismos y tendría aplicación directa en mermeladas.

Figura 5.17. Diagrama de bloques de las tareas de clasificación por tamaño.

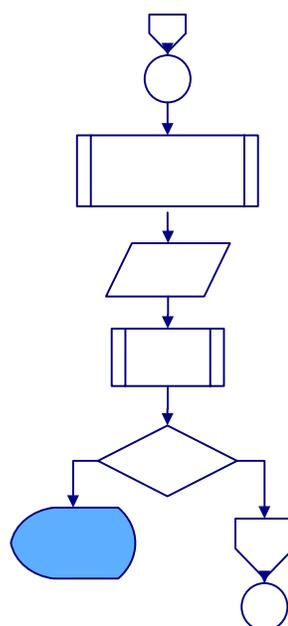


Fuente: Autores.

CLASIFICACION

Para la detección de cáliz se trabaja con un valor predefinido RGB. La medida del área ocupada por los píxeles segmentados es continuamente comparada con un rango determinado en el proceso de entrenamiento; al no pertenecer a éste, el sistema clasifica la fruta para mermeladas porque se han detectado zonas verdes en la piel (cuando es mayor) o la no presencia de cáliz (cuando es menor).

Figura 5.18. Diagrama de bloques de las tareas de evaluación y clasificación por presencia de cáliz.



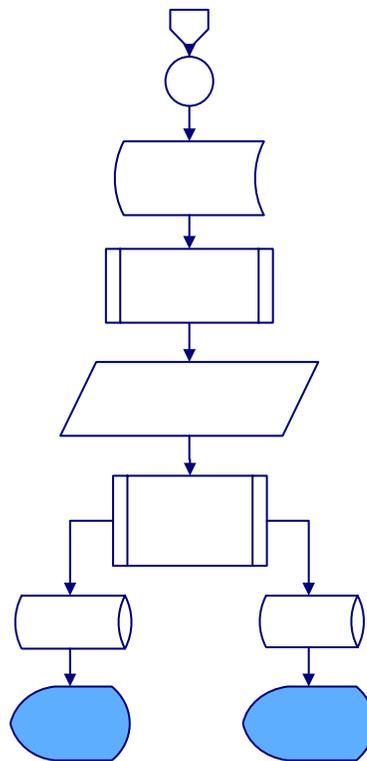
Fuente: Autores.

EVALUACIÓN Y CLASIFICACIÓN

Por último se hace el proceso de “evaluación y clasificación por forma” (figura 5.19); se inicia haciendo un llamado a la imagen inicial para segmentarla y sobre ella medir los parámetros como diámetro mayor, diámetro menor y redondez, que proporcionan la información precisa para determinar la forma del chontaduro.

Nuevamente se implementa la clasificación por K medias que determina si el fruto es alargado o redondo; la característica principal de un chontaduro para conserva es su forma alargada por la facilidad de empaquetamiento y desprendimiento de la cáscara; además porque el contenido de grasa es mínimo si se compara con los frutos redondos. Si el fruto es seleccionado como redondo su aplicación es en mermeladas.

Figura 5.19. Diagrama de bloques de la descripción de tareas de la evaluación y clasificación por forma.



Fuente: Autores.

EVALUACIÓN Y

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DEL CHONTADURO

A lo largo de este proyecto se adquirieron 900 chontaduros que se cosecharon en diferentes temporadas del año y que se emplearon en la ejecución de las diferentes etapas del sistema autónomo de clasificación.

6.1 NÚMERO DE IMÁGENES A CAPTURAR

Esta etapa se realiza con el objeto de adquirir un número de imágenes que al concatenarlas se obtenga la piel del chontaduro extendida en una imagen bidimensional y que esta sea lo mas cercana posible al tamaño real del fruto.

Inicialmente se hace la estandarización del sistema de adquisición de imágenes con 140 chontaduros para obtener imágenes adecuadas y poder seguir con el proceso de clasificación.

Posteriormente se trabajó con una muestra de 200 chontaduros para establecer el número de imágenes en el proceso de adquisición; para esto se utilizó el método matemático descrito en la ecuación 4 que fue corroborado experimentalmente, capturando imágenes de un fruto marcado y rotulado.

Los radios promedios del chontaduro y el número de imágenes a capturar se describen en la siguiente tabla.

Tabla 6.1. Parámetros para determinar el número de imágenes a capturar según el tamaño.

CLASIFICACIÓN POR TAMAÑO	RADIOS ROMEDIO (MM)	VELOCIDAD PROMEDIO DE ROTACIÓN (RPM)	TIEMPO EN DAR UNA VUELTA (S)	NÚMERO DE IMÁGENES
Grande	2.4	8.1	7.3	7
Mediano	2	9.7	6.1	6

Pequeño	1.6	12.2	4.9	5
---------	-----	------	-----	---

Fuente: Autores.

Para generar la imagen-franjas, se determina la longitud de la franja según ecuación 5 y se extrae de cada imagen para luego concatenarlas (ver datos en tabla 6.2).

Tabla 6.2. Tamaño de la imagen-franjas.

TAMAÑO DEL FRUTO	LONGITUD DE LA FRANJA: L (Pixel)	TAMAÑO DE LA IMAGEN-FRANJAS
Grande	148	400 x 1036
Mediano	144	400 x 864
Pequeño	139	400 x 695

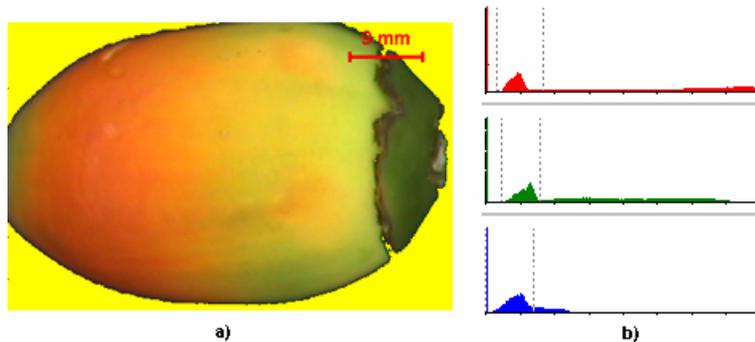
Fuente: Autores.

La imagen franjas muestra en promedio la superficie de todo el chontaduro, el porcentaje de error obtenido en este campo se obtuvo a partir de la comparación entre el área real y el área tomada en la imagen franjas; así el error es del 4%, que se atribuye al modelo matemático en el que se ajustó la forma del chontaduro a un cilindro, y a los promedios de radios y velocidad de rotación.

6.2 CLASIFICACIÓN POR TAMAÑO

El objetivo de esta clasificación es determinar si el fruto es grande, mediano o pequeño para determinar el número de imágenes a capturar y además, para decidir la aplicación final del fruto; los chontaduros pequeños tienen aplicación en harinas debido a que se hace compleja la tarea de extracción de la cáscara y los grandes se clasifican para mermeladas ya que se hace difícil el empaquetamiento de estos.

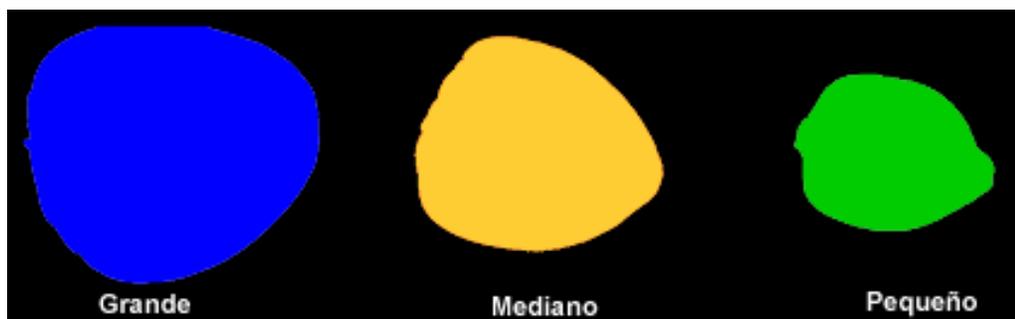
Figura 6.1. Localización del fondo, (a) imagen segmentada y b) histogramas RGB.



Fuente: Autores.

La segmentación de la fruta se hizo detectando el fondo (figura 6.1) e invirtiendo los píxeles correspondientes a este. La imagen obtenida después de este proceso (figura 6.2) facilita el conteo de píxeles con los que finalmente se clasifica el chontaduro por tamaño.

Figura 6.2. Segmentación de la fruta, para clasificar por tamaño.



Fuente: Autores.

Con la muestra de entrenamiento se determinaron los centroides descritos en la tabla 6.3, con los que se construyeron las funciones de decisión correspondientes a cada clase (ver tabla 6.4). Por último, cuando se ingresa un nuevo dato de área (V), el sistema hace la clasificación encontrando el valor menor entre ellos (tabla 6.5).

Tabla 6.3. Centroides finales para la clasificación por tamaño.

CLASES	K (mm ²)
1. Grande	1782.074
2. Mediano	1330.827

3. Pequeño	959.381
------------	---------

Fuente: Autores.

Tabla 6.4. Funciones de decisión para la clasificación.

CLASES	VALOR d_w
1. Grande	$d_1 = (v - 1782.074) $
2. Mediano	$d_2 = (v - 1330.827) $
3. Pequeño	$d_3 = (v - 959.381) $

Fuente: Autores.

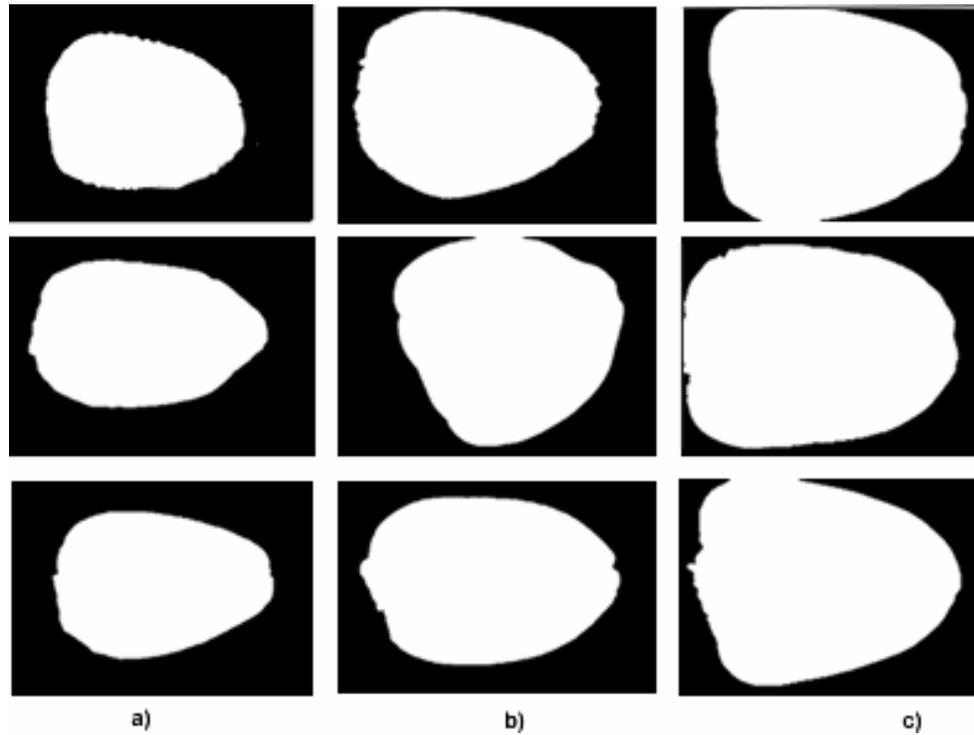
Tabla 6.5. Decisiones para clasificar con un nuevo valor de área.

COMPARACIÓN	CLASIFICACIÓN
Si $d_1 < d_2 < d_3$	Grande
Si $d_2 < d_1 < d_3$	Mediano
Si $d_3 < d_2 < d_1$	Pequeño

Fuente: Autores.

Algunos de los frutos clasificados se muestran en la figura 31.

Figura 6.3. Clasificación de imágenes por tamaño. (a) pequeños, (b) medianos y (c) grandes,



Fuente: Autores.

La aplicación final del chontaduro por tamaño, se determina después del proceso de clasificación por defectos. En la tabla 6.6, se dan los criterios tenidos en cuenta para la clasificación del fruto.

Tabla 6.6. Criterios de clasificación por tamaño para su aplicación final.

CLASES	COLOR	% DEFECTOS	APLICACIÓN FINAL
1. Grande	Rojo Naranja	0-15%	Mermeladas
2. Mediano			Evaluación de forma
3. Pequeño			Harinas

Fuente: Autores.

Se determinó que el sistema de visión había clasificado correctamente la fruta si su decisión coincidía con la del experto, siendo un error en caso contrario. En la tabla 6.7 aparecen los resultados obtenidos para este clasificador.

Tabla 6.7. Evaluación de los frutos por tamaño.

	CLASIFICACIÓN SEGÚN EL EXPERTO	CLASIFICACIÓN SEGÚN SISTEMA DE VISION			COINCIDENCIA
		GRANDE	MEDIANO	PEQUEÑO	
GRANDE	16	16			100%
MEDIANO	94		94		100%
PEQUEÑO	49			49	100%

Fuente: Autores.

Como se observa el porcentaje de coincidencia es del 100%, este se le atribuye a la metodología acertada que se empleo, pues, se consiguieron imágenes con contornos bien definidos.

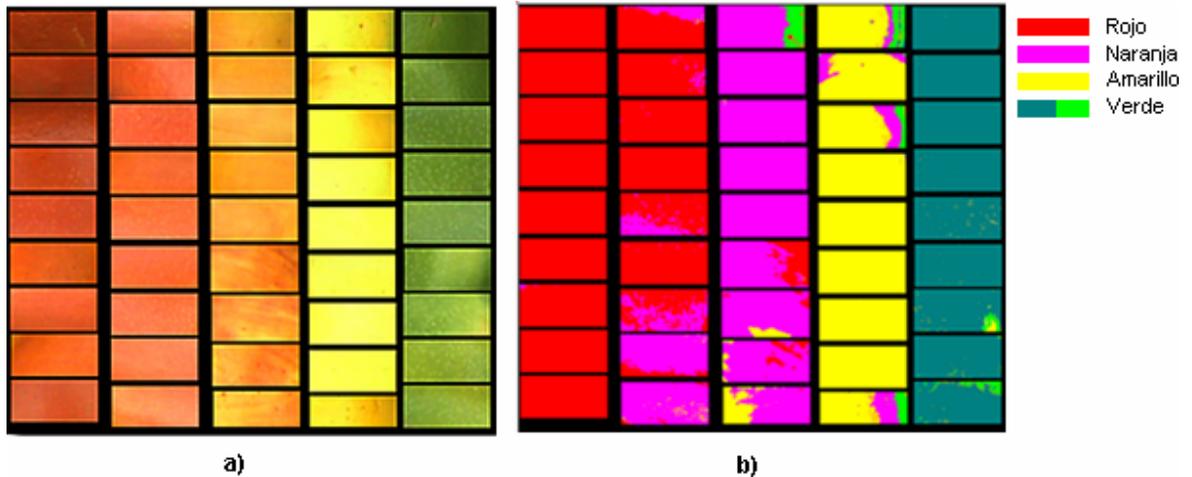
6.3 DETECCIÓN DE COLOR

Se hace imprescindible la clasificación por color debido a la aplicación que estos se le da por poseer una u otra tonalidad; es decir, un chontaduro verde clasifica solo para harinas por que las propiedades fisicoquímicas no son las óptimas comparado con un fruto que esta completamente maduro, un chontaduro amarillo también clasifica para harinas por su alto nivel de grasa, y solo los frutos con coloraciones rojas y naranjas tiene aplicación en conservas por el bajo porcentaje de grasa y por su sabor característico que los hacen los mas apetecibles al consumidor.

Para el análisis de superficie se realiza un entrenamiento con un lote de 400 chontaduros, se tomaron varias muestras de piel sana de la clase roja, naranja, amarilla y verde, se formó una paleta de colores alrededor de esos tonos y se determinó para cada una de ellas el rango de

componentes RGB. En la figura 6.4 se muestra la paleta de colores y la posterior segmentación sobre ella, con los rangos RGB que se presentan en la tabla 6.8.

Figura 6.4. Gama de colores en los chontaduros. a) Paleta de colores y b) Imagen segmentada con los rangos RGB



Fuente: Autores.

Tabla 6.8. Rangos RGB para las diferentes tonalidades del chontaduro.

TONOS	R	G	B
Rojo	120-255	33-124	0-94
Naranja	222-255	125-203	0-101
Amarillo	208-255	199-255	20-117
Verde	52-136	77-163	11-83

Fuente: Autores.

Una vez realizado este entrenamiento, los valores RGB se prueban sobre la imagen franjas y se hace la determinación de características sobre ellas. En las figuras 6.5, 6.6, 6.7 y 6.8 se describe este proceso para las tonalidades verde, amarillo, naranja y rojo. Cada una de ellas muestra la segmentación del valor RGB (a) y la combinación de histogramas (b).

Los umbrales de los histogramas fueron determinados automáticamente por el sistema, pero cuando se sometieron a prueba, la detección de los diferentes tonos sobre una imagen se

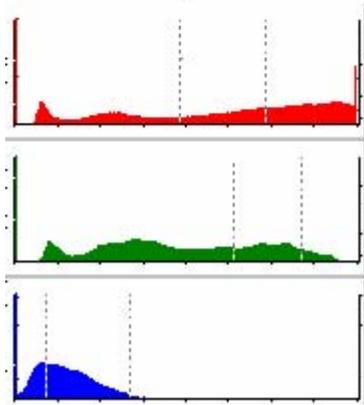
solaparon; por tanto, se vio la necesidad de ajustar los límites superior e inferior de tal forma que solo se segmentaran de manera precisa aquellos píxeles que pertenecieran a cada tonalidad.

La combinación de histogramas es un método que permite realizar múltiples combinaciones facilitando la segmentación de un solo tono presente en una imagen de color; técnica empleada en este proceso de clasificación por trabajar con frutos que poseen un amplio rango de colores debido a su proceso de maduración y por proporcionar la información suficiente para determinar el color predominante del chontaduro.

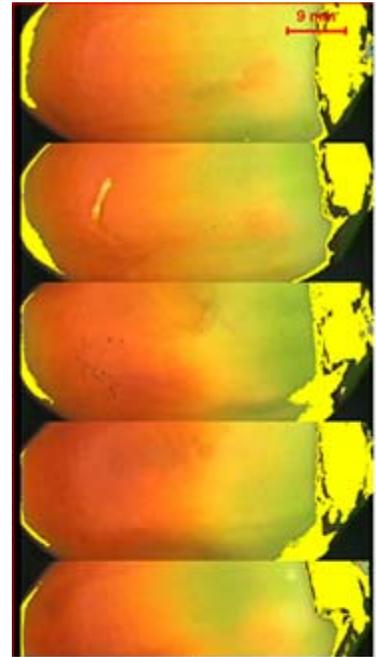
Figura 6.5. Valores RGB verde en imagen franjas. (a) Segmentación y (b) histogramas.



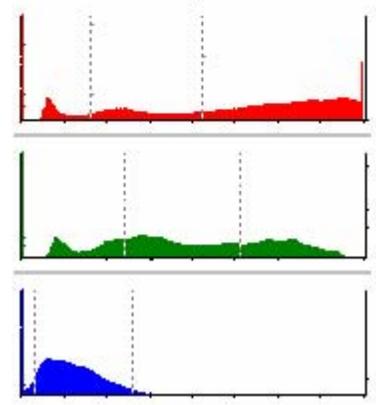
a)



b)



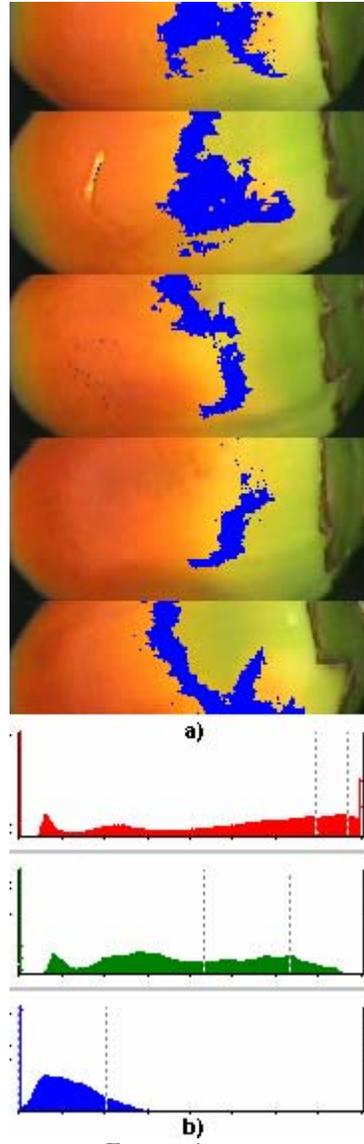
a)



b)

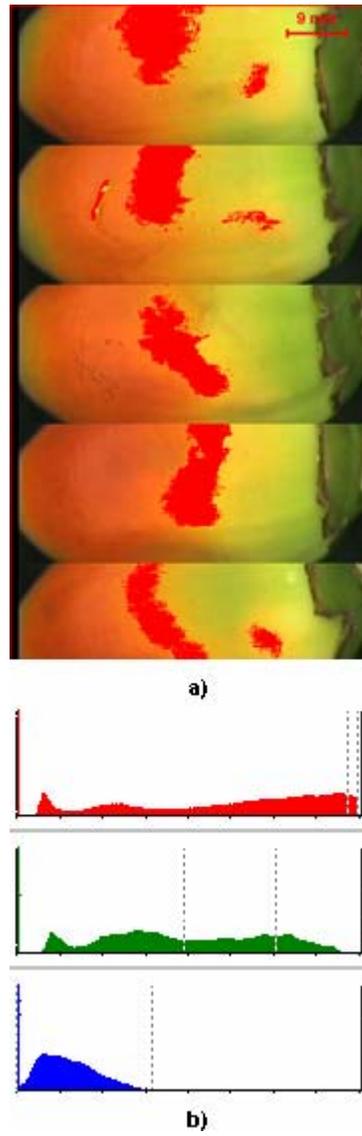
Fuente: Autores.

Figura 6.6. Valores RGB amarillos en imagen franjas. (a) Segmentación y (b) histogramas.



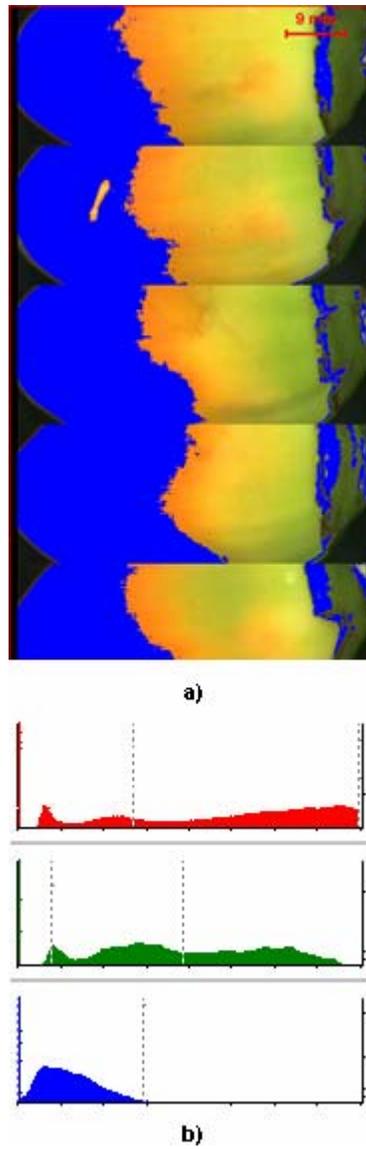
Fuente: Autores.

Figura 6.7. Valores RGB naranja en imagen franjas. (a) Segmentación e (b) histogramas.



Fuente: Autores.

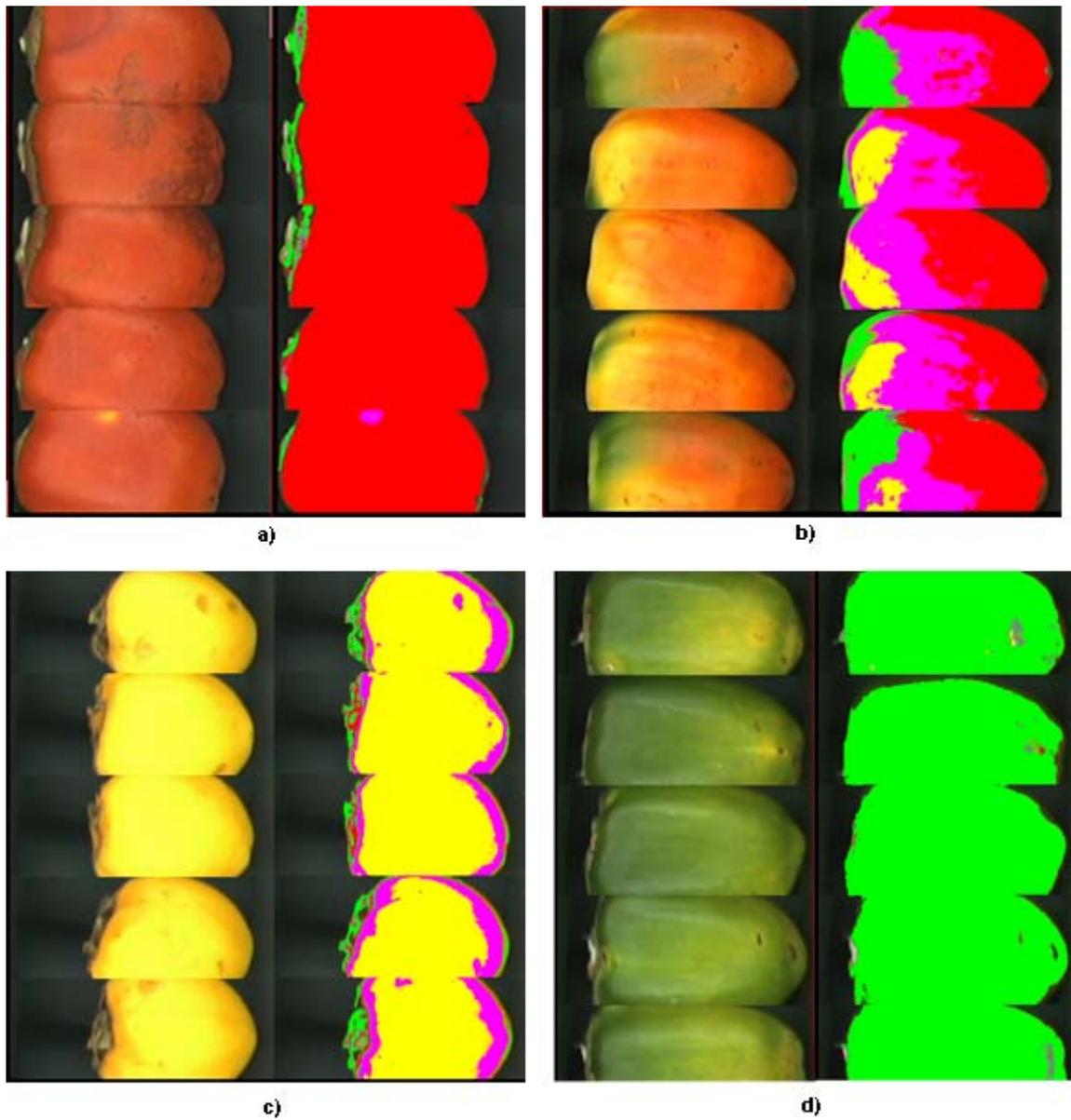
Figura 6.8. Valores RGB rojo en imagen franjas. (a) Segmentación e (b) histogramas.



Fuente: Autores.

Finalmente, en la figura 6.9 se muestra el proceso de segmentación de las cuatro clases de color (amarillo, rojo, naranja y verde) en imágenes binarias correspondientes a las tonalidades más típicas presentes en los chontaduros.

Figura 6.9. Segmentación por color de los chontaduros. (a) % de pixeles detectados en chontaduro rojo, (b) % de pixeles detectados en chontaduro naranja, (c) % de pixeles detectados en chontaduro amarillo y (d) % de pixeles detectados en chontaduro verde.



Fuente: Autores.

Con la imagen-franjas segmentada, se encuentra el parámetro cuantitativo para la clasificación por color del chontaduro. Como se observa en la figura 6.9 hay un mayor porcentaje de píxeles del color predominante del fruto; por lo tanto de cada imagen binaria se mide el área y con este parámetro se obtiene la fracción de área así:

$$F(w_i) = \frac{A(w_i)}{\sum_{i=1}^n A(w_i)} \quad (6)$$

Donde w_i ($i=1 \dots 4$) es una de las 4 diferentes clases donde el fruto puede estar incluido, $A(w_i)$ 1 área de cada imagen binaria y $F(w_i)$ la fracción de área para cada imagen binaria. Por ejemplo, en la tabla 6.9, se dan los datos de las fracciones de área para los frutos de la figura 6.9.

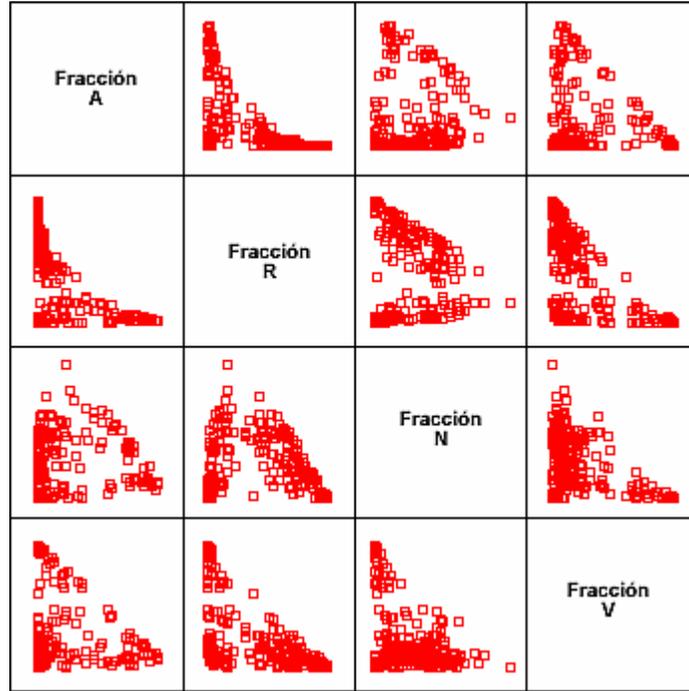
Tabla 6.9. Fracciones de área correspondientes a cada clase de color.

w_i	F(Amarillo)	F(Rojo)	F(Naranja)	F(Verde)
Amarillo	0.769	7.150e-3	0.199	0.025
Rojo	0.000	0.979	0.020	1.368e-3
Naranja	0.279	0.287	0.404	0.030
Verde	0.000	5.63e-4	5.120e-5	0.999

Fuente: Autores.

Las fracciones de área cumplen con las propiedades de los parámetros para obtener un buen sistema de clasificación, pues no hubo correlación entre ellas, existió gran diferencia de valores entre cada clase y similaridad de datos entre los objetos del mismo conglomerado. El diagrama de correlación para este caso se muestra en la figura 6.10.

Figura 6.10. Correlación entre las variables del clasificador por color.



Fuente: Autores.

Los valores de la tabla 6.10, K1, K2, K3 y K4, corresponden a los centroides de los píxeles amarillos, rojos, naranjas y verdes respectivamente y en la tabla 6.11 se describen las ecuaciones para obtener el valor d_w en cada clase.

Tabla 6.10. Centroides finales K, para cada clase w_i .

W_i	K1	K2	K3	K4
W_1 : Amarillo	0.6586	0.0417	0.1582	0.1415
W_2 : Rojo	0.0074	0.8312	0.0936	0.0677
W_3 : Naranja	0.1688	0.3328	0.3283	0.1700
W_4 : Verde	0.0599	0.0383	0.0182	0.8837

Fuente: Autores.

Tabla 6.11. Funciones de decisión para la clasificación.

1. Amarillo	$d_1 = [(v1-0.6586)^2 + (V2-0.0417)^2 + (v3-0.1582)^2 + (V4-0.1415)^2]^{1/2}$
2. Rojo	$d_2 = [(v1-0.0074)^2 + (V2-0.8312)^2 + (v3-0.0936)^2 + (V4-0.0677)^2]^{1/2}$
3. Naranja	$d_3 = [(v1-0.1688)^2 + (V2-0.3328)^2 + (v3-0.3283)^2 + (V4-0.1700)^2]^{1/2}$
4. Verde	$d_4 = [(v1-0.0599)^2 + (V2-0.0383)^2 + (v3-0.0182)^2 + (V4-0.8837)^2]^{1/2}$

Fuente: Autores.

Para la clasificación, los valores d_w se comparan y el menor de ellos indica a que grupo pertenece el nuevo vector con los valores de las fracciones de área (tabla 6.12).

Tabla 6.12. Clasificación por color por comparación de valores d_w .

COMPARACIONES	CLASIFICACIÓN POR COLOR
Si $d_1 < d_2 < d_3 < d_4$	Amarillo
Si $d_2 < d_1 < d_3 < d_4$	Rojo
Si $d_3 < d_1 < d_2 < d_4$	Naranja
Si $d_4 < d_1 < d_2 < d_3$	Verde

Fuente: Autores.

La evaluación de esta clasificación se realiza con una muestra test de 160 chontaduros en diferentes estados de maduración. En la tabla 17 se muestra la coincidencia entre la clasificación realizada por el experto y la realizada por el sistema de visión. Los resultados obtenidos muestran que el acierto total del sistema es del 98%. El 2% de error se debe a la presencia de defectos de gran área presentes en la piel del fruto, que fueron detectados dentro de los rangos RGB establecidos para el color verde y para el color naranja.

Tabla 6.13. Evaluación de la clasificación por color.

	CLASIFICACION SEGÚN EXPERTO	CLASIFICACION SEGÚN EL SISTEMA DE VISION ARTIFICIAL				COINCIDENCIA %
		ROJO	AMARILLO	NARANJA	VERDE	
ROJO	45	43		2		95
AMARILLO	38		37		1	97
NARANJA	34			34		100
VERDE	43				43	100

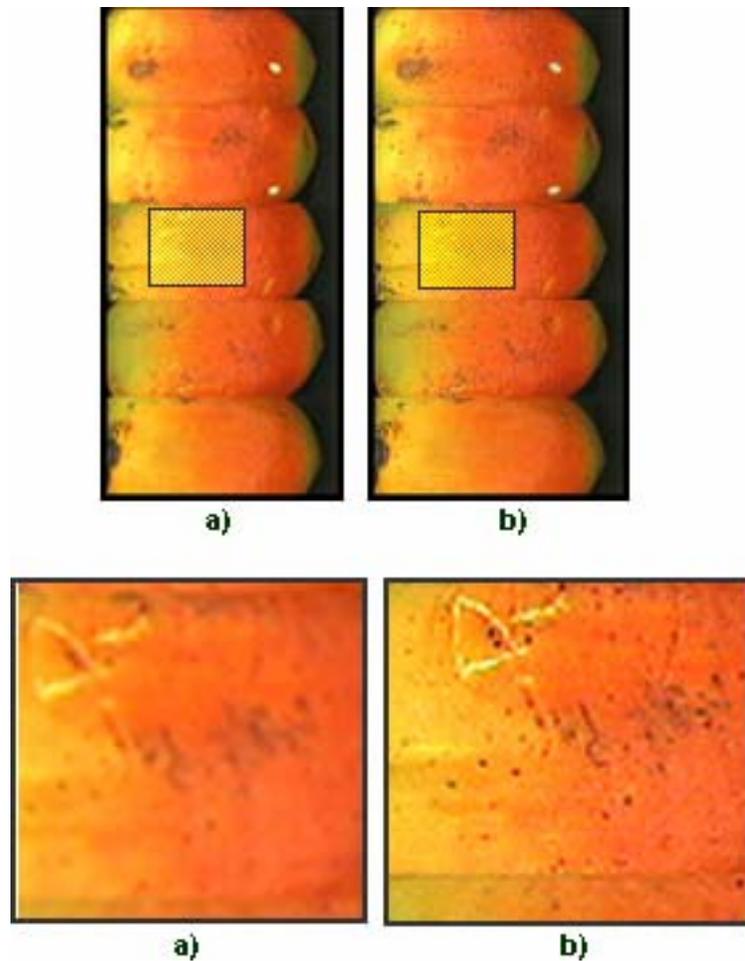
Fuente: Autores.

6.4 DETECCIÓN DE DEFECTOS

Esta detección es importante, porque dentro de los derivados del chontaduro no se aceptan frutos atacados por microorganismos, ni frutos que se excedan en defectos superficiales.

Para determinar la zona afectada, se preprocesa la imagen franjas aplicando un realce de contraste (figura 6.11), que facilito la detección de los diferentes tipos de defectos por combinación de histogramas.

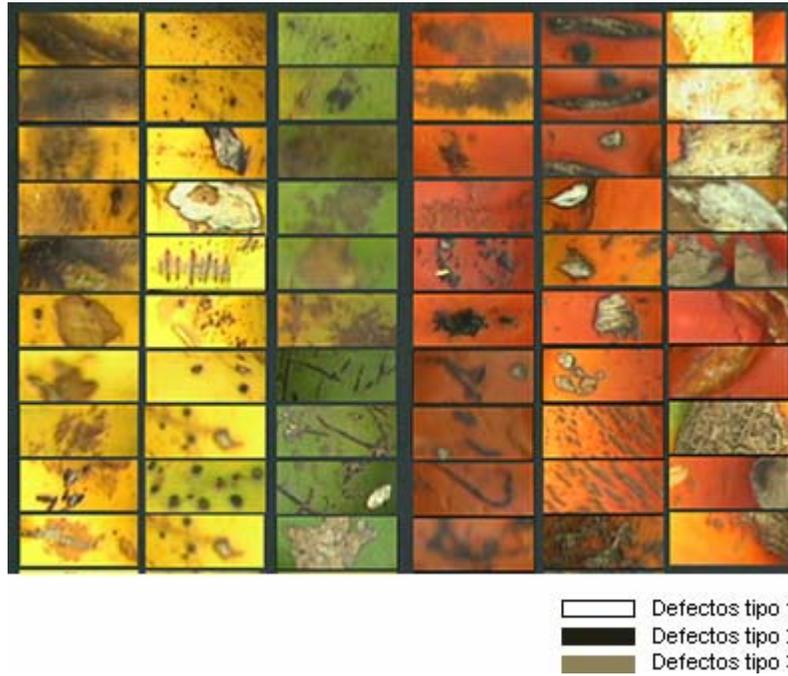
Figura 6.11. Procesado de imagen franjas para defectos. a) Imagen franjas y b) Imagen procesada.



Fuente: Autores.

En la figura 6.12 se reúnen los defectos mas comunes en el chontaduro; defectos que toman diferentes tonalidades siendo las mas tolerables las de colores café, verde y gris, y las mas perjudiciales las de color blanco y negro. Los defectos correspondientes a magulladuras resultaron muy difíciles de detectar con esta técnica, porque sus rangos se intersectaban con la piel sana del fruto; por tanto no fueron considerados en este proyecto.

Figura 6.12. Defectos en el chontaduro.



Fuente: Autores.

Con la muestra de entrenamiento, se encuentran los rangos RGB de los defectos para cada clase de color, descritos en las tablas 6.14, 6.15, 6.16 y 6.17.

Tabla 6.14. Rangos RGB para defectos en chontaduro amarillo.

DEFECTOS	R	G	B
Tipo 1	136-164	77-97	0-4
Tipo 2	153-255	154-255	136-230
Tipo 3	82-153	42-107	39-87

Fuente: Autores.

Tabla 6.15. Rangos RGB para chontaduros rojos.

DEFECTOS	R	G	B
Tipo 1	45-99	37-96	25-74
Tipo 2	119-248	139-255	94-253
Tipo 3	72-107	85-104	59-80

Fuente: Autores.

Tabla 6.16. Rangos RGB para chontaduros naranjas.

DEFECTOS	R	G	B
Tipo 1	66-118	69-127	28-84
Tipo 2	250-255	196-255	145-245
Tipo 3	153-178	126-146	80-100

Fuente: Autores.

Tabla 6.17. Rangos RGB para chontaduros verdes.

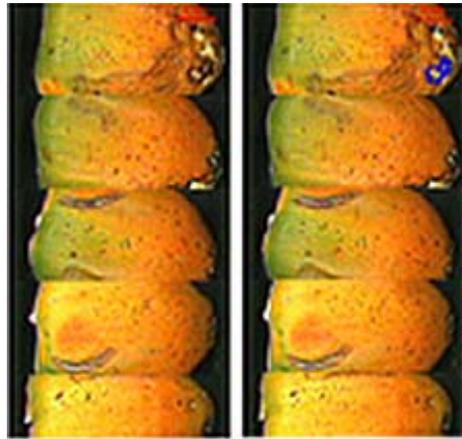
DEFECTOS	R	G	B
Tipo 1	0-59	0-53	0-52
Tipo 2	141-255	134-250	103-185
Tipo 3	69-87	56-76	26-42

Fuente: Autores.

Al aplicar estas combinaciones RGB sobre la imagen-franjas se obtiene tres imágenes binarias, donde cada una de ellas, pertenece a un tipo de defecto (figuras 6.13, 6.14, 6.15 y 6.16).

Cada figura presenta la binarización de los defectos tipo 1 en (a), tipo 2 en (b) y tipo 3 en (c) para su posterior cuantificación.

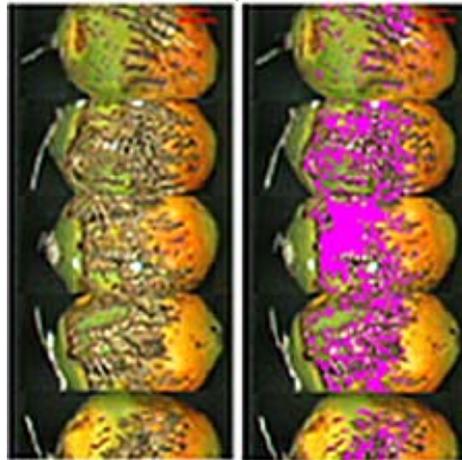
Figura 6.13. Imágenes de chontaduros naranja, originales y segmentadas para detección de defectos. a) defectos tipo 1, b) defectos tipo 2 y c) defectos tipo3.



a)



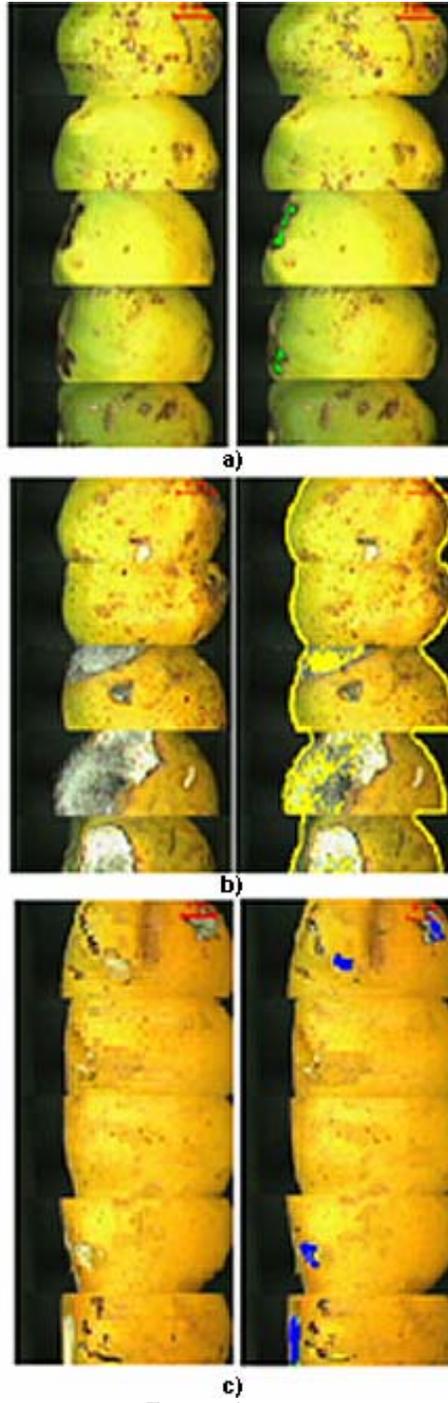
b)



c)

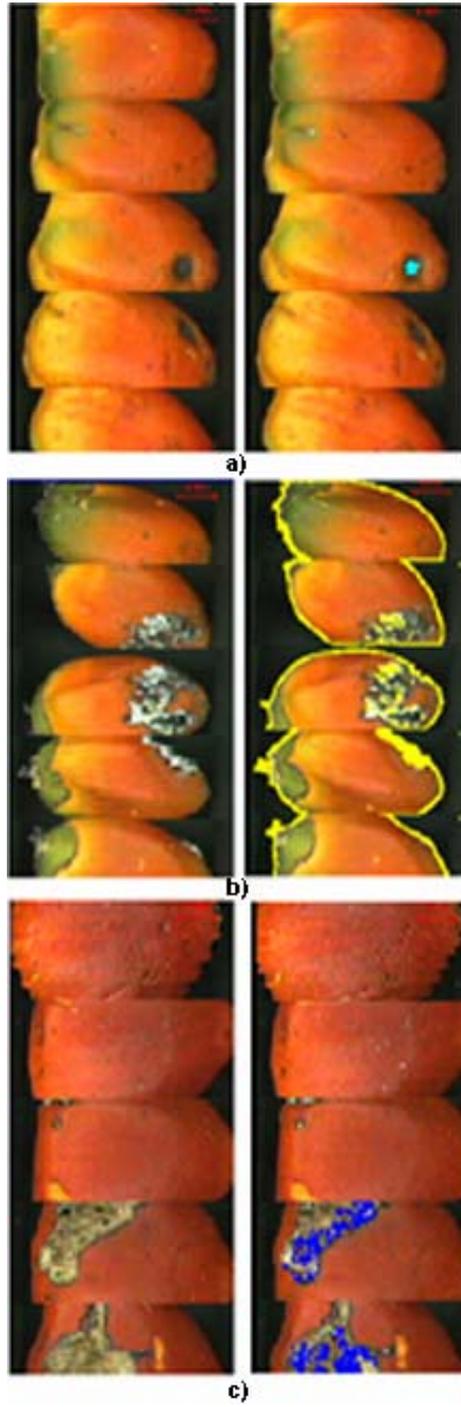
Fuente: Autores.

Figura 6.14. Imágenes de chontaduros amarillos, originales y segmentadas para detección de defectos.
a) defectos tipo 1, b) defectos tipo 2 y c) defectos tipo3



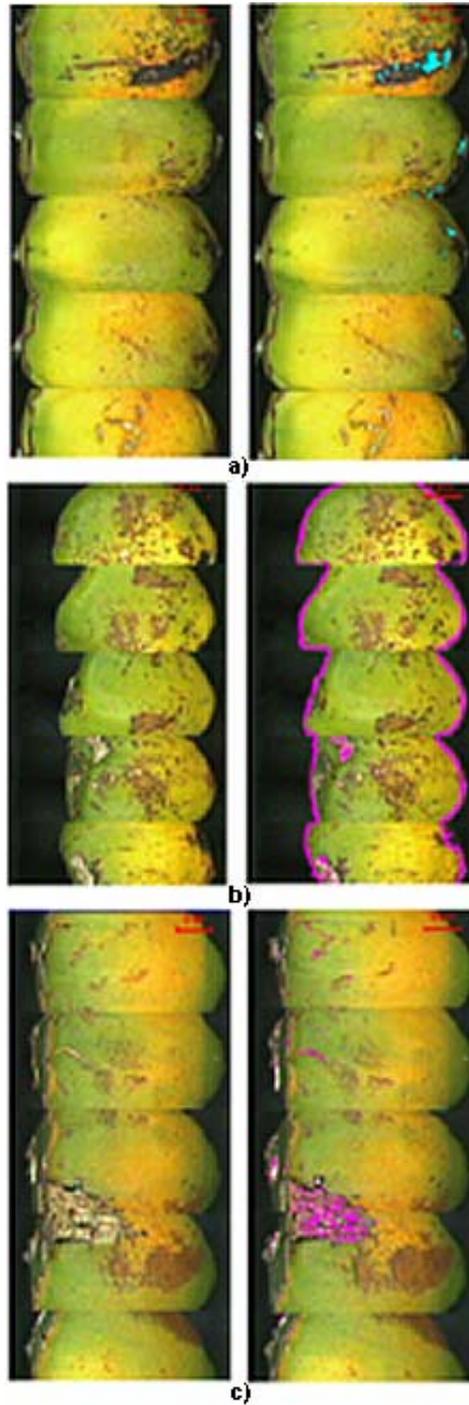
Fuente: Autores.

Figura 6.15. Imágenes de chontaduros rojos, originales y segmentadas para detección de defectos.
a) defectos tipo 1, b) defectos tipo 2 y c) defectos tipo3



Fuente: Autores.

Figura 6.16. Imágenes de chontaduros verdes, originales y segmentadas para detección de defectos.
a) defectos tipo 1, b) defectos tipo 2 y c) defectos tipo3.



Fuente: Autores.

Los defectos tipo 1 y tipo 2, se cuantifican mediante un rango de área y se establecen los criterios de clasificación tal como se muestran en la tabla 6.18.

Tabla 6.18. Rangos de área y criterios de clasificación para defectos tipo 1 y tipo 2.

TIPO DE DEFECTOS	ÁREA mm ²	CONDICIONES	APLICACIÓN FINAL	EVALUACIÓN SIGUIENTE
Tipo 1	[5, 300]	Si existen	Desecho	
		No existen	-	Evaluación de defectos TIPO 2
Tipo 2	[5, 300]	Si existen	Desecho	
		No existen	-	Evaluación de defectos TIPO 3

Fuente: Autores.

En el caso de los defectos tipo 3, se suman las áreas detectadas y se considera el porcentaje de área sobre el área total del fruto para su respectiva clasificación. Así en la tabla 6.19, se muestran los criterios que se establecen en el sistema.

Tabla 6.19. Criterios de clasificación para defectos tipo 3.

RANGO DE ÁREA MM ²	PORCENTAJE DE ÁREA %	COLOR	APLICACIÓN FINAL	EVALUACIÓN SIGUIENTE
[9, 500]	0-15	Rojo Naranja	-	Tamaño y Forma
		Verde Amarillo	Harinas	
	15-35	Rojo Naranja	Mermeladas	
		Verde Amarillo	Harinas	
	35-50	Rojo Amarillo Naranja Verde	Harinas	
	>50	Rojo Amarillo Naranja Verde	Desecho	

Fuente: Autores.

En la tabla 6.20 se muestra el porcentaje de coincidencia de un 97%, el error fue originado por la detección del corte del pedúnculo que se confunde con el RGB de la mancha blanca, por zonas de color negro localizadas en el cáliz reconocidas por el sistema como defecto tipo 1 y

por imágenes mal adquiridas debido a las características de la cámara no adecuada para este tipo de aplicación.

Tabla 6.20. Evaluación de la clasificación por defectos.

	CLASIFICACION SEGÚN EXPERTO	CLASIFICACION SEGÚN EL SISTEMA DE VISION ARTIFICIAL				COINCIDENCIA %
		TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3	SIN DEFECTOS	
TIPO 1	20	19			1	95
TIPO 2	7		7			100
TIPO 3	3			3		100
SIN DEFECTOS	130	3	1		126	97

Fuente: Autores.

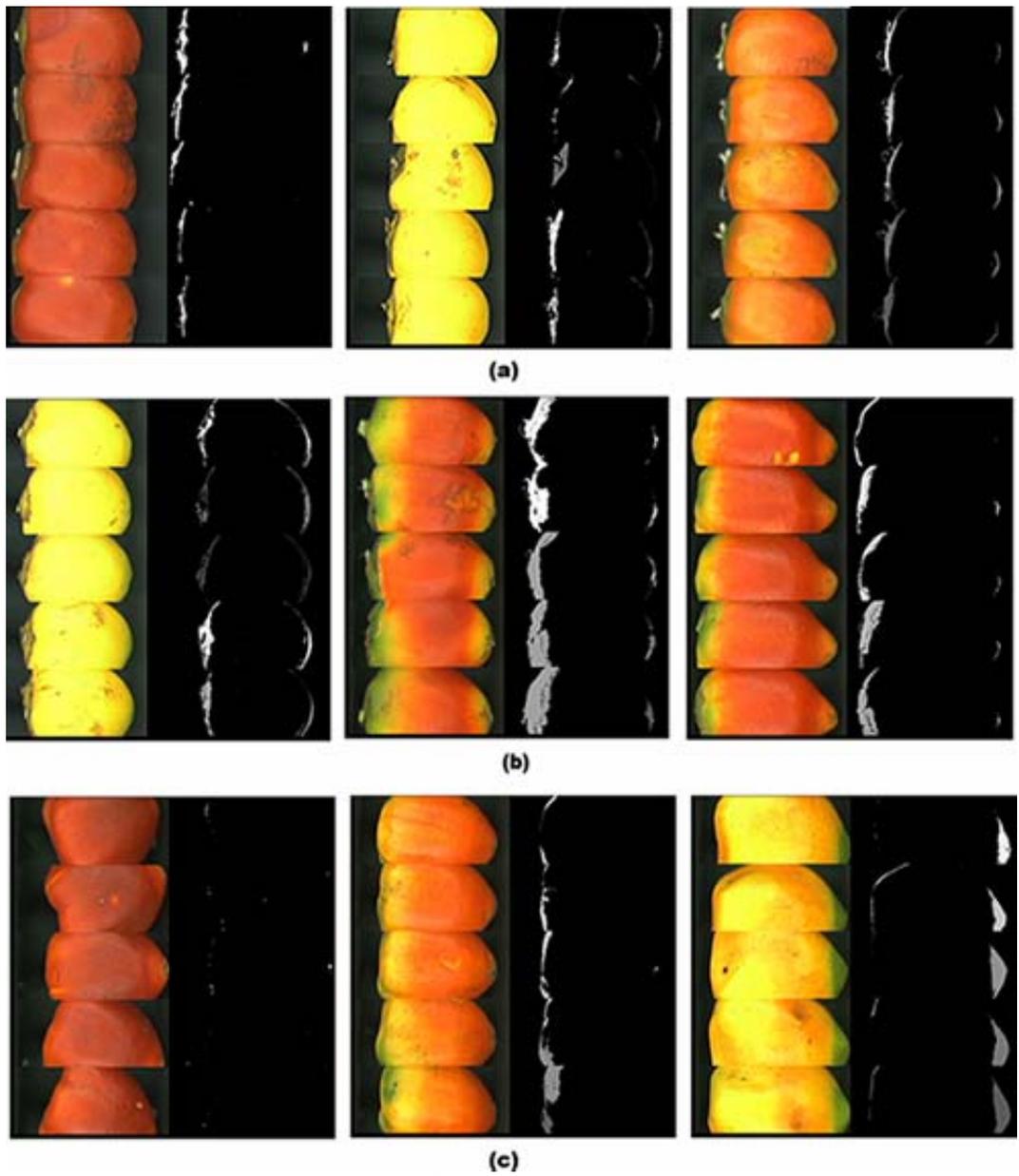
6.5 PRESENCIA DE CÁLIZ

El cáliz se ubica en la parte superior del chontaduro, su presencia es esencial para catalogarlos como conservas, su color varia en las tonalidades verdes y es difícil de detectar por que su tono se encuentra también en defectos y zonas de la piel.

Sin embargo, con la muestra de entrenamiento se observa que, cuando los chontaduros han llegado a su punto máximo de maduración, se identifica fácilmente el cáliz por diferencia de color. La técnica utilizada es la de combinación de histogramas con el que se establece su valor RGB y se define un rango de área que identifica su presencia, y aborta las zonas de no interés que también se detectan por error en este proceso (figura 6.17).

Una característica importante de los frutos verdes es que al desgajarlos del racimo, el cáliz no se desprende fácilmente, por tanto en todo fruto que presenta esta coloración no se hace necesario detectarlo.

Figura 6.17. Evaluación de los rangos RGB para presencia de cáliz. a) Frutos en el punto máximo de maduración, b) Frutos con zonas verdes en la piel, c) Frutos sin cáliz y con zonas verdes en la piel.



Fuente: Autores.

En la tabla 6.21, se describen los valores RGB y el rango de área para la clasificación final.

Tabla 6.21. Condiciones para determinar la presencia de cáliz.

RANGOS RGB			ÁREA PROMEDIO MM ²	CLASIFICACIÓN	EVALUACIÓN SIGUIENTE
R	G	B			
52-136	163-214	24-86	[4 10]	Presencia de cáliz	Forma
			>10	Mermeladas	
			< 4	Mermeladas	

Fuente: Autores.

La evaluación final para este proceso se hizo solo con chontaduros que clasificaron para conservas, de los cuales 1 de 18 fue mal clasificado por el sistema, su porcentaje de acierto fue de 94%.

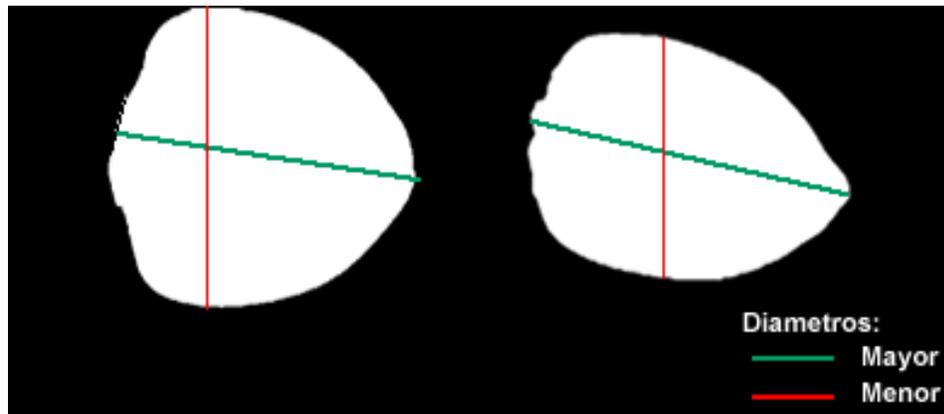
6.6 CLASIFICACIÓN POR FORMA

La razón por la que se debe valorar la forma del chontaduro es facilitar el proceso de envasado de este fruto para su aplicación en conservas.

Para la evaluación de éste clasificador se utilizaron 126 chontaduros en muy buen estado que se obtuvieron después del proceso de evaluación por defectos.

Al igual que en la clasificación por tamaño, se segmenta la imagen inicial para extraer los parámetros respectivos. La forma se determina con la diferencia de diámetros ($d=d_{\text{mayor}} - d_{\text{menor}}$) y redondez (r) (figura 6.18).

Figura 6.18. Segmentación para clasificar por forma.



Fuente: Autores.

Se implementa nuevamente el método de K-medias para la clasificación. Los centroides se establecen a partir de los dos parámetros para etiquetarlos en las clases: alargados y redondos (tabla 6.22).

Tabla 6.22. Centroides finales para la clasificación por forma.

CLASES	K ₁	K ₂
Alargados	12.887	1.15
Redondos	6.298	1.10

Fuente: Autores.

En la tabla 6.23 se muestran los criterios de clasificación por forma.

Tabla 6.23. Criterios de Clasificación por forma.

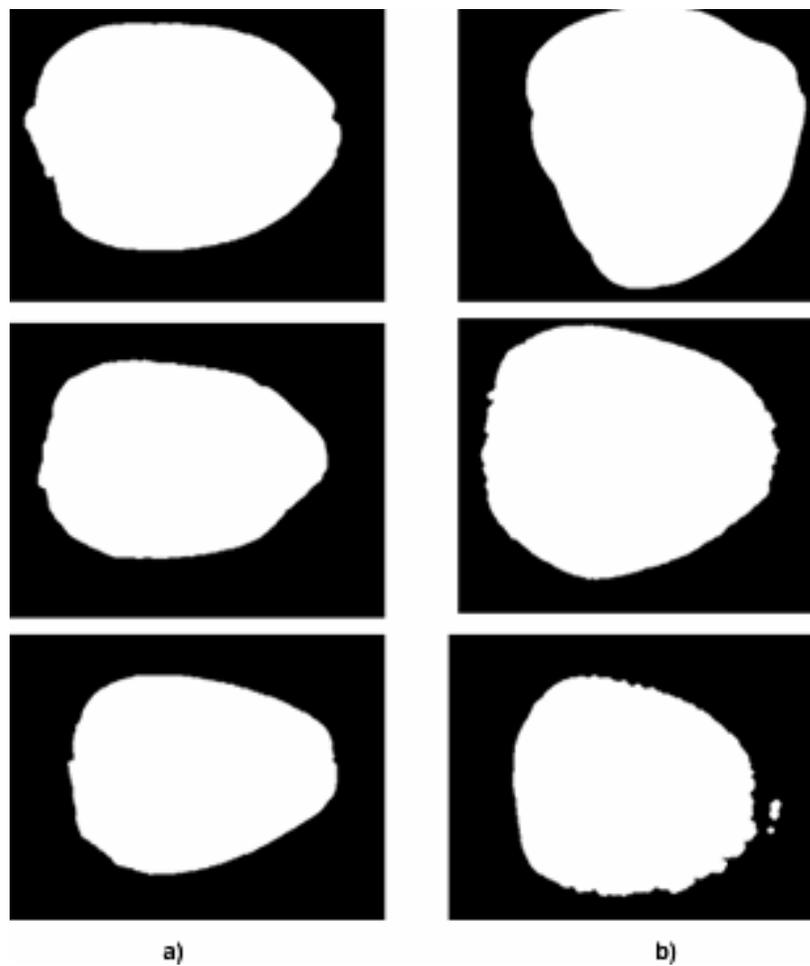
COLOR	TAMAÑO	CLASES	CLASIFICACIÓN FINAL
Rojo	Mediano	Alargados	Conservas

Naranja		Redondos	Mermeladas
---------	--	----------	------------

Fuente: Autores.

Algunos de los chontaduros clasificados por forma se muestran en el siguiente esquema (figura 6.19) y la evaluación por matriz de confusión en la tabla 6.24.

Figura 6.19. Clasificación por forma.(a) Alargados y (b) redondos



Fuente: Autores.

Tabla 6.24. Evaluación del clasificador por forma.

	CLASIFICACION SEGÚN EXPERTO	CLASIFICACION SEGÚN EL SISTEMA DE VISION ARTIFICIAL		COINCIDENCIA %
		ALARGADOS	REDONDOS	
ALARGADOS	86	86		100
REDONDOS	40		40	100

Fuente: Autores.

El porcentaje de acierto fue del 100%, debido a la buena elección de los parámetros de clasificación, pues no existió correlación entre ellos.

6.7 EVALUACIÓN FINAL DEL SISTEMA

En ésta etapa se analiza la fiabilidad global del sistema con el fin de mostrar datos reales acerca del funcionamiento del prototipo, y garantizar así, la implementación tipo industrial de ésta novedosa técnica dentro del agro.

Para cumplir éste objetivo, se unieron los diferentes procesos de evaluación, antes mencionados; cada algoritmo arroja un valor que es almacenado en una variable que posteriormente es valorada según los criterios establecidos, para lograr una aplicación final de cada fruto.

Se presenta entonces, la evaluación final del sistema con la matriz de confusión que se muestra en la tabla 6.25.

Tabla 6.25. Evaluación final del sistema.

	CLASIFICACION SEGÚN EXPERTO	CLASIFICACION SEGÚN EL SISTEMA DE VISION ARTIFICIAL				COINCIDENCIA %
		CONSERVAS	MERMELADAS	HARINAS	DESECHO	
CONSERVAS	16	16				100
MERMELADAS	29	1	27		1	93
HARINAS	89	1		85	3	95

DESECHO	26				26	100
---------	----	--	--	--	----	-----

Fuente: Autores.

Los resultados obtenidos muestran que la coincidencia es superior al 93 % en todas las aplicaciones, llegándose al 100% en conservas, lo que es considerado como excelente resultado ya que la importancia de éstas radica en la aceptación de frutos totalmente sanos, que podrían considerarse tipo exportación por el buen control de calidad aplicado en ellos. El porcentaje de fiabilidad total del sistema es del 96%.

Para la gran mayoría de frutos se hace constar que la norma contempla hasta un 10% de tolerancia en cada clasificación para su respectiva aplicación y, como los resultados aquí expuestos cumplen con ésta tolerancias, se consideran aceptables. El proyecto se acoge a ésta norma debido a que no se han estandarizado normas de calidad para el chontaduro.

Los tiempos de ejecución empleados por el sistema para dar un resultado definitivo cuando ha inspeccionado un fruto (ver tabla 6.26), varían de mínimos a máximos; por ejemplo un fruto de desecho es detectado más rápido que un fruto cuya aplicación sea de conservas.

Tabla 6.26. Tiempos de ejecución empleados por el sistema.

APLICACIÓN	TIEMPO MÍNIMO (s)	TIEMPO MÁXIMO (s)
CONSERVAS	11	12
MERMELADAS	8	12
HARINAS	8	11
DESECHO	7	10

Fuente: Autores.

Como se puede notar, los tiempos que utiliza la estación de procesamiento de imágenes para inspeccionar, analizar y dar un resultado definitivo, no son los más apropiados para la clasificación en línea de frutas; pero, actualmente existen muchas formas y métodos que permiten hacer una reducción bastante considerable de los tiempos de procesamiento.

7. PROTOTIPO PARA LA CLASIFICACIÓN DE CHONTADUROS - SISTEMA DE INSPECCIÓN VISUAL AUTOMÁTICO

EL departamento del Cauca, al igual que otras regiones del país son netamente agrícolas; sus cultivos son potenciales en la línea de frutas y hortalizas debido a las favorables condiciones climáticas y a la riqueza mineral de los suelos. La temporada de cosecha de diferentes productos genera grandes pérdidas ya que la única forma de consumo en nuestro medio se hace en fresco.

El problema de sobreproducción se puede atacar con la implementación de un sistema automático, en el centro de acopio, que logre evacuar los frutos en forma rápida y que a la vez inspeccione la calidad de ellos. Este sistema se desarrollo a modo de prototipo en el Laboratorio de Óptica y Laser en la línea de Procesamiento Óptico Digital de Imágenes de la Universidad del Cauca, obteniendo excelentes resultados en la clasificación final y un gran impacto en la comunidad de productores.

En la figura 7.1 se muestra los diferentes dispositivos implementados que realizan una tarea secuencial y específica para la clasificación de un chontaduro.

En la figura 7.1(a), se observa el dispensador de chontaduros, que se implemento con el fin de que el prototipo fuese lo mas autónomo posible; la forma de alimentar el sistema clasificador se puede mejorar haciendo uso de dispositivos electrónicos que en comparación con los sistemas mecánicos ofrecen mejores ventajas.

La banda giro-transportadora y la plataforma de posicionamiento, figura 7.1(b), funcionaron correctamente y corresponden a características propias del prototipo; para la implementación

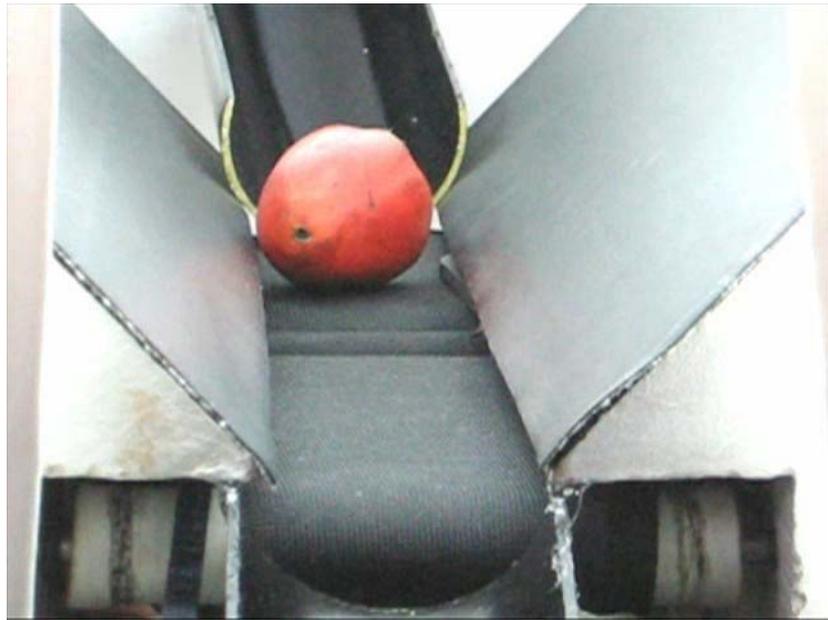
de este sistema tipo industrial, el diseño de estos dispositivos variaría ya que depende de las necesidades de las centrales hortofrutícolas.

Figura 7.1. Prototipo implementado. (a) Dispensador de chontaduros y cámara de iluminación, (b) banda giro-transportadora y mecanismo de posicionamiento





(a)





(b)

Fuente: Autores.

El proceso de estandarización de los módulos correspondientes a la cámara de iluminación y al sistema mecánico (banda giro-transportadora) presentaron serios inconvenientes a la hora de adquirir imágenes en movimiento. Se hizo necesario fijar parámetros como la velocidad de la banda, tiempo de obturación, tipo y potencia de las lámparas a usar, para garantizar una excelente calidad de la imagen y así minimizar la complejidad de los algoritmos de procesamiento.

Se hicieron pruebas utilizando luz estroboscópica, empleando otro tipo de disposición de las lámparas dentro de la cámara de iluminación difusa y adquiriendo imágenes a diferentes velocidades de rotación y distintos tiempos de obturación.

Trabajar con los tipos de iluminación sometidos a prueba no ofreció buenos resultados puesto que la arquitectura de la cámara no es la ideal para este tipo de aplicaciones.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La configuración correspondiente a la técnica de iluminación frontal, permitió iluminar uniformemente la zona de captura de la imagen, mejorar la iluminación de los bordes de la fruta, eliminar las sombras producidas entre la banda y la fruta y los brillos en la superficie de las mismas.

Igualmente, se consiguió radiación suficiente en el espectro visible y, se evitó parpadeos en las imágenes capturadas con tiempos de exposición muy bajos, que fueron necesarios para la correcta captura de las imágenes de las frutas que pasan por debajo de la cámara.

En cuanto a la funcionalidad del sistema mecánico diseñado a modo de prototipo, ofrece muy buenos resultados cuando el chontaduro es uniforme puesto que, se alinean siempre sobre su eje polar, facilitando la rotación del fruto sobre el rodillo. Cuando la forma del chontaduro se ve alterada, quizá, por el crecimiento en el racimo, estos frutos no logran girar siempre sobre el mismo eje, lo que altera la variación de la medida.

El método de segmentación por combinación de histogramas, es una técnica que se ajustó satisfactoriamente a la detección de píxeles de interés usado en los procesos de clasificación por color, defectos, tamaño y forma.

La implementación de los algoritmos se hizo pensando en obtener al final un clasificador que realizara las tareas comunes de procesamiento de imágenes en forma sencilla, con la posibilidad de disminuir el costo temporal del sistema de clasificación, a la hora de desarrollar sistemas SIVA en el entorno industrial.

Con respecto al sistema de iluminación, es aconsejable emplear matrices de *leds* para iluminar la escena de captura de imagen, por su alta durabilidad y bajo costo económico que los hacen, los más opcionados a la hora de implementar este sistema en la industria.

En el desarrollo de este proyecto se usó una cámara CCD no adecuada para la captura de imágenes en movimiento porque presenta un desfase en los tiempos de integración, bien sea entre líneas o entre campos; pues existen cámaras progresivas que por su arquitectura toman imágenes en un mismo instante convirtiéndose en dispositivos ideales para usar en estos casos.

Para hacer de este sistema de clasificación de chontaduros, uno más completo, se recomienda hacer la detección de defectos correspondientes a magulladoras, usando la técnica de evaluación por texturas o adquirir imágenes en otras bandas espectrales como la de infrarrojo, en la que seguramente se encontrarán respuestas aptas para la solución de este problema. Estudios ya realizados revelan la factibilidad de éstas técnicas.

Uno de los principales requerimientos de los sistemas automáticos de inspección de frutas es el funcionamiento en tiempo real, lo que no siempre se consigue por el elevado coste temporal de los algoritmos de análisis de imagen. Sin embargo, existen aplicaciones que, por la sencillez de las técnicas empleadas, por la utilización de un *hardware* específico o por la optimización de ciertas tareas, lo consiguen. Para transferir el prototipo desarrollado en este proyecto a nivel industrial, se deben ensamblar los algoritmos en procesadores de señales digitales (DSP) que realizaran las tareas empleando un tiempo de ejecución mínimo, en el orden de milisegundos.

BIBLIOGRAFÍA

ALEIXOS, N. Desarrollo de técnicas de visión artificial, utilizando procesadores digitales de señal. Aplicación a la detección de defectos en frutas en tiempo real. Valencia: Universidad Politécnica, España, 1999.

ALONSO SALCES, Rosa, HERRERO, Carlos y BARRANCO, Alejandro. Classification of apple fruits according to their maturity state by the pattern recognition analysis of their polyphenolic compositions. España: Universidad del París. 2004.

BLASCO, J., ALEIXOS, N. y MOLTÓ, E. Machine vision system for automatic quality grading of fruit. Spain: Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias. 2003.

BULANONA, D. M, KATAOKAB, T. y HIROMAC, T. A Segmentation algorithm for the automatic recognition of fuji apples at harvest. Japan: United Graduate School of Agricultural Sciences. 2002.

CASTLEMAN, K. R. Digital images processing. New Jersey: Prentice –Hall, 1996.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL CAUCA. El Chontaduro. Popayán, 2001.

CREPIC, Centro Regional de Productividad e Innovación del Cauca. Fortalecimiento integral de la minicadena de la palma de chontaduro en el departamento del Cauca. Popayán, 2002.

ESPINAL, Carlos F. Globalización e Integración Económica, Perspectiva Agrícola y Tecnológica para América Latina. Colombia, 2002.

GARCIA, J. Influencia de los factores de producción y manejo en las propiedades físicas y susceptibilidad a daños mecánicos de variedades de manzana y pera. Madrid, 1994.

GODOY, Sandra, FORERO, Clara, DIAZ, Doris, LUNA, Gabriela, MOTTA, Lorena. Proyecto: Fortalecimiento integral de la minicadena de la palma de chontaduro estandarización de productos con chontaduro. Popayán, 2004.

LEEMANS, V. y DESTAIN, M. F. A real time grading method of apples based on features extracted from defects. Belgium: Gembloux Agricultural University. 2003.

Manual de práctica de manejo postcosecha de los productos hortofrutícolas a pequeña escala. CALIFORNIA, 1996.

MAPA, Ministerio de agricultura, pesca y alimentación. Normas de calidad para frutas y hortalizas. Valencia, 1992.

MAZUZ, C.. Calidad de frutos cítricos. Valencia: Ediciones de Horticultura S.L, 1995.

PONS, Rosa. Evaluación de métodos no destructivos, para determinar la calidad de la fruta. Valencia, 2000.

REYES CUESTA, R., PEÑA ROJAS E. A., y GOMEZ SOTO, J. El Cultivo de Chontaduro (*Bactris Gasipaes* K.) para Palmito. CORPOICA No 5. Colombia. 1997.

RIOS A., NEITHA J.C. y MOSQUERA R., Perspectivas para la Agroindustrialización del Chontaduro *Bactris gassipaes* en la zona de influencia del municipio de Quibdó, Chocó, Colombia. 1997.

ROMOJARO, F. Criterios de calidad del fruto. Cambios durante la maduración. Identificación de criterios no destructivos. Madrid, 1994.

RUIZ, L. A. Aplicación de técnicas de análisis de imagen y espectrometría infrarroja para la detección de daños en cítricos en la posrecolección. Valencia: Universidad Politécnica, España, 1999.

SINHA, Sunil y FIEGUTH, Paul. Segmentation of buried concrete pipe images. Canadá: University of Waterloo. 2005.