



**CENTRO DE INVESTIGACIONES  
EN OPTICA, A.C.**

*SISTEMA PARA CLASIFICACIÓN DE JITOMATES  
BASADO EN METROLOGÍA LASER Y ALGORITMOS  
COMPUTACIONALES*

Presenta:

ING. OTONIEL IGNO ROSARIO

Para obtener el grado de:

Maestría en Optomecatrónica

Asesor:

Dr. J. Apolinar Muñoz Rodríguez

León, Gto. Diciembre de 2010

# *Agradecimientos*

*A mi asesor de tesis Dr. Apolinar Muñoz por su conocimiento y experiencia y por su tiempo y ayuda en la realización de este trabajo, gracias a lo cual esta tesis tiene menos errores.*

*A mis padres y hermanos por sus apoyo moral y por su ejemplo, gracias.*

*A mi esposa por su amor, confianza, incondicional apoyo, estímulo y motivación durante la realización de esta tesis y siempre, muchas gracias.*

*A los organismos que en este país permiten la realización de esta tesis: Conacyt y Cio.*

*A la M.C. Haydee.P. Martínez H. cuyos contactos hicieron posible la creación de la idea que concibió esta tesis.*

*A mis amigos por la amistad y gran ayuda que me han brindado siempre.*

*Al Todopoderoso por quien vivo.*

## RESUMEN

La creciente exigencia de consumo de productos de calidad, junto a factores económicos, ha inducido a las empresas del sector agroindustrial a introducir innovaciones tecnológicas en sus instalaciones. En particular procedimientos no destructivos, especialmente los ópticos.

En esta tesis se describe la implementación de un prototipo de una línea de clasificación de tomate por tamaño y por color aplicando técnicas de metrología óptica. Se ha usado una metodología clásica en visión por computadora, basada en la adquisición y procesado de imágenes en tiempo real. El tamaño está basado en el diámetro, que se calcula usando análisis de componentes principales. Además, mediante la proyección de una línea de luz láser sobre la fruta se determina el diámetro en el sentido vertical, para realizar la clasificación de acuerdo con las normas vigentes en México. La proporción de color se calculó en el espacio de color CIELCH, el tono H predominante se comparó con una referencia.

El prototipo consiste en una webcam, una caja con un sistema apropiado de iluminación, un láser como fuente de luz estructurada, una computadora, una cinta transportadora de fondo oscuro donde son desplazadas las frutas y otras partes mecánicas y electrónicas. Los algoritmos se pueden adaptar para el análisis de otras frutas. También es posible diseñar un sistema para comercializar con base en esta investigación.

## JUSTIFICACIÓN

Una de las hortalizas que tiene gran demanda a nivel mundial es el tomate rojo o jitomate, el cual es utilizado en la preparación de una gran variedad de alimentos y representa una importante fuente de recursos para los productores (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. SAGARPA. 1998). De acuerdo con Fideicomisos Instituidos en Relación a la Agricultura del Banco de México (2007), la producción de tomate en invernadero en Norteamérica durante 2005 se estimó en 650,000 toneladas, con 42% Canadá, 30% EUA y 28% México, mostrándose un crecimiento en la producción de tomate en invernadero los últimos diez años. De las 8,569 hectáreas de agricultura protegida en México durante 2008, 37.9% se dedicó a cultivo de tomate (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. SIAP. 2010).

La Asociación Mexicana de Productores de Hortalizas menciona que México es uno de los países en que la agricultura protegida está en expansión (citado por Subsecretaría de Agricultura de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, SAGARPA. 2009). Sin embargo, la producción de tomate en invernadero debe contener todos los elementos que el exigente mercado internacional está fijando para retribuir con los precios adecuados los productos de esta actividad (Fondo de Capitalización e Inversión del Sector Rural. FOCIR. 2008).

Las debilidades de México, [comparado con Estados Unidos y Canadá] son el alto costo del capital, inexperiencia técnica y gerencial y escasez de proveedores de insumos especializados y servicios de infraestructura (Fideicomisos Instituidos en Relación a la Agricultura del Banco de México. FIRA. 2007).

Por lo anterior, en esta tesis se propone un sistema de clasificación automática de tomates por tamaño y por color, el cual consta básicamente de dos subsistemas interdependientes para alcanzar el objetivo deseado: un sistema de inspección basado

en visión artificial y metrología láser, y un sistema electromecánico de separación de productos en categorías de acuerdo con las normas mexicanas vigentes.

La investigación servirá en un futuro, para diseñar una máquina seleccionadora de tomate por tamaño y por color con fines comerciales. Dicha máquina será usada durante la post cosecha de tomate en invernadero en el estado de Tlaxcala, y posiblemente en otras partes de México.

## OBJETIVOS

El principal objetivo de esta investigación es estudiar la factibilidad de clasificar el fruto de tomate por tamaño y por color, usando un sistema de visión por computadora y metrología láser; atendiendo las normas establecidas en México para esos atributos, los cuales son seis colores y tres tamaños. Para lograr el objetivo principal, se proponen dos objetivos específicos, los cuales son:

1. Desarrollar algoritmos computacionales para el procesamiento de las imágenes en tiempo real.
2. Diseñar un sistema optomecatrónico que incluya:
  - a) cámara webcam,
  - b) caja con un sistema apropiado de iluminación,
  - c) fuente de luz estructurada,
  - d) cinta transportadora de fondo oscuro donde son desplazadas las frutas,
  - e) otras partes mecánicas y electrónicas para la separación de productos por categorías.

## PRÓLOGO

El material presentado en la tesis está organizado en cinco capítulos. El primer capítulo comienza con una breve reseña cultural del tomate y de conceptos relacionados con la clasificación en la industria agroalimentaria, también se revisan los métodos que se usan en la clasificación de las frutas. En el capítulo dos se presentan los elementos que constituyen el prototipo y como se relacionan entre sí. El capítulo tres describe como se calculó el tamaño, el color y la forma del tomate usando visión por computadora. En el capítulo cuatro se exponen los resultados de esta tesis y el capítulo cinco son las conclusiones.

# Contenido

<b>RESUMEN</b>	<b>I</b>
<b>IUSTIFICACIÓN</b>	<b>II</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>III</b>
<b>PRÓLOGO</b>	<b>IV</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b>	<b>VIII</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA</b>	<b>1</b>
<b>1.2 BREVE DESCRIPCIÓN DEL TOMATE</b>	<b>2</b>
1.2.1 RECOLECCIÓN DE TOMATE EN INVERNADERO	3
1.2.2 LIMPIEZA EN LA POST-COSECHA DE TOMATE	3
1.2.3 CLASIFICACIÓN EN LA POST-COSECHA DE TOMATE	4
<b>1.3 ANTECEDENTES EN LA CLASIFICACIÓN AUTOMÁTICA DE FRUTA</b>	<b>4</b>
1.3.1 MÉTODO DE INSPECCIÓN USANDO VISIÓN POR COMPUTADORA	4
1.3.2 OTRAS TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS	6
<b>CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA OPTOMECASTRÓNICO</b>	<b>10</b>
<b>2.1 EQUIPO UTILIZADO</b>	<b>10</b>
<b>2.2 FUNCIONAMIENTO GENERAL DEL SISTEMA</b>	<b>12</b>
<b>2.3 ASPECTOS MECÁNICOS Y ELÉCTRICOS DEL SISTEMA</b>	<b>13</b>
<b>2.4 MUESTRA DE TOMATE</b>	<b>18</b>
<b>2.5 SISTEMA DE ILUMINACIÓN</b>	<b>19</b>
<b>CAPÍTULO 3. DETECCIÓN DEL TAMAÑO, FORMA Y COLOR DEL TOMATE</b>	<b>22</b>
<b>3.1 ESPECIFICACIONES DE FORMA, COLOR Y TAMAÑO PARA TOMATE EN MÉXICO</b>	<b>22</b>
3.1.1. NORMA DE FORMA PARA TOMATE	22
3.1.2 NORMA DE COLOR PARA TOMATE	23
3.1.3 NORMA DE TAMAÑO PARA TOMATE	24
<b>3.2 ALTURA DEL TOMATE USANDO LÍNEA DE LUZ LASER Y REDES DE APROXIMACIÓN PARA LA CALIBRACIÓN DEL SISTEMA DE VISIÓN</b>	<b>26</b>

3.2.1 DESCRIPCIÓN BÁSICA DEL ARREGLO	26
3.2.2 ALTURA DEL OBJETO Y CALIBRACIÓN USANDO RED BÉZIER	28
<b>3.3 CÁLCULO DE LA DISTORSIÓN RADIAL</b>	<b>34</b>
<b>3.4 PREPARACIÓN DE LA IMAGEN PARA CALCULAR COLOR Y TAMAÑO DEL TOMATE</b>	<b>36</b>
3.4.1 UMBRALIZACIÓN	37
3.4.2 APLICACIÓN DE APERTURA MORFOLÓGICA	38
3.4.4 ELIMINACIÓN DE REFLEJOS DE LUZ	40
<b>3.5 DETERMINACIÓN DEL DIÁMETRO ECUATORIAL Y POLAR DEL TOMATE</b>	<b>41</b>
<b>3.6 ESTIMACIÓN DEL COLOR DEL TOMATE</b>	<b>50</b>
<b>3.7 MEDICIÓN DE LA FORMA DEL TOMATE</b>	<b>55</b>
<b><u>CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y OBSERVACIONES</u></b>	<b>56</b>
<b>4.1 ALTURA DEL TOMATE USANDO LÍNEA DE LUZ LASER Y RED DE APROXIMACIÓN BÉZIER</b>	<b>56</b>
<b>4.2 CORRECCIÓN DE LA DISTORSIÓN RADIAL</b>	<b>63</b>
<b>4.3 PREPARACIÓN DE LA IMAGEN PARA CALCULAR COLOR Y TAMAÑO DEL TOMATE</b>	<b>64</b>
4.3.1 UMBRALIZACIÓN	64
4.3.2 APLICACIÓN DE APERTURA MORFOLÓGICA	66
4.3.4 ELIMINACIÓN DE REFLEJOS DE LUZ	67
<b>4.4 DETERMINACIÓN DEL DIÁMETRO ECUATORIAL Y POLAR DEL TOMATE</b>	<b>68</b>
<b>4.5 ESTIMACIÓN DEL COLOR DEL TOMATE</b>	<b>73</b>
<b>4.6 MEDICIÓN DE LA FORMA DEL TOMATE</b>	<b>76</b>
<b><u>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES</u></b>	<b>78</b>
<b><u>BIBLIOGRAFÍA</u></b>	<b>80</b>



## Lista de Figuras

2.1	Ilustración del prototipo fabricado.....	11
2.2	Diagrama a bloques de los elementos del sistema de clasificación automática.	12
2.3	Elementos relacionados con la banda transportadora.....	14
2.4	Mecanismo rotatorio basado en motor a pasos.....	15
2.5	Esquema da la interfaz electrónica.....	16
2.6	Diagrama de flujo del algoritmo llevado a cabo en el microcontrolador.	17
2.7	Muestra de tomate utilizada.....	18
2.8	Interacción de la luz con un fruto. ....	19
2.9	a) Región para detectar color, tamaño y forma, b) región para línea de luz .....	20
2.10	Campo de visión de la cámara.....	21
3.1	Diámetros para una fruta: a) ecuatorial, b) polar.....	22
3.2	Clasificación del estado de madurez para tomate Cherry. ....	24
3.3	Arreglo para calcular la altura del objeto.....	27
3.4	a) Línea de luz proyectada por un diodo laser, b) distribución de intensidad de la línea de luz en la dirección transversal, c) pixeles en cada fila de la imagen...	27
3.5	Posición del máximo en fracciones de pixel, representado por $\mu$ , en la aproximación gaussiana.....	28
3.6	Estructura de la red Bézier.....	29
3.7	Patrón de referencia con alturas $h_i$ conocidas.....	29
3.8	Posición de la línea en la imagen para $h_l = 10$ mm, y $h_g = 79$ mm.....	31
3.9	Máxima altura de todas las líneas.....	33
3.10	Diámetro ecuatorial o altura, calculado con la línea de luz para tomate tipo saladette.....	33
3.11	Geometría del arreglo para calcular la distorsión.....	34
3.12	Captura del patrón de referencia. ....	34
3.13	Gráfica de la distorsión en el eje x.....	36
3.14	Cono de colores del modelo de color HSV.....	37
3.15	a) Imagen original, b) Componente V del modelo de color HSV.....	38
3.16	Imagen binaria del componente V de la figura 3.14b.....	38
3.17	a) Imagen resultante al aplicar apertura a la imagen de la figura 4.16, b) estructurante usado de 9x9 pixeles.....	40
3.18	a) Imagen original, b) componente de saturación del modelo HSV.....	41
3.19	Área resultante al aplicar cerradura- apertura y eliminación de reflejos.....	41
3.20	Diámetros del tomate.....	42
3.21	a) Espacio tridimensional del modelo de color Cie $l^*a^*b^*$ , b) ángulo de matiz h en el modelo CIELCH.....	50
3.22	Elipsoides de tolerancia para H en el espacio de color CIELCH.....	54
3.23	Centroides de la fruta en la capturas de video.....	54
4.1	Perfil de la altura de un objeto.....	57
4.2	Máquina de coordenadas para medir la altura del objeto.....	57

4.3	Muestra de tomate para obtener su perfil.....	58
4.4	Perfil del tomate, con una posición inclinada en la imagen.....	59
4.5	Perfil del tomate con una posición vertical en la imagen.....	60
4.6	Muestras para calcular altura de la fruta.....	61
4.7	a) imagen con distorsión, b) imagen corregida.....	63
4.8	Binarización del componente V aplicando un umbral de 40 a ocho muestras a, b, c, d, e, f, g, h.....	66
4.9	Apertura con estructurante de a) 7x7, b) 15x15, c) 23x23, d) 31x31 pixeles.....	66
4.10	Región que resultó para cada fruta al eliminar los reflejos.....	67
4.11	Trazo de diámetro ecuatorial y diámetro polar.....	69
4.12	Muestras para calcular el diámetro ecuatorial de la fruta.....	70
4.13	Umbrales para el componente H del espacio de color CIELCH elegidos para realizar la clasificación por color.....	73
4.14	Muestras de tomate usadas para calcular la desviación estándar en la medición de H y para medir la forma.....	74

## Lista de Tablas

1.1	Métodos no destructivos para medir parámetros de calidad interna y externa en frutas.....	8
1.2	Empresas que comercializan equipos de clasificación.....	9
3.1	Clasificación por tamaño del tomate.....	25
4.1	Mediciones de la altura de tomates.....	62
4.2	Mediciones del diámetro ecuatorial.....	72
4.3	Mediciones del componente H.....	75
4.4	Mediciones de la forma del tomate.....	77

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Definición del problema

Un problema de los invernaderos en el estado de Tlaxcala, México, es la falta de una máquina seleccionadora de tomate que esté ubicada en sus instalaciones. Dicha necesidad es debido a que la comercialización se realiza en la localidad de origen en primer lugar, para pasar a un segundo nivel con ventas a nivel regional, mayoristas y detallistas. Actualmente la post cosecha del tomate en dicho estado, implica llevar el producto a un centro de acopio para ser seleccionado y empacado, lo cual supone costos de traslado. Además, los productores la mayor de las veces venden su producto sin seleccionar a sus clientes, con la consiguiente disminución del precio de su cosecha.

Con una producción de 164 toneladas cosechadas durante 2008 (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. SIAP. 2010), Tlaxcala no logra aún consolidar un centro de acopio que procese la cosecha diaria. Por ejemplo, la región de Mazatepec, Morelos cuya producción se estima en 4000 toneladas por año y con 115 productores de 11 municipios, apenas inauguró su centro de acopio y selección en 2007 (Gobierno del Estado de Morelos, 2007).

Sin embargo, la producción de tomate en invernaderos en Tlaxcala ha aumentado casi en 100% cada año de 2006 a 2008 (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. SIAP. 2010), debido al impulso de parte del gobierno, y a las necesidades del mercado regional e internacional cada vez mayor.

En esta tesis se busca resolver el problema mencionado, implementando un prototipo de una línea de clasificación de tomate por tamaño y por color, aplicando técnicas de metrología óptica.

La clasificación por color es un proceso importante en la industria agrícola, especialmente en procesamiento de alimentos, selección de frutas y hortalizas (Sirisathitkul et al. 2006). El color es uno de los criterios más importantes, relacionado con la calidad de la fruta (Sudhakara-Rao et al. 2004). [Para el tomate], la importancia del color se debe, entre otros, al uso del color como índice de valor económico, pues es un factor determinante en cuanto a la aceptabilidad por parte del consumidor (Zapata et al. 2007).

El tamaño es otro parámetro de calidad del tomate, ya que al igual que el color, define su valor comercial, aunque es menos determinante que en otras hortalizas (Urrestarazu-Gavilán, 2003).

## **1.2 Breve descripción del tomate**

El tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill), pertenece a la familia de las Solanáceas. Se cree que es originario de la faja costera del oeste en América del Sur, cerca de los 30° latitud sur, de la línea Ecuatorial (Espinosa-Zapata, 2004). El cultivo y domesticación del tomate, parece ser que ocurrió fuera de su centro de origen, y fue realizado por los primeros pobladores de México. El nombre “tomate”, viene del náhuatl de México (Heiser, citado por Espinosa-Zapata 2004).

El fruto es carnoso, oblongo u ovalado, de color verde a rojo, succulento y fragante, de la planta de tallos rastreros (Norma mexicana para tomate, 1998). Tiene diferentes formas (liso, asurcado, aperado), con cavidades o lóculos internos variables, en donde se desarrollan las semillas de formas reniformes y aplanadas (Berenguer, citado por Espinosa-Zapata 2004).

### *1.2.1 Recolección de tomate en invernadero*

La recolección se efectúa de forma manual, preservando o no el cáliz según los mercados. En el invernadero se eliminan los frutos muy inmaduros o muy maduros, deformes, con daños fisiológicos, mecánicos o parasitarios, etc. (Artés-Calero y Artés-Hernández, 2004).

Los tomates son recolectados en diferentes grados de madurez; si son empleados para la industria deben estar completamente maduros, si es para abastecer los mercados locales, pueden estar rojos pero no completamente maduros, es decir, con la zona peduncular amarillenta. Si su destino es para exportación o mercados externos, el grado de madurez se fija en relación con el tiempo que se necesita para que el producto llegue en buenas condiciones de madurez al mercado destino (Espinosa-Zapata, 2004).

El transporte a almacén de selección se realiza por lo general en cajas de plástico, que se paletizan, evitando el sobrellenado y los daños mecánicos al fruto, la insolación directa y la permanencia a elevadas temperaturas.

### *1.2.2 Limpieza en la post-cosecha de tomate*

La alimentación a la línea de limpieza se realiza manualmente o mediante despalletizador, evitando daños mecánicos. Luego, se eliminan los frutos no comercializables, restos de material vegetal o elementos extraños.

La limpieza se efectúa mediante cepillado suave y extractor de polvo y residuos, y/o por lavado, generalmente en duchas de agua clorada (aprox. 100 ppm de cloro libre) a presión. Cantwell y Kasmire (citado por Artés-Calero 2004), mencionan que la temperatura del agua de lavado sea 5° mayor que la de los frutos para prevenir que el agua y microorganismos patógenos entren al fruto, realizando la operación en dos tanques separados por una ducha de agua limpia. A continuación se efectúa el secado por rodillos absorbentes, para finalmente, inyectar aire junto a cepillos suaves, a temperatura ambiente.

---

### *1.2.3 Clasificación en la post-cosecha de tomate*

Los frutos se colocan sobre diábolos, cazoletas o tazas que los transportan a través de un sistema mecánico, donde se determinan por medio de herramientas electrónicas y computacionales varios parámetros físicos como el peso, el tamaño y el color, cuyos valores se comparan con datos prefijados.

## **1.3 Antecedentes en la clasificación automática de fruta**

En los últimos años ha aumentado el uso de tecnología en la selección de fruta, donde predominan los métodos de inspección ópticos no destructivos aplicados a diversas frutas como manzanas, plátanos, fresas, limones, duraznos, naranjas, peras, papayas, tomates, papas, melones, sandía, etc. (Deshpande et al. 1984). Enseguida se aborda una revisión del método de inspección usando visión por computadora y algunas otras técnicas no destructivas.

### *1.3.1 Método de inspección usando visión por computadora*

Durante las últimas décadas a partir de 1970, han sido reportados numerosos trabajos relacionados con la evaluación automática de productos alimenticios y frutas usando visión por computadora (Mirzaei y Saraee, 2007). Con base en lo expuesto por Zheng y Sun (2008), puede decirse que las imágenes en visión por computadora presentan dos tipos de información: datos geométricos, es decir, la ubicación de píxeles en las imágenes, e información de superficie, es decir los valores de intensidad asociados a los píxeles. De la información geométrica se obtienen dos parámetros, tamaño y forma; de la información de superficie puede extraerse el color y la textura. Estas cuatro características -tamaño, forma, color y textura- son las principales mediciones de cualquier imagen en visión por computadora (Du y Sun, citado por Zheng y Sun, 2008).

En el campo de la detección del tamaño y forma se han realizado diversas investigaciones. Atencio et al. (2009) aplicaron Análisis de Componente Principal al contorno de la fruta de mango para calcular su ancho y longitud sin importar la orientación de la fruta en la escena. Mirzaei y Saraee (2007) calcularon área, orientación, ejes y diámetro aplicando segmentación basada en regiones y momentos invariantes en manzanas. Sadrnia et al. (2007) obtuvieron la forma de la fruta de sandía basándose en el cálculo de área y diámetros, en regiones. Sampallo y González-Thomas, (2008) que trabajaron con naranjas y quinotos<sup>1</sup>, emplearon el contorno y su firma para calcular alto, ancho, perímetro, área, factor de forma, superficie y volumen. Sundhakara y Renganathan, (2002) también usaron la firma de contorno para calcular el tamaño de manzanas. Otra forma de detectar la forma de una fruta es aplicándole transformada de Fourier a su contorno como lo describen Ying et al. (2003) quienes lo utilizaron en la clasificación de peras.

Los momentos centrales son otras técnicas que se han aplicado en la detección de la forma del contorno como lo demuestran Blasco et al. (2007) en la clasificación de gajos de mandarina, o en la orientación de la fruta basado en el cálculo de los ejes principales de inercia como presentan Feng et al. (2008) quienes lo aplicaron en regiones, en fresas, y, Sundhakara y Renganathan, (2002) que lo aplicaron en contornos, en manzanas. El perímetro del tomate es un indicador de su redondez y se puede detectar deformaciones como analizaron Fang et al. (2008) usando redes neuronales.

En cuanto al color se han desarrollado las siguientes investigaciones. Simões et al. (2000) trabajaron en el espacio de color RGB utilizando histogramas 3D y aplicando redes neuronales para la clasificación de naranjas. Atencio et al. (2009) y Yimyam et al. (2005), calcularon el nivel de madurez de mango usando la distribución de color en el espacio HSL, comparando los histogramas de los componentes H y S con una referencia.

---

1. Quinoto o kumquat (*Fortunella Swingle*), fruta de la familia de las rutáceas, emparentado con los cítricos. Morton, Julia. "Fruits of Warm Climates". Creative Resource Systems. Miami, Florida. 1987.

---

Pla et al. (1998), trabajaron en el espacio RGB, además eliminaron puntos brillantes de las imágenes usando el modelo de reflexión dicromática. Somatilake y Chalmers (2007) emplearon dos métodos de clasificación en algunas frutas: a) comparando los valores  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  de cada muestra con una referencia y b) equiparando regiones de los histogramas 2D de las muestras con la referencia por medio de inferencia bayesiana. Sirisathitkul et al. (2006) trabajaron en el espacio de color HSI auxiliándose del componente H con clasificador por umbral para realizar la selección por color en narajas. Sundhakara et al. (2004) usaron la densidad de probabilidad de la mediana al componente H del espacio HSI en manzanas, mientras Chinchuluun et al. (2009) y, Feng y Qixin (2004) aplicaron clasificador bayesiano usando componente H e I en naranjas y H en manzanas, respectivamente. Nagata et al. (2004) estudiaron la madurez de tomate en tres espacios de color: RGB, HSI y  $CieL^*a^*b^*$  utilizando el modelo de Analisis de discriminante lineal para realizar la clasificación. Pla et al. (1999) propusieron un procedimiento que usa el subespacio de color RG para calcular la madurez en tomate, además eliminaron los reflejos en la superficie auxiliándose del canal B del espacio RGB.

### *1.3.2 Otras técnicas no destructivas*

Diversos autores han utilizado la tecnología óptica como herramienta no destructiva para determinar diversos atributos físicos en el tomate. Por ejemplo, la tecnología NIRS (espectroscopia de reflectancia en el infrarrojo cercano) ha sido aplicada en la determinación de atributos de calidad interna, SST (sólidos solubles totales), y acidez compuesta por la acidez titulable y pH, principales parámetros relacionados con el sabor y con la calidad a percibir por los consumidores (Hobson y Bedford, 1989, citado por Flores-Rojas, 2009). Recientes investigaciones han mostrado que los métodos que miden atributos internos como NIRS, arrojan más información de diversos parámetros en tomate y otras frutas que los métodos ópticos en el rango visible. Por ejemplo, Flores-Rojas (2009) ofrece una exhaustiva revisión de distintas investigaciones sobre la tecnología NIRS en frutas y hortalizas, en la



detección de distintos parámetros de calidad como acidez, SST, defectos internos, firmeza, color interno, glucosa, densidad, materia seca, fructosa, almidón, ácido cítrico, pH, daños internos, cantidad de agua, etc.

En la tabla 1.1 se indican los parámetros de calidad más usados actualmente, su forma de medición y las frutas en que se miden. En la tabla 1.2 se muestra una lista de empresas que comercializan actualmente en el mundo, equipos para la selección automática de diversas frutas.

<b>Parámetro</b>	<b>Técnica</b>	<b>Frutas</b>
<b>Calidad externa</b>		
Color	Cartas patrón	Manzana, pera, melocotón, nectarina, limón, melón, sandía, mango, tomate, aguacate, albaricoque , etc.
	Colorímetro manual	Todas
	Análisis de imagen	Todas
	Colorímetro automático	Naranja, limón, tomate
Defectos externos	Plantillas	Todas
	Análisis de imagen	Todas
	Reflectancia UV	Cítricos
Residuos externos de plaguicidas	Sensores ópticos	Todas
Hongos	Reflectancia UV, VIS	Cítricos, fresa y pera principalmente
	Cultivo microbiológico	Cítricos, fresa
<b>Calidad interna</b>		
Forma, tamaño peso	Plantillas manuales	Todas
	Análisis de imagen	Todas
Color interno	NIRS	Todas las de piel fina (no melón)
Firmeza	Durómetro	Melocotón, tomate
	Impactador	Todas
Crujientez	Respuesta acústica	Manzana
Daños por frío, hueso	Rayos X, Resonancia acústica, sensor NMR	Todas
Defectos internos	Impacto, ultrasonido	Manzana, melocotón, albaricoque, cereza, tomate
Harinosidad	Sensor NIR, NMR o reflectancia	Todas
Residuos internos	Sensor NIR, NMR o reflectancia	Todas
Azúcar	NIRS	Todas las de piel fina (no melón)
	sensor externo	(en estudio otras técnicas)
Acidez	NIRS	Todas las de piel fina (no melón)
Aromas	Sensores de volátiles	Todas

**Tabla 1.1.** Métodos no destructivos para medir parámetros de calidad interna y externa en frutas.

*Fuente: Valero-Ubierna, (2001).*

Empresa	País	Equipo	Rango del Espectro	Parámetros de fruta	Velocidad frutas/s
Odenberg	Irlanda	Varios	VIS	Tamaño, color, área, forma, defecto	50,000kg/h
Aweta	Países Bajos	Power Vision	VIS , NIR	Color, calibre, defecto externo	8-10
Compac Sorting Equipment Ltd.	Nueva Zelanda	InVision	VIS	Color, forma, calibre volumen, defectos ext.	10-15
Multiscan Technologies S.L.	España	Varios	VIS	Tipos de daño, calibre color	5kg/minuto
Unitec S.p.A.	Italia	Varios	VIS	Peso, color, calibre defectos, etc.	10
Maxfrut S.L.	España	MaxSorter Selector	VIS	Peso, color, tamaño defectos externos	15
Maf Roda	Francia y 18 sucursales	Insight	VIS/NIR	SSC y DM	10
Sacmi Imola S.C	Italia	Fruit Analysing System F5	650nm 970nm	SSC, madurez, TA, vitrescencia y pardeamiento interno.	5
Greefa	Holanda	Intelligent Flavour analyzer (IFA)	VIS/NIR	Pardeamiento interno y SSC.	6
Taste Technologies Ltd.	Nueva Zelanda	TasteMark Instrument	NIR	SSC, defectos internos, etc	
SETOP Giraud Technologies	Francia	Pimprenelle	NIR	Vitrescencia, SSC, firmeza, peso, calibres, acidez (málico y cítrico), y jugosidad	4-5 frutos-minuto
Corporacion Industrial Uruapan	México	Varias	VIS	tamaños, peso,color	14

**Tabla 1.2.** Empresas que comercializan equipos de clasificación. *Fuente: Adaptado de Riquelme-Torres, (2008).*

## Capítulo 2

# Descripción del sistema optomecatrónico

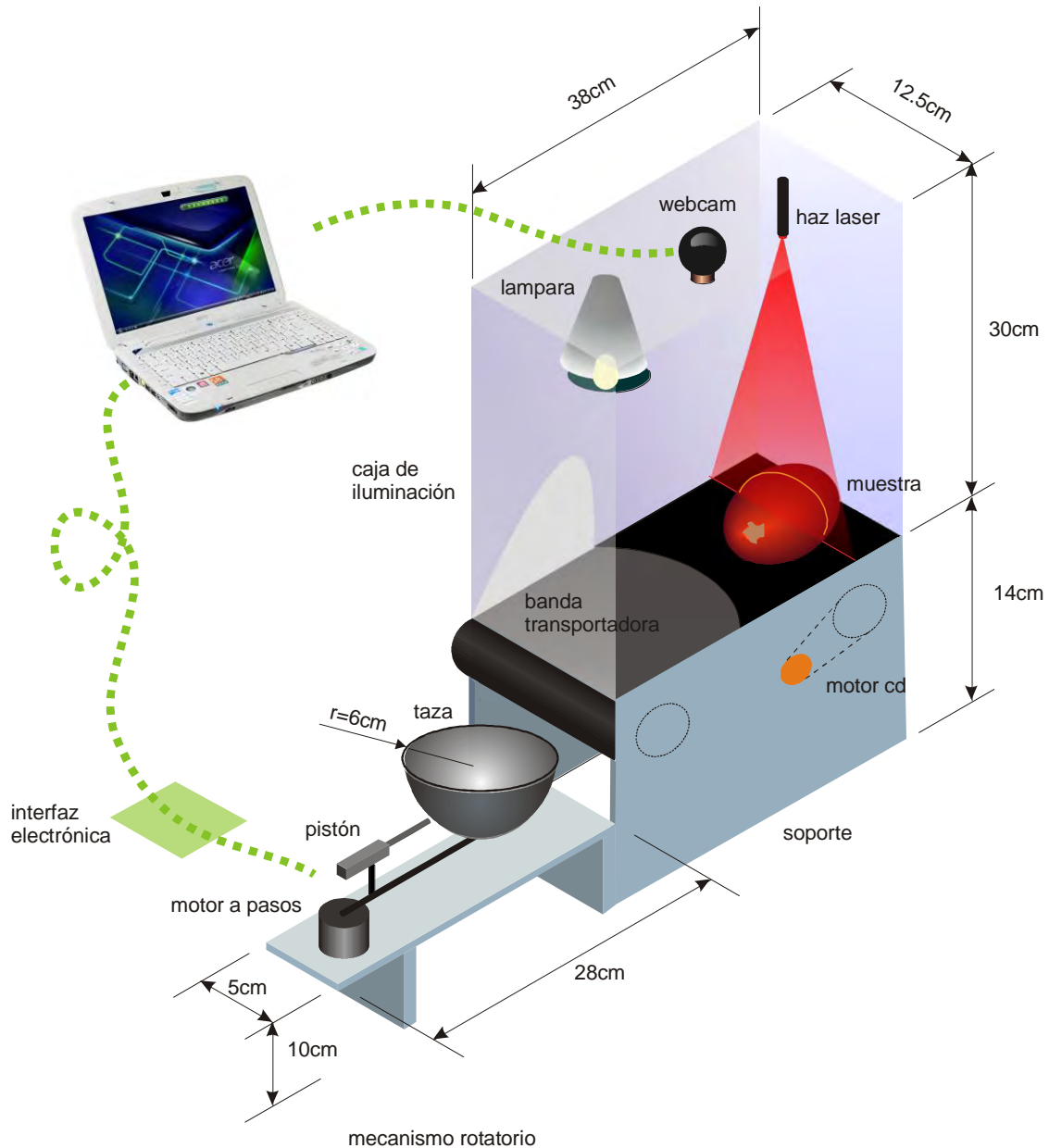
### 2.1 Equipo utilizado

Para llevar a cabo el desarrollo de esta tesis, se diseñó y se fabricó un prototipo opto-mecatrónico el cual se muestra en la figura 2.1.

Dicho prototipo se integró de varios elementos que se listan a continuación:

1. Computadora portátil Acer Aspire 5520 con 2 procesadores AMD Turion a 2 Ghz., 2 GB. de memoria Ram, tarjeta gráfica Nvidia Gforce 7000M/nForce 610M, Windows 7.
2. Software, C# en Visual Studio 2008 y Matlab 2009.
3. Diodo laser rojo (650 nm) de 5 mW clase IIIA, con cabezal proyector de línea incluido.
4. Webcam marca Logitech C300, sensor de 1.3 mega pixeles, conexión usb, velocidad de captura 30 imágenes por segundo.
5. Caja de iluminación de cartón.
6. Lámpara compacta fluorescente de 8W.
7. Banda transportadora montada en soporte con motor cd con una velocidad fija de 30cm/s.

8. Mecanismo rotatorio basado en motor a pasos, controlado por computadora, para recoger la fruta de la banda transportadora y colocarla en una posición angular.



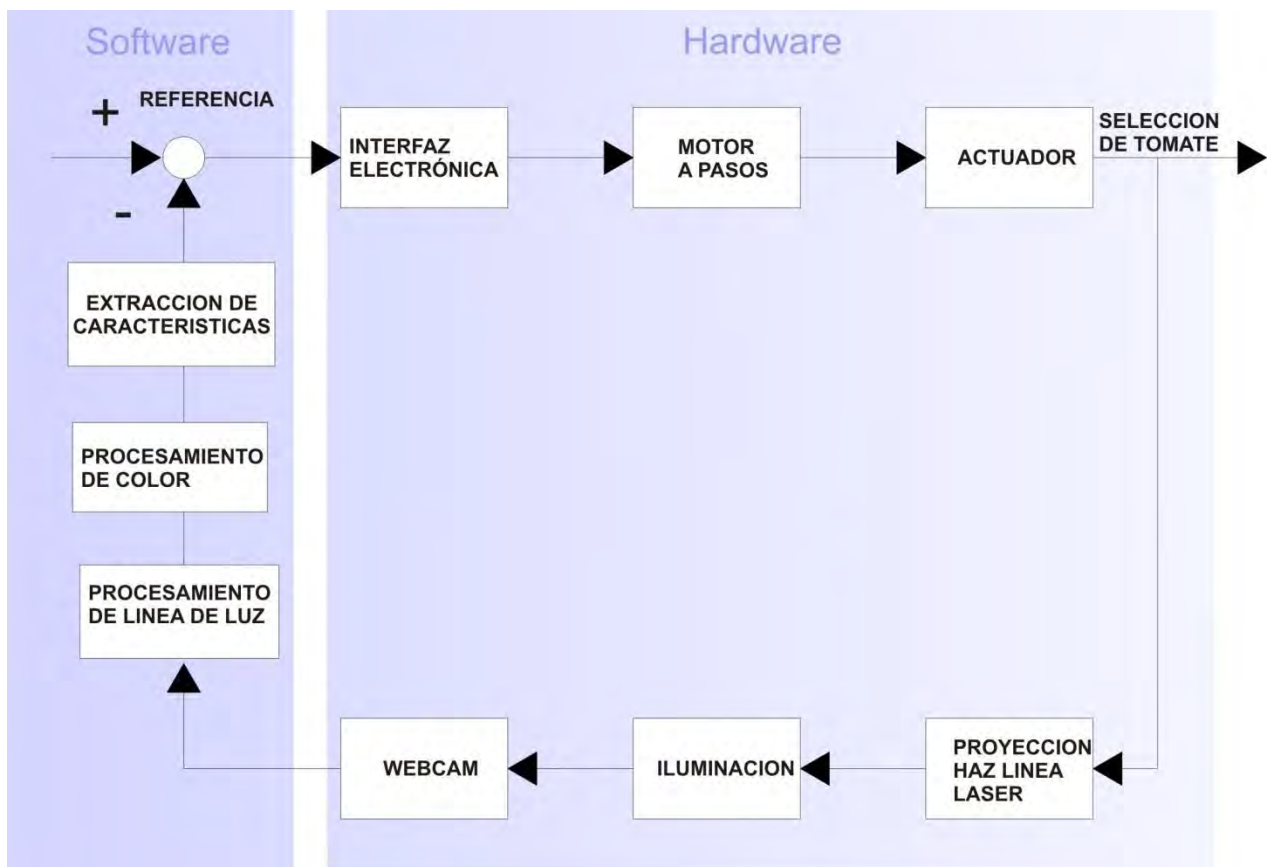
**Figura 2.1.** Ilustración del prototipo fabricado.

En la figura 2.1 resalta la geometría del sistema de visión, la cual está restringida por las medidas de la caja de iluminación donde se instala.

El sistema optomecatrónico es el prototipo de una línea de clasificación automática de jitomates.

## 2.2 Funcionamiento general del sistema

El sistema consta de dos partes principales: software que se refiere a los algoritmos computacionales empleados, y hardware que se refiere a las partes mecánicas y eléctricas. En la figura 2.2 se muestra el diagrama a bloques del sistema en general. En esta tesis se aborda principalmente la parte del software, la cual controla el hardware.



**Figura 2.2.** Diagrama a bloques de los elementos del sistema de clasificación automática.

El diagrama anterior se explica partiendo de la referencia y siguiendo el orden de las flechas. La referencia son los valores de la norma para tamaño, forma y color del tomate, que se introducen en el software para realizar la selección. Dicha referencia se compara con la información capturada por la webcam, y como resultado, la computadora envía ciertos valores a la interfaz electrónica, la cual controlará la posición angular del motor a pasos y el disparo del actuador cuando el motor llega a la posición establecida. De esta forma el tomate en cuestión, es colocado en el sitio angular correspondiente, es decir, se realiza la clasificación.

La proyección de la línea de luz con un diodo laser y la iluminación, hacen posible la extracción del color, tamaño y forma del tomate a través de la webcam que captura las imágenes en tiempo real. De esta manera, los elementos de la figura 2.2 forman un lazo de control cerrado, donde la cámara realiza la realimentación. Dichos elementos se describen de manera indistinta a lo largo de este capítulo, con mayor énfasis en los que forman el software, es decir, el sistema de visión.

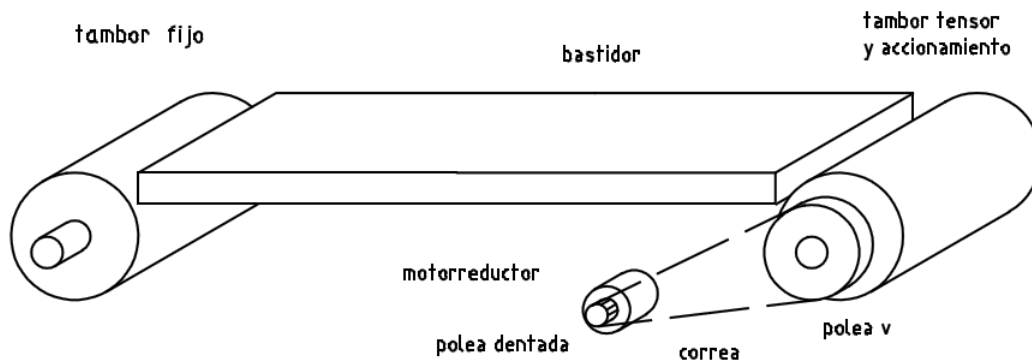
### **2.3 Aspectos mecánicos y eléctricos del sistema**

Los requerimientos de operación de la banda transportadora mostrada en la figura 2.1, son mínimos por ser un prototipo y por la carga mínima que soporta. En la figura 2.3 se observan los elementos relacionados con la banda transportadora, los cuales tienen las siguientes características:

- Longitud de la banda 90 cm.
- Ancho de la banda 10 cm.
- Carga máxima de tomates 100 gramos.
- La banda se apoya sobre un bastidor de plástico.
- Correa dentada de plástico reforzado.
- Banda de tela con plástico de color negro.
- Inclinación 0 grados.
- Torque del motorreductor 1 Nm.
- Velocidad de la banda .3 m/s.

- Tambores de Nymalid sin rodamientos.
- Polea tipo V para transmitir potencia al tambor de accionamiento.
- Polea dentada del motorreductor.

La banda transportadora cubierta por la caja de iluminación, se montan sobre un soporte de acero de 14 cm de alto por 40 cm de largo, como se observa en la figura 2.1.



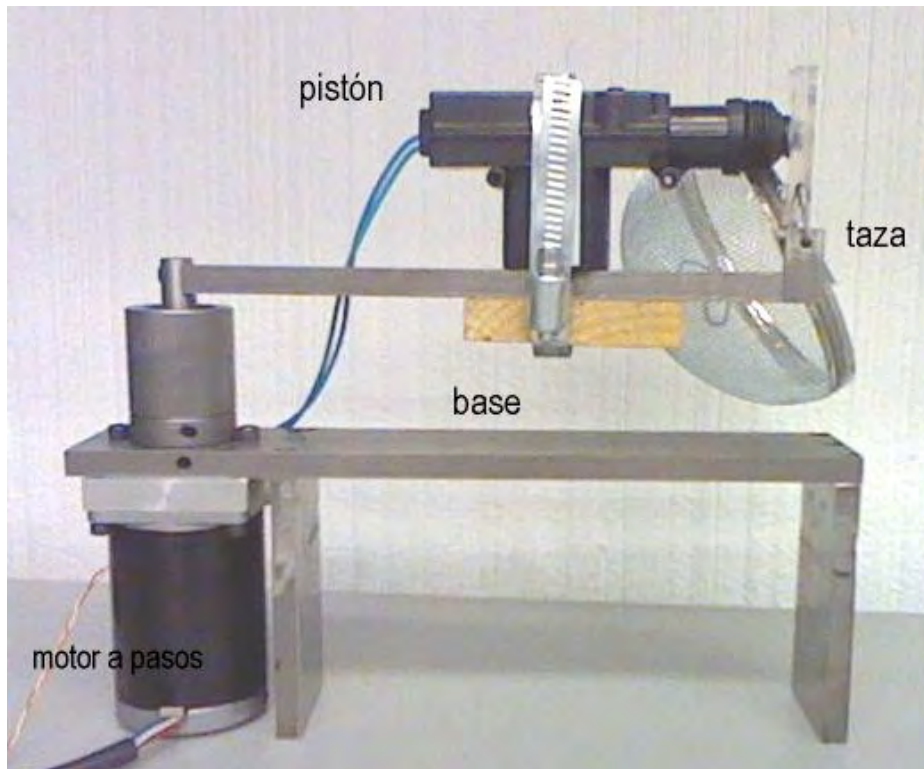
**Figura 2.3.** Elementos relacionados con la banda transportadora.

El mecanismo rotatorio basado en motor a pasos se observa en la figura 2.4, el cual está ensamblado al soporte como se muestra en la figura 2.1. El requerimiento más importante del mecanismo, es el torque del motor capaz de mover el brazo de acero con el recipiente y el tomate dentro.

Experimentalmente, la masa del brazo con el recipiente y un tomate fue de 500 gramos, por lo que el peso es  $W = (9.8 \text{ m/s}^2) \cdot 0.5 \text{ kg} = 4.9 \text{ N}$ . Además el brazo tiene una longitud de .3 m, por lo que el momento respecto del centro de rotación es de  $M = Wd = 1.47 \text{ Nm}$ . Por tanto, se escogió un motor a pasos con las siguientes especificaciones.

- Voltaje nominal: 2 V.
- Corriente: 3 A.
- Tamaño de paso: 1.8 grados.
- Cables: 6.
- Serie Nema: 23.
- Peso: 500 gramos.
- Torque: 2 Nm.





**Figura 2.4.** Mecanismo rotatorio basado en motor a pasos.

El pistón que voltea el recipiente para acomodar los tomates, tiene las siguientes especificaciones:

- Alimentación: 12Vcc.
- Fuerza de desplazamiento: hasta 2.5 kg.
- Distancia de desplazamiento: 1.9 cm.
- Tiempo de vida: hasta 100,000 operaciones.
- Dimensiones: 16x6x3 cm.
- Peso: 130 g.

Luego, la interfaz electrónica que comunica la computadora con el motor a pasos y el actuador, es decir el pistón; debe cubrir las necesidades de corriente y voltaje mencionadas, así como la sincronización del sistema.

## 2. Descripción del sistema optomecánico

En la figura 2.5 se muestra el esquema de la interfaz electrónica, encargada de llevar a cabo las instrucciones que envía la computadora en el proceso de selección. Ahí resalta la presencia del microcontrolador Pic16f84a, el cual es barato y suficiente para interpretar el protocolo RS-232 de la computadora y satisfacer los requerimientos del sistema.

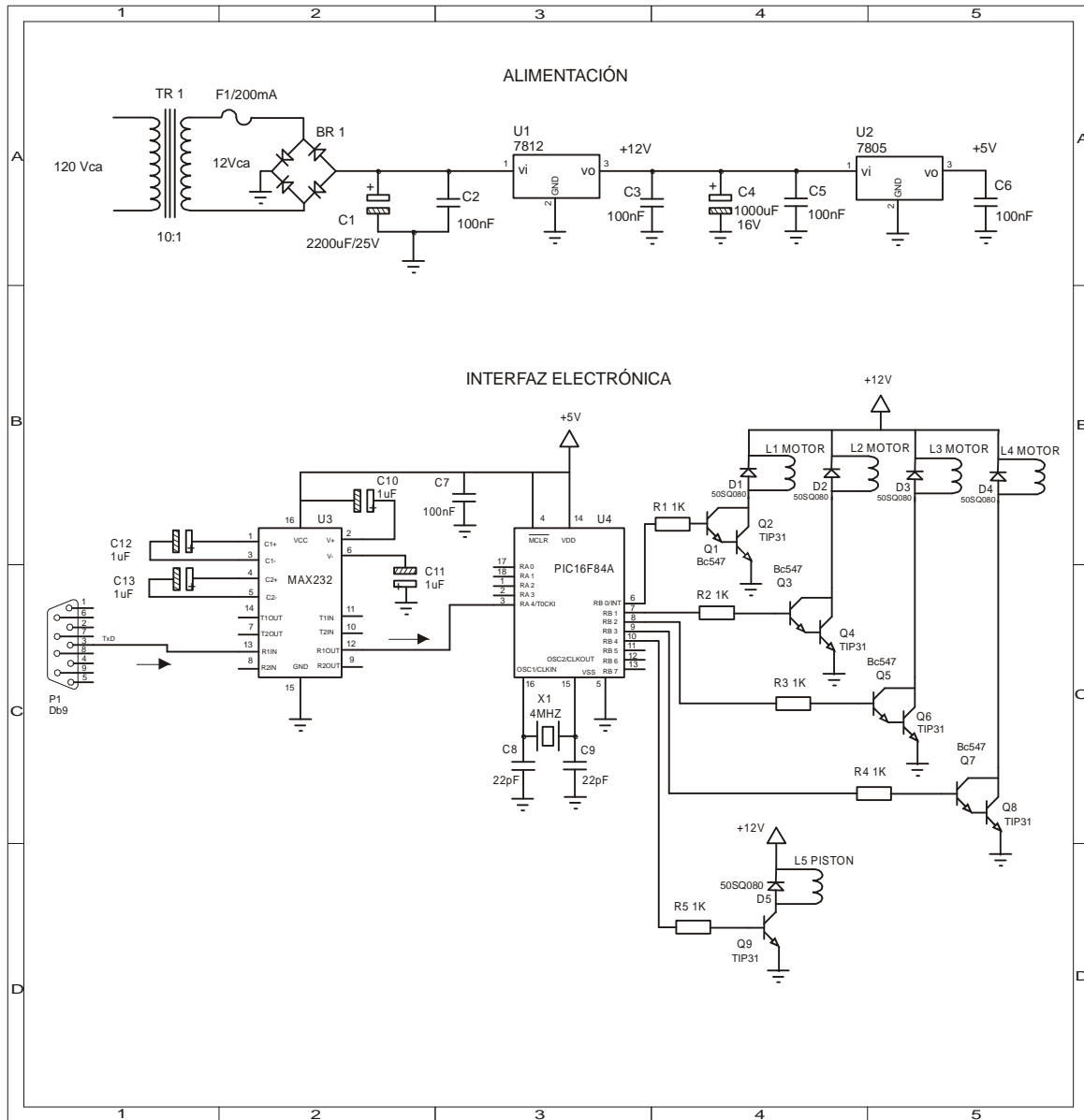
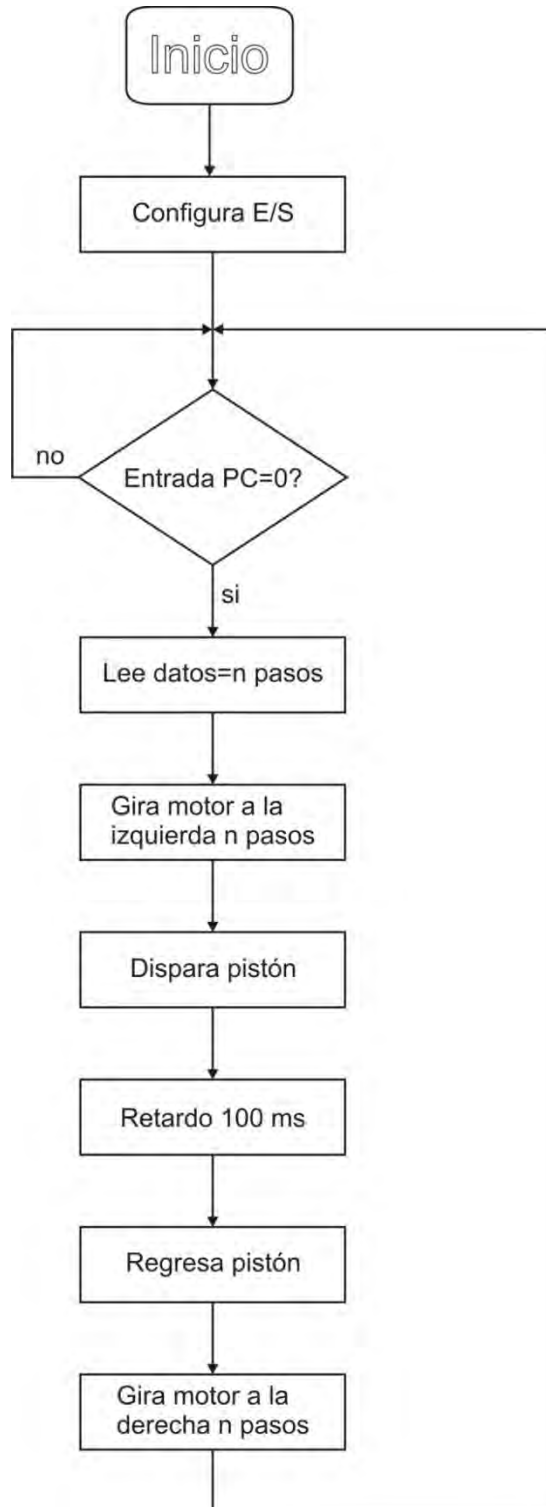


Figura 2.5. Esquema da la interfaz electrónica.

El diagrama de flujo de la figura 2.6 representa el algoritmo llevado a cabo en el microcontrolador, donde las instrucciones se ejecutan secuencialmente.



**Figura 2.6.** Diagrama de flujo del algoritmo llevado a cabo en el microcontrolador.

---

## 2.4 Muestra de tomate

Se adquirió un lote de 1 kg de tomate en un mercado local, buscando que el lote abarcara distintos grados de madurez y diversos tamaños. El tipo de tomate es alargado de la variedad *saladette* o *elongatum*, analizados inmediatamente después de ser adquiridos.

También se evitaron frutas dañadas o enfermas, pues el propósito de esta investigación solo es selección por tamaño, forma y color. En la figura 2.7 se observa la muestra utilizada.



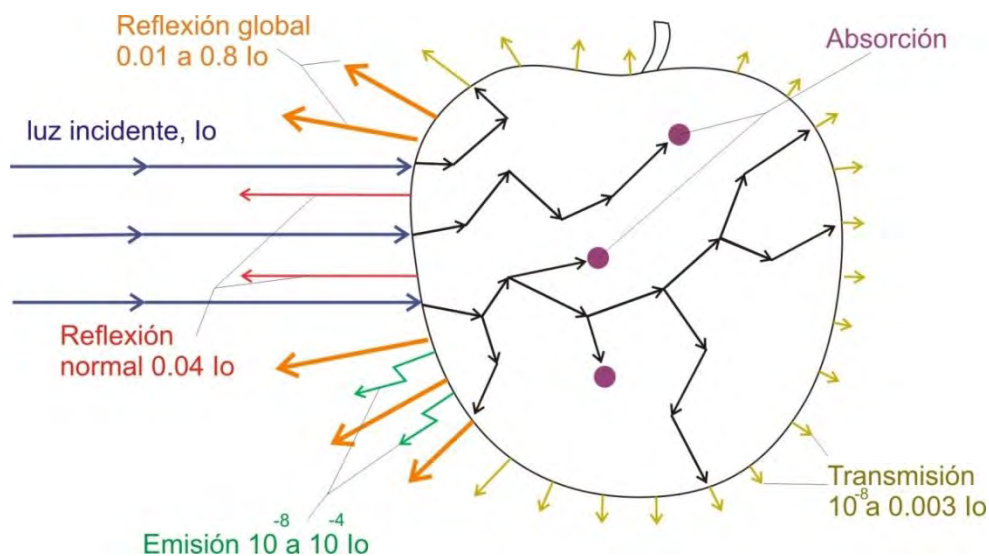
**Figura 2.7.** Muestra de tomate utilizada.

## 2.5 Sistema de iluminación

Los aspectos considerados para seleccionar el tipo y la técnica de iluminación son: resaltar el color de la fruta evitando brillos excesivos en su superficie debido a su forma esferoide, usar sistema de iluminación de bajo costo, y delimitar la superficie iluminada de la banda transportadora. En la figura 2.8 se observa el comportamiento de la luz al incidir sobre una fruta (Valero-Ubierna, 2001), donde la reflexión de la luz es captada por la cámara.

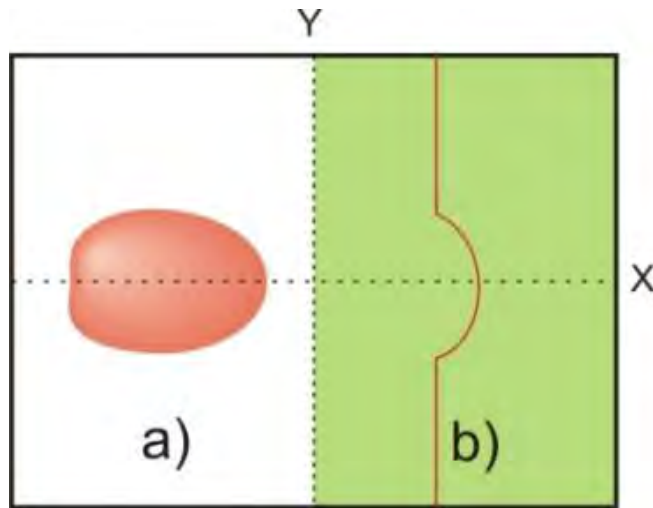
Por tanto de las figuras 2.1 y 2.8, se observa que la imagen capturada es función de: la fuente de iluminación, la forma de aplicar la luz, las características de la superficie del objeto y las relaciones espaciales entre los elementos del sistema de adquisición.

Tomado en cuenta lo anterior, se eligió una lámpara compacta fluorescente, con balastro electrónico, temperatura de color 6500K correspondiente a una iluminación D65 del sistema CIE (*Commission Internationale de L'Eclairage*), a 8W. La lámpara se cubrió con una hoja de papel blanca para disminuir los brillos en la superficie reflejante del tomate, para hacer la luz más difusa y aumentar el contraste de la línea de luz laser y el interior de la caja de iluminación se pintó de color negro mate.



**Figura 2.8.** Interacción de la luz con un fruto.

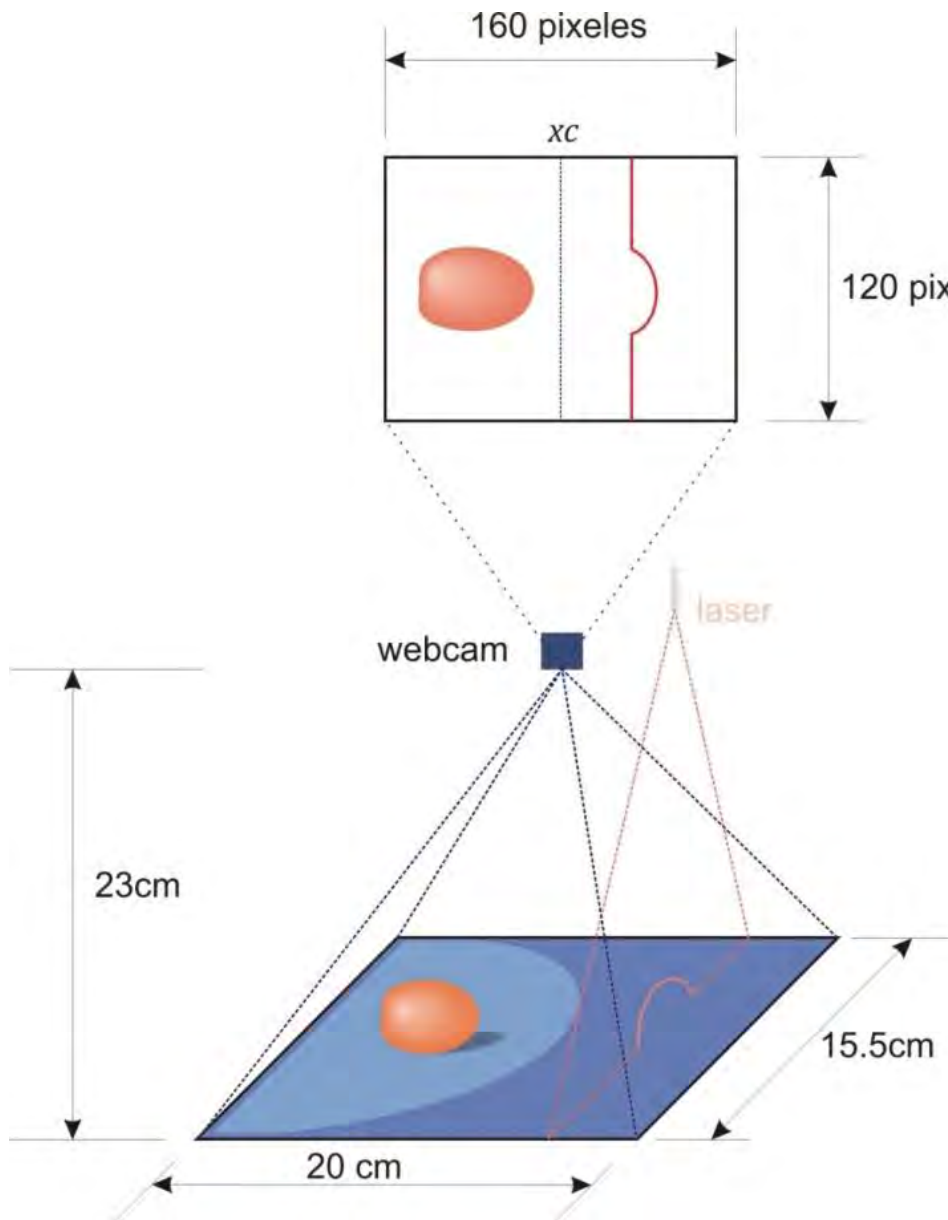
La potencia de la luz de la lámpara sobre la banda transportadora se determinó con un medidor de potencia óptica y fue de .02 mW sin atenuador. También se delimitó el área iluminada de la banda transportadora, como se ve en la figura 2.1, con el propósito de usar una región para la línea de luz laser y otra para detectar el color, forma y tamaño de la fruta, en la misma imagen capturada, como se detalla en la figura 2.9.



**Figura 2.9.** a) Región para detectar color, tamaño y forma, b) región para línea de luz.

Por tanto, la iluminación considerada en este punto se refiere solo a la región de la figura 2.9a, pues la región de la figura 2.9b se utiliza para calcular la altura del tomate usando la línea de luz laser, lo que requiere mínima iluminación en esta área. La iluminación es frontal debido al tamaño reducido de la caja de iluminación, la cámara se sitúa mirando a la fruta en la misma dirección de la luz y recibe la luz reflejada por ella.

El campo de visión de la cámara que se muestra en la figura 2.10, abarca un área de interés de la escena de 155 milímetros de ancho por 200 milímetros de largo. El tamaño de la imagen usado fue de 160x120 píxeles.



**Figura 2.10.** Campo de visión de la cámara.

## Capítulo 3

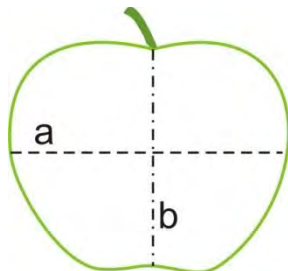
# Detección del tamaño, forma y color del tomate

### 3.1 Especificaciones de forma, color y tamaño para tomate en México

La norma NMX-FF-031-1997-SCFI (Norma mexicana para tomate, 1998), entre otras cosas determina la forma, el color y el tamaño, como se describe enseguida.

#### 3.1.1. Norma de forma para tomate

La forma se determina por el índice obtenido de dividir el diámetro polar entre el diámetro ecuatorial. Para el tipo bola sus valores son menores a la unidad y para el tipo alargado sus valores son mayores a la unidad. En la figura 3.1 se muestran los diámetros que establece la norma NMX-FF-9-1982 (Norma mexicana para diámetro de frutas, 1982).



**Figura 3.1.** Diámetros para una fruta: a) ecuatorial, b) polar.



Los tomates deben presentar la forma típica de la variedad, misma que está en función del tipo de tomate. Al evaluarse la homogeneidad del producto de acuerdo a su forma, los tomates se dividen en bien formados, razonablemente bien formados y malformados.

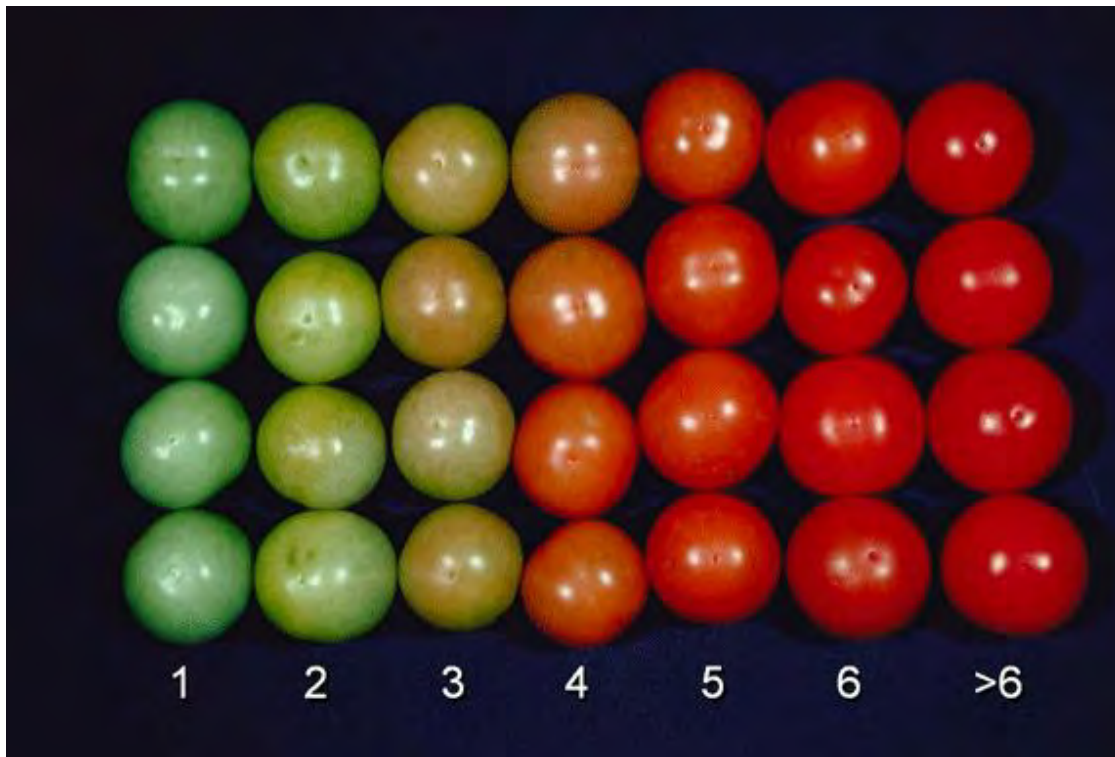
#### *3.1.2 Norma de color para tomate*

La coloración que presente la epidermis o piel del tomate indica su etapa de maduración. El tomate debe presentar cualquiera de los siguientes seis colores, los cuales se verifican visualmente.

1. Verde (Green).- Significa que la piel está completamente verde claro a oscuro.
2. Quebrando o Verde Rosa (Breakers).- Significa que hay una interrupción distinta en el color verde hasta amarillo, rosado o rojo en no más del 10% de la piel.
3. Rayado o Rayando (Turning).- Significa que entre el 10% y 30% de la superficie del tomate muestra un cambio definido del color verde hasta amarillo, rosado o rojo, o una mezcla de éstos.
4. Rosa (Pink).-Significa que entre el 30% y el 60% de la superficie del tomate, muestra un color rosado o rojo.
5. Rojo claro (Light Red).- Significa que entre el 60% y el 90% de la superficie tiene color rosado o rojo.
6. Rojo (Red).- Significa que más del 90 % de la superficie muestra color rojo.

Cualquier tomate que no satisfaga los colores mencionados, debe considerarse como mixto, además hay algunas variedades de tomate de colores poco comunes como anaranjados, amarillos, etc., no sujetos a estas normas.

En la figura 3.2 se muestra una clasificación del estado de madurez para la variedad de tomate Cherry.



**Figura 3.2.** Clasificación del estado de madurez para tomate Cherry.

*Fuente: Postharvest Technology, UC Davis. <http://postharvest.ucdavis.edu>*

En cualquier lote del producto y para todos los grados de calidad, se acepta un 10% de tomates que no reúnan el color especificado, incluyendo el 5% de tomates de color verde, siempre y cuando el color declarado no sea éste.

### *3.1.3 Norma de tamaño para tomate*

El tamaño de los tomates se determina con base en su diámetro ecuatorial, utilizando la norma NMX-FF-009 (Norma mexicana para diametro de frutas, 1982).

Los tomates en sus dos tipos (bola y alargado) se calibran de acuerdo con lo indicado en la tabla 3.1.

<b>a.- Tipo bola</b>				
<b>Tamaño</b>	<b>Diámetro mínimo (1)</b>		<b>Diámetro máximo (2)</b>	
	mm	in	mm	in
Chico	54	(2 1/8)	58	(2 9/32)
Mediano	57	(2 1/4)	64	(2 17/32)
Grande	63	(2 1/2)	71	(2 25/32)
Extra grande	70	(2 3/4)	En adelante	
<b>b.- Tipo alargado</b>				
<b>Tamaño</b>	<b>Diámetro mínimo (1)</b>		<b>Diámetro máximo (2)</b>	
	mm	in	mm	in
Chico	38	(1 1/2)	52	(2 1/16)
Mediano	51	2	60	(2 3/8)
Grande	59	(2 5/16)	71	(2 13/16)
Extra grande	70	(2 3/4)	En adelante	
Notas:				
1) Cuando el tomate en, posición vertical, no puede pasar por una abertura circular del diámetro designado.				
2) Cuando el tomate, en cualquier posición, puede pasar por una abertura circular del diámetro designado.				

**Tabla 3.1.** Clasificación por tamaño del tomate. *Fuente: Norma mexicana para tomate (1998).*

Para los tomates del tipo alargado se consideran las variedades roma que son cerasiformes y piriformes comúnmente llamados “roma”, “pera”, “bulle”, o “guaje” y saladette que es denominado “elongatum”. El tamaño de estas variedades debe ser especificado conforme al diámetro mínimo y diámetro máximo expresados en milímetros, de acuerdo con la tabla 3.1.

En cualquier lote del producto y para todos los grados de calidad, se acepta un 10% de tomates que sean más pequeños que el diámetro mínimo especificado, o más grandes que el diámetro máximo especificado.

## 3.2 Altura del tomate usando línea de luz laser y redes de aproximación para la calibración del sistema de visión

### 3.2.1 Descripción básica del arreglo

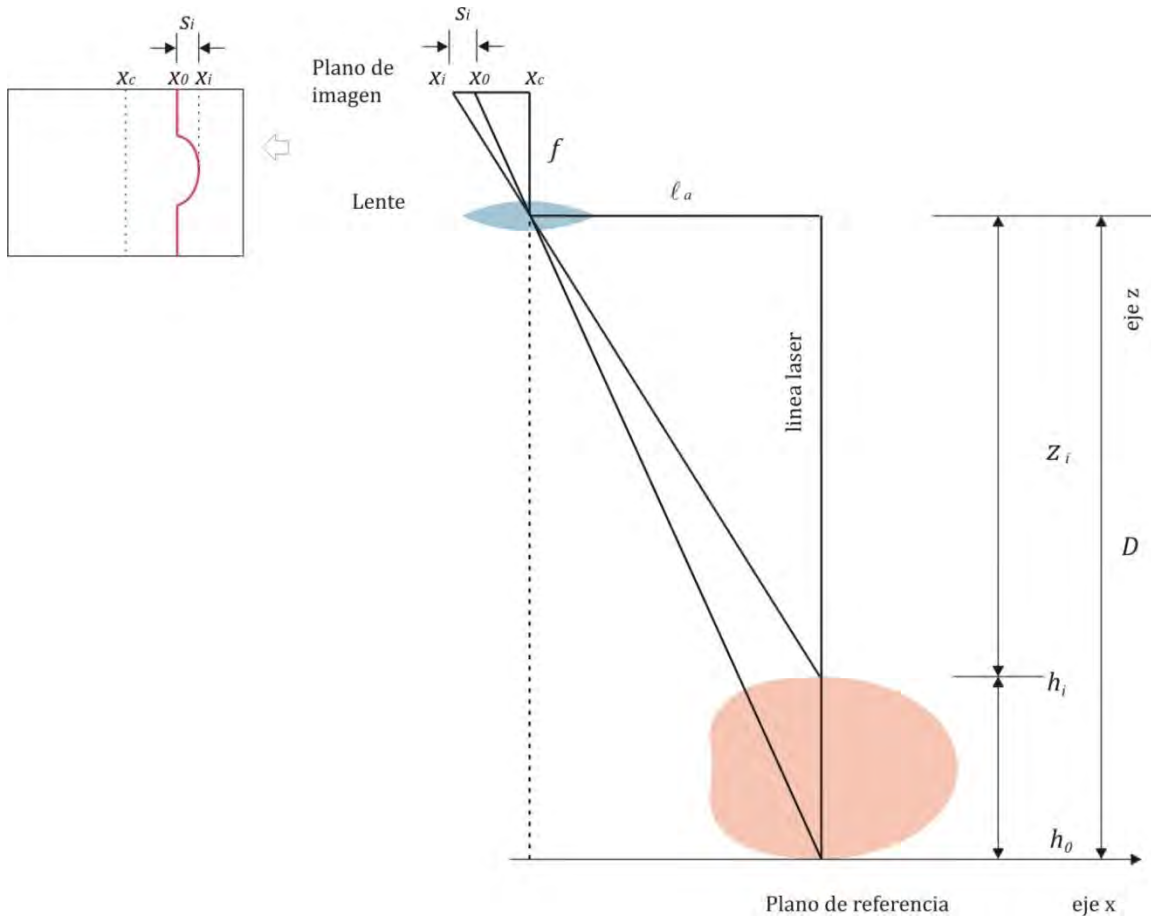
Aplicando la proyección de una línea de luz y usando el modelo de la cámara *pin hole*, la altura de un objeto se relaciona con la posición de la línea en la imagen como se observa en el arreglo de la figura 3.3. En esta geometría, el eje  $x$  está en el plano de referencia y el eje  $z$  perpendicular a dicho plano. El centro de la imagen se denota como  $x_c$ , y  $f$  es la longitud del foco. La distancia entre la línea laser y el eje óptico es  $\ell_a$ . La altura del objeto es  $h_i$ , y  $z_i$  es la distancia de la superficie del objeto a la lente y está determinada por  $z_i = (f \cdot \ell_a) / (x_c - x_i)$ . Sin embargo, al usar este método para calcular la altura, las distancias del arreglo se introducen externamente al sistema computacional, causando errores en la medición.

El Dr. Muñoz-Rodríguez, (2010), propone una técnica que calcula la altura de la superficie de un objeto usando una red Bézier basada en la posición de la línea de luz.

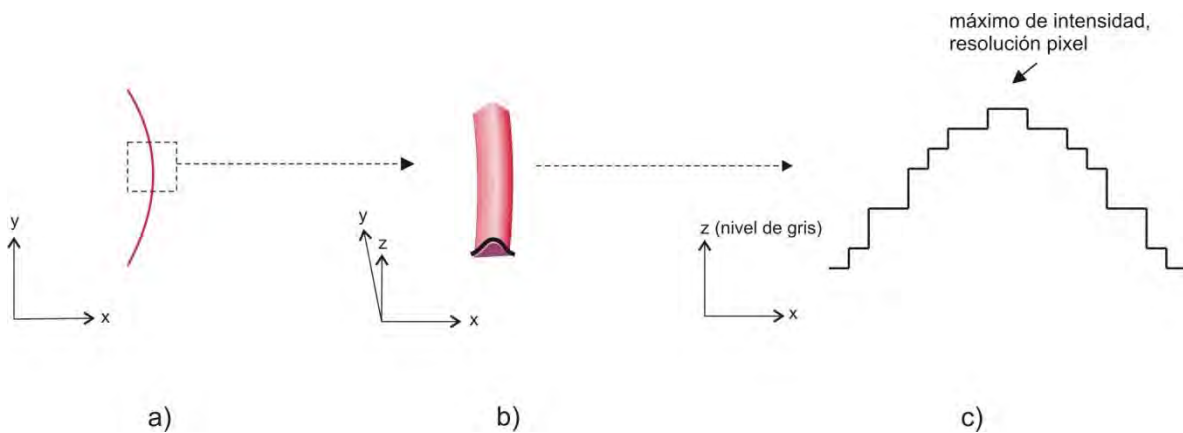
Partiendo de la figura 3.3, cuando la línea de luz se proyecta sobre la superficie  $h_i$ , la posición de la línea en la imagen se mueve de  $x_0$  a  $x_i$ . Por tanto, el desplazamiento  $s_i$  proporcional a la superficie  $h_i$  está dado por

$$s_i = x_0 - x_i \quad (3.1)$$

Para calcular  $x_0$  y  $x_i$ , se mide la máxima intensidad en cada fila de la imagen. Es decir, el máximo de intensidad de la sección transversal de la línea de luz, como se observa en la figura 3.4. La máxima intensidad, atendiendo los requerimientos de video en tiempo real, se puede calcular con la media  $\mu$  que representa el centro de una función gaussiana, dada por la fórmula siguiente:



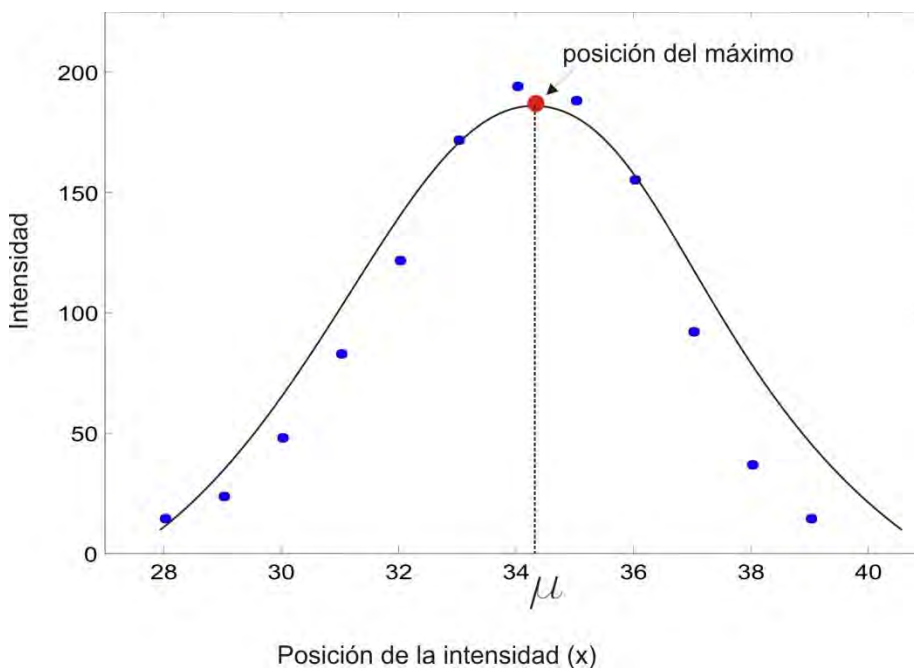
**Figura 3.3.** Arreglo para calcular la altura del objeto.



**Figura 3.4.** a) Línea de luz proyectada por un diodo laser, b) distribución de intensidad de la línea de luz en la dirección transversal, c) pixeles en cada fila de la imagen.

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n z_i x_i}{\sum_{i=1}^n z_i} \quad (3.2)$$

donde  $z_i$  es la intensidad,  $x_i$  la posición de los píxeles y,  $n$  es el número de píxeles. En la figura 3.5 se observa la función de intensidad de la sección transversal de una línea de luz (Muñoz-Rodríguez, 2001), donde se observa la media  $\mu$  que proporciona la posición del valor máximo de intensidad en fracciones de píxel.



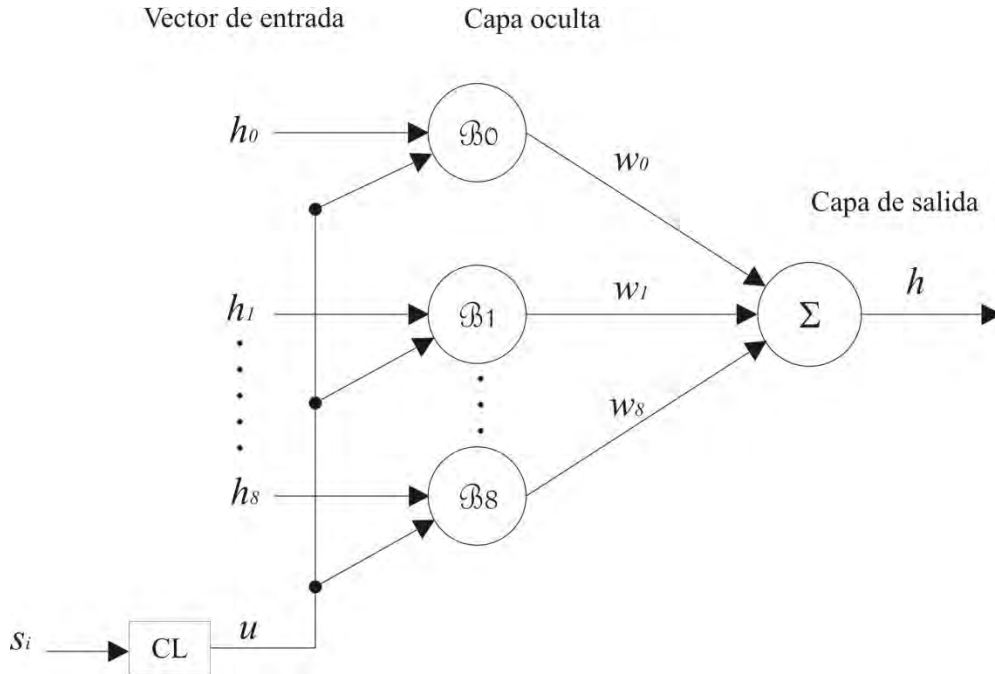
**Figura 3.5.** Posición del máximo en fracciones de píxel, representado por  $\mu$ , en la aproximación gaussiana.

### 3.2.2 Altura del objeto y calibración usando red Bézier

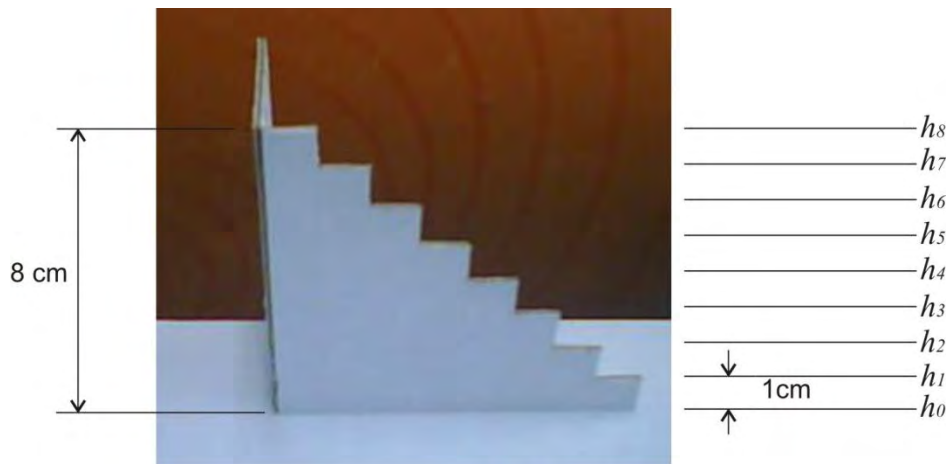
La estructura de la red Bézier propuesta se muestra en la figura 3.6, la cual consiste en un vector de entrada, dos entradas paramétricas, una capa oculta y una capa de salida. El vector de entrada consiste en las alturas conocidas  $h_i$ , el desplazamiento  $s_i$  de la línea y el valor paramétrico  $u$ . Las alturas  $h_i$  se obtienen de un

### 3. Detección del tamaño, forma y color del tomate

patrón de referencia que se muestra en la figura 3.7, dado por ocho escalones, donde cada escalón mide 1 centímetro. Por tanto,  $h_8 = 8$  cm., el cual cubre la altura máxima de cualquier tomate considerado en esta tesis.



**Figura 3.6.** Estructura de la red Bézier



**Figura 3.7.** Patrón de referencia con alturas  $h_i$  conocidas.

Para cada altura  $h_i$ , se calcula su posición  $x_i$  y luego el desplazamiento  $s_i$  usando la ecuación 3.1. La línea de desplazamiento es representada por el valor paramétrico  $u$  por la siguiente combinación lineal (CL)

$$u = a_0 + a_1 s, \quad (3.3)$$

donde  $a_0$  y  $a_1$  son constantes a ser determinadas. La ecuación 3.3 se resuelve usando dos valores  $s_i$  y sus respectivos valores  $u$ , donde  $u \in [0,1]$  para la curva Bézier. Por tanto,  $u = 0$  para  $s_0$ , y  $u=1$  para el desplazamiento  $s_n$ . Estos dos valores se sustituyen en la ecuación 3.3, obteniéndose dos ecuaciones, las cuales se resuelven para encontrar  $a_0$  y  $a_1$ . Por tanto, para cada desplazamiento  $s_i$  se calcula un valor para  $u$  con la ecuación 3.3.

La capa oculta se construye con una función de base Bézier como sigue

$$\mathfrak{B}i = B_i(u) \quad (3.4)$$

donde

$$B_i(u) = \binom{n}{i} u^i (1-u)^{n-i}, \quad \binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!}$$

La capa de salida se obtiene sumando las neuronas, las cuales son multiplicadas por un peso. De esta manera, la respuesta de salida es la dimensión de la altura dada por la siguiente ecuación

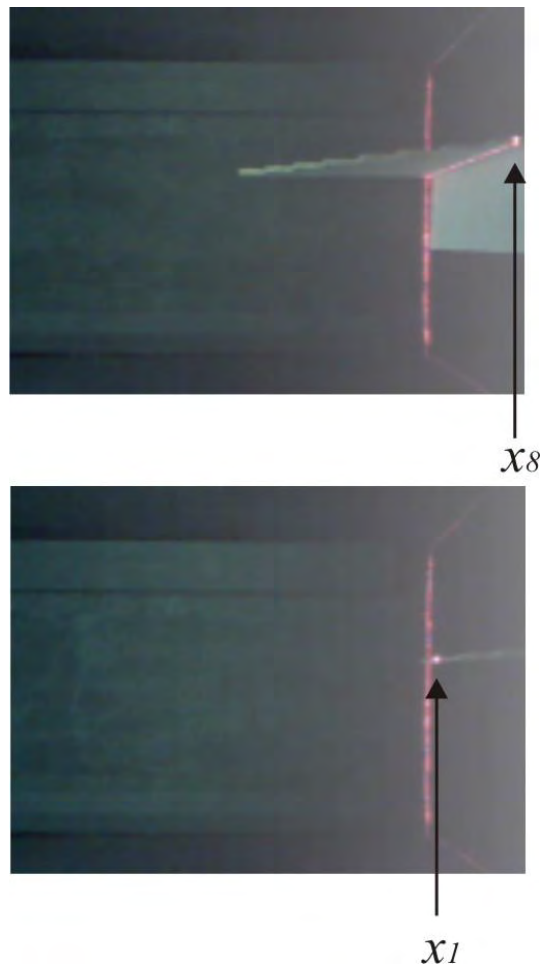
$$\mathfrak{H}(u) = \sum_{i=0}^n w_i h_i B_i(u), \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (3.5)$$

donde  $w_i$  son los pesos,  $h_i$  son las alturas conocidas del patrón de referencia de la figura 3.7,  $B(u)$  es la función de base Bézier de la ecuación 3.4. Para construir la red de la ecuación 3.5 se deberán calcular los pesos  $w_i$  adecuados, esto se logra forzando a la red a producir la alturas  $h_i$  conocidas.



### 3. Detección del tamaño, forma y color del tomate

En la figura 3.8 se muestra la posición de la línea en la imagen para  $h_1 = 10$  mm, y  $h_n = h_8 = 79$  mm, para los que se deberá calcular la posición  $x_i$  y el desplazamiento  $s_i$  correspondiente con la ecuación 3.1.



**Figura 3.8.** Posición de la línea en la imagen para  $h_1 = 10$  mm, y  $h_8 = 79$  mm.

Luego, los datos  $s_i$  son convertidos a los valores  $u$  por medio de la ecuación 3.3 y la altura  $h_i$  y su coordenada  $u$  se sustituyen en la ecuación 3.5 para obtener la salida  $f(u)$ , quedando el siguiente sistema de ecuaciones.

$$\begin{aligned}
 \mathfrak{H}(u = 0) &= h_0 = w_0 h_0 B_0(u) + w_1 h_1 B_1(u) + w_2 h_2 B_2(u) + \dots + w_8 h_8 B_8(u) \\
 \mathfrak{H}(u = s_1 a_1) &= h_1 = w_0 h_0 B_0(u) + w_1 h_1 B_1(u) + w_2 h_2 B_2(u) + \dots + w_8 h_8 B_8(u) \\
 \mathfrak{H}(u = s_2 a_1) &= h_2 = w_0 h_0 B_0(u) + w_1 h_1 B_1(u) + w_2 h_2 B_2(u) + \dots + w_8 h_8 B_8(u) \\
 \mathfrak{H}(u = s_3 a_1) &= h_3 = w_0 h_0 B_0(u) + w_1 h_1 B_1(u) + w_2 h_2 B_2(u) + \dots + w_8 h_8 B_8(u) \\
 \mathfrak{H}(u = s_4 a_1) &= h_4 = w_0 h_0 B_0(u) + w_1 h_1 B_1(u) + w_2 h_2 B_2(u) + \dots + w_8 h_8 B_8(u) \\
 \mathfrak{H}(u = s_5 a_1) &= h_5 = w_0 h_0 B_0(u) + w_1 h_1 B_1(u) + w_2 h_2 B_2(u) + \dots + w_8 h_8 B_8(u) \\
 \mathfrak{H}(u = s_6 a_1) &= h_6 = w_0 h_0 B_0(u) + w_1 h_1 B_1(u) + w_2 h_2 B_2(u) + \dots + w_8 h_8 B_8(u) \\
 \mathfrak{H}(u = s_7 a_1) &= h_7 = w_0 h_0 B_0(u) + w_1 h_1 B_1(u) + w_2 h_2 B_2(u) + \dots + w_8 h_8 B_8(u) \\
 \mathfrak{H}(u = 1) &= h_8 = w_0 h_0 B_0(u) + w_1 h_1 B_1(u) + w_2 h_2 B_2(u) + \dots + w_8 h_8 B_8(u)
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

El sistema lineal de la ecuación 3.6 puede ser representado como

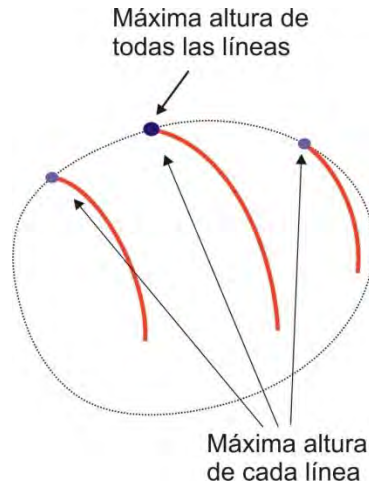
$$\begin{aligned}
 H_0 &= w_0 \beta_0 + w_1 \beta_1 + \dots + w_8 \beta_8 \\
 H_1 &= w_0 \beta_0 + w_1 \beta_1 + \dots + w_8 \beta_8 \\
 &\cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\
 &\cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\
 H_8 &= w_0 \beta_0 + w_1 \beta_1 + \dots + w_8 \beta_8
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

La cual se reescribe en forma de matriz como  $\beta \mathbf{w} = \mathbf{H}$ , obteniéndose,

$$\begin{bmatrix} \beta_0 & \beta_1 & \beta_2 & \dots & \beta_8 \\ \beta_0 & \beta_1 & \beta_2 & \dots & \beta_8 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \beta_0 & \beta_1 & \beta_2 & \dots & \beta_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_0 \\ w_1 \\ \vdots \\ w_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_0 \\ H_1 \\ \vdots \\ H_8 \end{bmatrix} \tag{3.8}$$

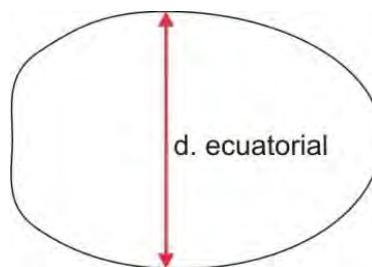
Resolviendo  $\mathbf{w} = \beta^{-1} \mathbf{H}$  se encuentran los valores de  $w_i$ . El resultado de esta red es un modelo que calcula la altura desconocida  $h_i$  del tomate usando el desplazamiento  $s_i$  de la línea de luz proyectada sobre él, donde  $s_i$  se obtiene de la ecuación 3.1. El desplazamiento  $s_i$  se convierte al valor paramétrico  $u$  y se sustituye en la red de la ecuación 3.5.

El movimiento constante de la banda transportadora, provoca que la línea de luz se proyecte en cada región de la fruta, lo que permite realizar un barrido por la línea de la luz, obteniéndose de cada línea su máxima altura y luego de todas esas alturas se extrae la mayor como se observa en la figura 3.9.



**Figura 3.9.** Máxima altura de todas las líneas.

La máxima altura obtenida de todas las líneas, es el diámetro ecuatorial para el tomate tipo *saladette* como se muestra en la figura 3.10; este diámetro ecuatorial obtenido, se comparará con el diámetro ecuatorial que se calcula en el punto 3.5 usando momentos. Luego, el mayor de ambos diámetros, será el que se tome como parámetro de selección.

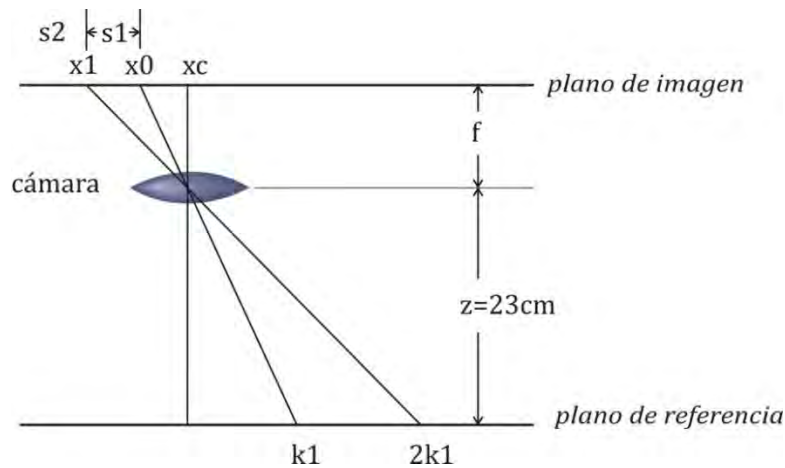


**Figura 3.10.** Diámetro ecuatorial o altura, calculado con la línea de luz para tomate tipo *saladette*.

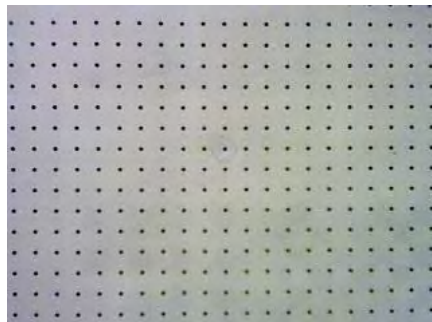
### 3.3 Cálculo de la distorsión radial

Para el cálculo de la distorsión, se usó el modelo de la cámara *pin hole*. Además se supone que la imagen tiene píxeles isotrópicos, que la distorsión no lineal tiene solo una parte radial y que el eje óptico es ortogonal al plano de la imagen.

El procedimiento fue el siguiente. Con la misma geometría que se usó en el punto 3.2, se toma una captura de un patrón, el cual consiste en una hoja blanca donde se imprimieron puntos negros equiespaciados a un centímetro, que se observa en la figura 3.12. Luego se binariza la imagen capturada y se calcula el centroide de cada círculo de la malla, donde  $k_1=1$  cm,  $2k_1=2$  cm, medidos desde el eje óptico al respectivo centroide  $ik_1$  en el eje x, como se muestra en la figura 3.11.



**Figura 3.11.** Geometría del arreglo para calcular la distorsión.



**Figura 3.12.** Captura del patrón de referencia.

En el plano de la imagen, la distancia de  $x_0$  a  $x_1$  medida en pixeles es,

$$s_1 = x_0 - x_1 \quad (3.9)$$

donde  $x_0$  y  $x_1$  son las posiciones distorsionadas de  $k_1$  y  $2k_1$  respectivamente,  $x_c$  es el centro de la imagen y  $f$  es el foco de la cámara. De manera que, la distancia sin distorsión es

$$S_1 = X_0 - X_1 \quad (3.10)$$

donde,

$$X_0 = x_0 \quad (3.11)$$

$$X_1 = x_1 - \delta_1 \quad (3.12)$$

y  $\delta_1$  es la distorsión de  $x_1$ . Sustituyendo (3.11) y (3.12) en (3.10) se tiene,

$$S_1 = x_0 - x_1 + \delta_1 \quad (3.13)$$

luego, generalizando para la  $i$ -ésima posición,

$$S_i = x_0 - x_i + \delta_i \quad (3.14)$$

sin embargo  $S_1=1S_1$ ,  $S_2=2S_1$ , por lo que  $S_i=iS_1$ , entonces,

$$iS_1 = x_0 - x_i + \delta_i \quad (3.15)$$

despejando  $\delta_i$  se tiene

$$\delta_i = iS_1 + x_i - x_0 \quad (3.16)$$

asumiendo que  $S_1 \cong s_1$  cerca del eje óptico, sustituimos (3.9) en (3.16),

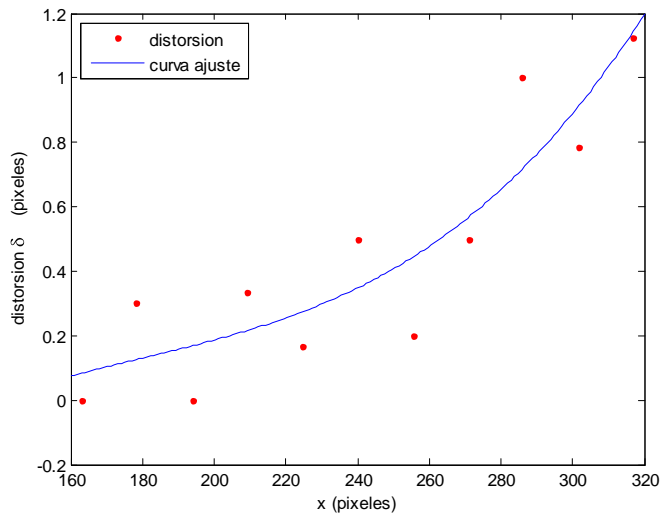
$$\delta_i = i(x_0 - x_1) + x_i - x_0 \quad (3.17)$$

Luego, se implementa la ecuación (3.17) usando la imagen de la figura 3.12. Posteriormente se busca la ecuación polinomial de orden dos que mejor se ajusta a las mediciones, obteniéndose la ecuación (3.18), donde  $x$  es la posición del pixel en el eje  $x$  de la imagen a partir del centro.

$$distorsión(x) = 4.4923^{-4}x^2 - 0.15x \quad (3.18)$$

En la figura 3.13 se muestra la distorsión en los puntos obtenida con la ecuación 3.17, y la curva de distorsión de la ecuación 3.18.

Como se observa en dicha figura, la distorsión de barril llega solo a 1.1 pixeles en el extremo de la imagen, luego con la ecuación encontrada se corrige la distorsión, tomando el coeficiente del término cuadrático, el cual se generaliza para el radio  $r$ .



**Figura 3.13.** Gráfica de la distorsión en el eje x.

Para corregir la distorsión, se mide la distancia en pixeles de cualquier punto de la imagen a partir del centro y se le agrega la distorsión  $\delta_i$  calculada con la ecuación 3.18, de esta forma queda corregida la distorsión radial.

### 3.4 Preparación de la imagen para calcular color y tamaño del tomate

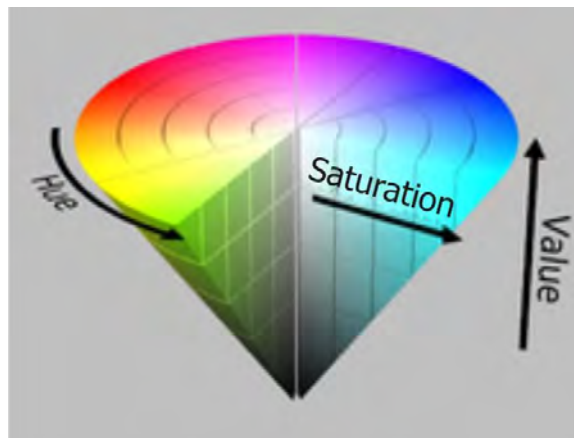
Antes de calcular el color y el diámetro de la fruta, se realiza un procesado a la imagen, el cual consta de las siguientes operaciones: umbralización, aplicación de cerradura y apertura morfológicas, obtención del contorno, y eliminación de reflejos; las cuales se exponen enseguida.

### 3.4.1 Umbralización

Un factor que apoya el proceso de umbralización de la imagen, es el color negro de la banda transportadora. La imagen binaria, la cual es el área de interés que se busca, se obtiene al aplicar un umbral a la imagen del componente V del modelo de color HSV, mostrado en la figura 3.14. El modelo HSV (*Hue, Saturation, Value*) también llamado HSB (*Hue, Saturation, Brightness*) se trata de una transformación no lineal del modelo de color RGB, y se presenta en coordenadas cilíndricas. En el modelo HSV, Hue es el tono o matiz y se representa como un grado de ángulo cuyos valores van de 0 a 360 grados, *Saturation* es el grado de pureza o saturación de un color y va de 0 a 100% como se muestra en la figura 3.14, *Value* representa el brillo del color de 0 a 100% y está dado por

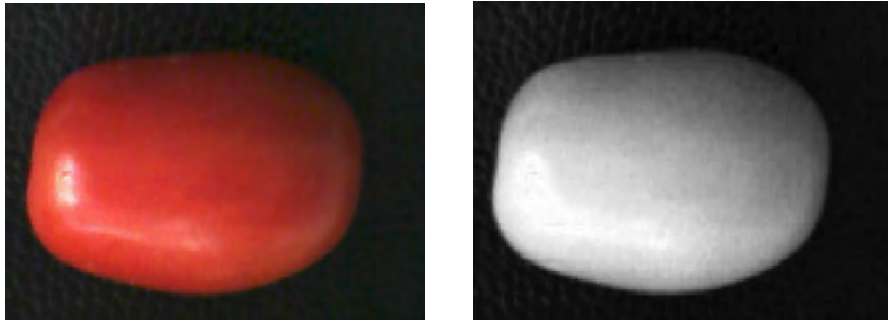
$$V = \max(R, G, B) \quad (3.19)$$

el cual es el valor máximo de los componentes R,G,B.



**Figura 3.14.** Cono de colores del modelo de color HSV.

La razón de usar el componente V del modelo HSV, es que muestra mayor contraste con el oscuro de la banda transportadora, que la imagen en grises. En la figura 3.15 se muestra el componente V de 8 bits para una imagen de tomate.



**Figura 3.15.** a) Imagen original, b) Componente V del modelo de color HSV.

Umbralizar es transformar una imagen de entrada  $f$  a una imagen binaria (segmentada)  $g$  de salida (Sonka et al., 2008) como sigue:

$$\begin{aligned} g(i, j) &= 1 \text{ para } f(i, j) \geq T, \\ g(i, j) &= 0 \text{ para } f(i, j) < T, \end{aligned} \quad (3.20)$$

donde  $T$  es el umbral,  $g(i, j) = 1$  para los pixeles del objeto, y  $g(i, j) = 0$  para los pixeles del fondo negro. En la figura 3.16 se muestra la imagen binaria, al aplicar un umbral de 15 al componente V de la figura 3.15b.



**Figura 3.16.** Imagen binaria del componente V de la figura 3.15b.

### 3.4.2 Aplicación de apertura morfológica

Debido al ruido en la banda, hay algunos puntos blancos que no pertenecen al objeto, los cuales se eliminan al aplicar apertura a la imagen (Muñoz-Rodríguez y Rodríguez-Vera, 2002).



La apertura es una erosión seguida por una dilatación, (Pajares-Martinzans y de la Cruz-García, 2008). La dilatación es una transformación morfológica que combina dos conjuntos, usando suma vectorial (o suma de Minkowski, es decir,  $(a, b) + (c, d) = (a + c, b + d)$ ). La dilatación  $X \oplus B$  es el conjunto de puntos de todas las posibles sumas vectoriales, de pares de elementos de cada conjunto  $X$  y  $B$ , y está dada por:

$$X \oplus B = \{p \in E^2 : p = x + b, x \in X \text{ y } b \in B\} \quad (3.21)$$

donde  $X$  es una imagen binaria,  $B$  el elemento estructural y  $E^2$  el espacio euclidiano 2D. La erosión combina dos conjuntos usando sustracción de vectores, y es el dual del operador de dilatación. La erosión está dada por:

$$X \ominus B = \{p \in E^2 : p + b \in X \text{ para cada } b \in B\} \quad (3.22)$$

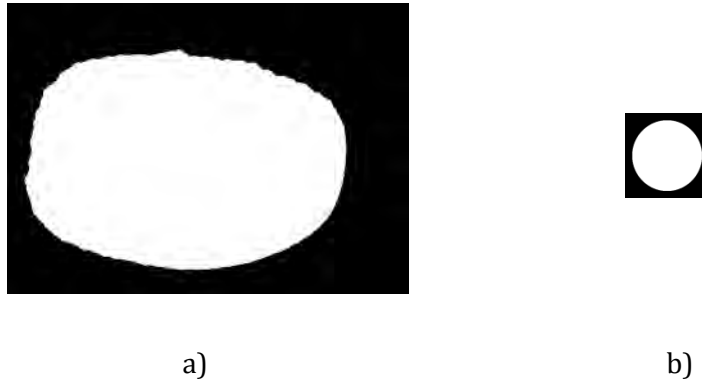
el resultado de la erosión está definido por los puntos  $p$  para los cuales todos los posibles  $p + b$  están en  $X$ .

Luego la apertura está dada por:

$$X \circ B = (X \ominus B) \oplus B \quad (3.23)$$

Aplicando apertura a la imagen binarizada con un estructurante adecuado, se elimina el ruido quedando solo el área de interés eliminando los puntos blancos del fondo negro, como se aprecia en la figura 3.17.

De esta manera, el área de la imagen binaria resultante, puede ser usada para calcular algunos descriptores de la fruta como área, diámetro y forma.



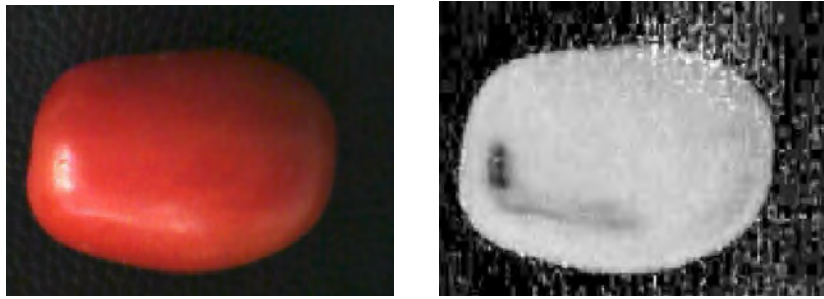
**Figura 3.17.** a) Imagen resultante al aplicar apertura a la imagen de la figura 3.16, b) estructurante usado de 9x9 pixeles.

#### 3.4.4 Eliminación de reflejos de luz

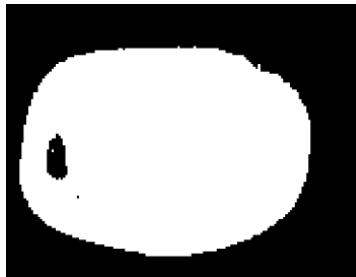
Para evitar los reflejos en la superficie del tomate, que alteran la cuantificación del color en la región binarizada, se utiliza la componente de saturación del modelo de color HSV. La saturación, como se muestra en la figura 3.14, es el grado en que el color puro está degradado por el blanco. Por tanto, se puede aplicar un umbral a la componente de saturación, pues el color en los reflejos de la superficie tiene poca saturación. La saturación está dada por

$$S = \begin{cases} 0 & , \text{si } \max = 0 \\ 1 - \frac{\min(R, G, B)}{\max(R, G, B)} & , \text{en otro caso} \end{cases} \quad (3.24)$$

donde *max* y *min* son los valores máximo y mínimo de los componentes RGB. En la figura 3.18b se observa el componente de saturación, donde los reflejos de la superficie presentan niveles más bajos de intensidad. Luego, se une la imagen de la figura 3.17 con la componente de saturación umbralizada, quedando el área resultante mostrada en la figura 3.19, la cual se utiliza para medir el color en la fruta.



**Figura 3.18.** a) Imagen original, b) componente de saturación del modelo HSV.



**Figura 3.19.** Área resultante al aplicar cerradura- apertura y eliminación de reflejos.

### 3.5 Determinación del diámetro ecuatorial y polar del tomate

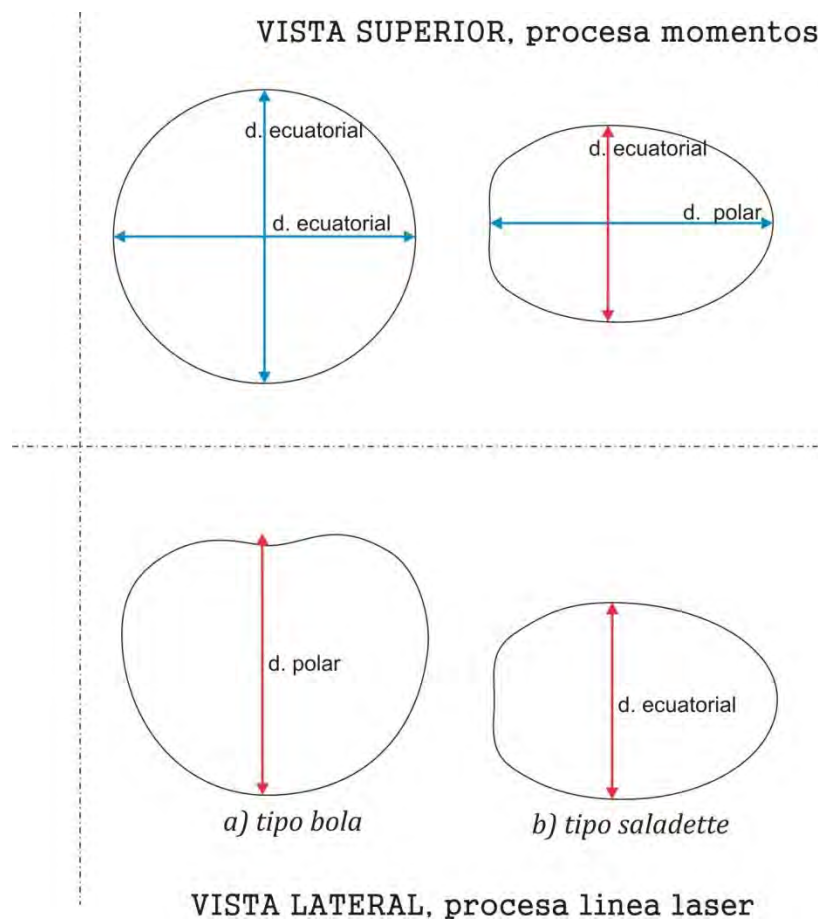
En la Norma mexicana para tomate, (1998) descrita en la tabla 3.1, el tamaño se determina por su diámetro ecuatorial, como se describe en el punto 3.1.3, y la forma se calcula al dividir el diámetro polar entre el diámetro ecuatorial como se explica en 3.1.1, ambos diámetros mostrados en la figura 3.1.

El diámetro ecuatorial calculado en este punto, se compara con la altura calculada con la línea de luz laser, el mayor de los dos, será el diámetro ecuatorial definitivo. En la figura 3.20 se muestran los diámetros considerados en esta tesis.

### 3. Detección del tamaño, forma y color del tomate

La medida de los diámetros mostrados en la vista superior de la figura 3.20, sin importar la rotación de la fruta sobre la banda, se puede calcular obteniendo los momentos de la región binarizada de una imagen o de su contorno, aunque es mejor obtenerlos de la región, pues toma en cuenta más píxeles que en el contorno.

Los momentos son cantidades numéricas que se obtienen de una imagen, tomando en cuenta todos los píxeles que la componen, generalmente representan las características geométricas de la imagen (Muñoz-Rodríguez, Asundi y Rodríguez-Vera, 2005). La interpretación física del momento se puede obtener de la mecánica newtoniana, donde el momento de una fuerza respecto de un punto da a conocer en qué medida existe capacidad en una fuerza para causar la rotación de un cuerpo alrededor de un eje que pase por dicho punto.



**Figura 3.20.** Diámetros del tomate.

Para una función continua bidimensional  $f(x, y)$ , los momentos geométricos u ordinarios de orden  $(p + q)$  están definidos por:

$$m_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x^p y^q f(x, y) dx dy \quad (3.25)$$

donde  $p, q = 0, 1, 2, \dots$

En el caso de imágenes digitales la ecuación anterior se convierte en

$$m_{pq} = \sum_{x=0}^N \sum_{y=0}^M x^p y^q f(x, y) \quad (3.26)$$

donde  $f(x, y)$  es la intensidad del pixel  $(x, y)$  en una región de la imagen.

Los momentos centrales, llamados así porque están referidos al centro de gravedad  $(\bar{x}, \bar{y})$  de una región, son invariantes a traslaciones pues permiten reconocer figuras dentro de una imagen digital, independientemente de su posición y se pueden expresar como:

$$\mu_{pq} = \sum_{x=0}^N \sum_{y=0}^M (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y) \quad (3.27)$$

donde

$$\bar{x} = \frac{m_{10}}{m_{00}}, \quad \bar{y} = \frac{m_{01}}{m_{00}}, \quad (3.28)$$

$\bar{x}$  y  $\bar{y}$  son las coordenadas del centroide de una región y  $m_{00}$  es el área.

Los momentos centrales (González y Woods, 1996) hasta el orden 2 son:

$$\mu_{00} = \sum_{x=0}^N \sum_{y=0}^M (x - \bar{x})^0 (y - \bar{y})^0 f(x, y) = m_{00} \quad (3.29)$$

$$\mu_{10} = \sum_{x=0}^N \sum_{y=0}^M (x - \bar{x})^1 (y - \bar{y})^0 f(x, y) = m_{10} - \frac{m_{10}}{m_{00}} (m_{00}) = 0 \quad (3.30)$$

$$\mu_{01} = \sum_{x=0}^N \sum_{y=0}^M (x - \bar{x})^0 (y - \bar{y})^1 f(x, y) = m_{01} - \frac{m_{01}}{m_{00}} (m_{00}) = 0 \quad (3.31)$$

$$\mu_{11} = \sum_{x=0}^N \sum_{y=0}^M (x - \bar{x})^1 (y - \bar{y})^1 f(x, y) = m_{11} - \frac{m_{10}m_{01}}{m_{00}} = m_{11} - \bar{y}m_{10} \quad (3.32)$$

$$\begin{aligned} \mu_{20} &= \sum_{x=0}^N \sum_{y=0}^M (x - \bar{x})^2 (y - \bar{y})^0 f(x, y) = m_{20} - \frac{2m_{10}^2}{m_{00}} + \frac{m_{10}^2}{m_{00}} = m_{20} - \frac{m_{10}^2}{m_{00}} \\ &= m_{20} - \bar{x}m_{10} \end{aligned} \quad (3.33)$$

$$\mu_{02} = \sum_{x=0}^N \sum_{y=0}^M (x - \bar{x})^0 (y - \bar{y})^2 f(x, y) = m_{02} - \frac{2m_{01}^2}{m_{00}} = m_{02} - \bar{y}m_{01} \quad (3.34)$$

Para que sean invariantes a la escala de los objetos, los momentos centrales se normalizan como sigue,

$$\eta_{pq} = \frac{\mu_{pq}}{\mu_{00}^\gamma} \quad (3.35)$$

donde  $\gamma = \frac{p+q}{2} + 1$ .

Al normalizar los tres momentos centrales o de inercia, de segundo orden  $\mu_{20}$ ,  $\mu_{02}$  y  $\mu_{11}$  queda:

$$\eta_{11} = \frac{\mu_{11}}{\mu_{00}^2} \quad (3.36)$$

$$\eta_{20} = \frac{\mu_{20}}{\mu_{00}^2} \quad (3.37)$$

$$\eta_{02} = \frac{\mu_{02}}{\mu_{00}^2} \quad (3.38)$$

Los cuales miden la dispersión o varianza de los píxeles en el sentido diagonal, horizontal, vertical, respectivamente, respecto del centroide  $(\bar{x}, \bar{y})$ . Por tanto, el problema de encontrar el diámetro ecuatorial del tomate, puede abordarse desde un punto de vista geométrico (Peña, 2002), donde los píxeles de la imagen binarizada se sitúan en la imagen siguiendo una elipse, para un tomate *saladette*, el diámetro polar corresponde al eje mayor de dicha elipse y el diámetro ecuatorial al eje menor de la elipse. El problema se puede resolver aplicando análisis de componentes principales, el cual es una transformación lineal que escoge un nuevo sistema de coordenadas para el conjunto original de datos, en el cual la varianza de mayor tamaño del nuevo sistema, es captada en el primer eje llamado primer componente principal, la segunda varianza más grande en el segundo eje y así sucesivamente.

La técnica mencionada analiza la estructura de la matriz de covarianza de los datos, donde la covarianza mide la dependencia entre dos o más variables. Para una imagen, con dos variables  $x, y$ , la matriz de covarianza queda de la siguiente manera:

$$V = \begin{pmatrix} cov(x, x) & cov(x, y) \\ cov(y, x) & cov(y, y) \end{pmatrix} \quad (3.39)$$

donde

$$cov(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x - \bar{x})(y - \bar{y}) \quad (3.40)$$

$$cov(x, x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x - \bar{x})(x - \bar{x}) \quad (3.41)$$

$$cov(y, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y - \bar{y})(y - \bar{y}) \quad (3.42)$$

que coinciden con los momentos de segundo orden de las ecuaciones 3.36, 3.37 y 3.39 respectivamente (Pratt, 2007), por tanto, la matriz de covarianza queda como se muestra enseguida.

$$C = \begin{pmatrix} \eta_{20} & \eta_{11} \\ \eta_{11} & \eta_{02} \end{pmatrix} \quad (3.43)$$

dado que la matriz de covarianza  $C$  es cuadrada y simétrica respecto de la diagonal principal, se puede calcular una base ortogonal encontrando sus valores y vectores propios. De la definición de vectores y valores propios, un número real  $\lambda$  se dice que es un valor propio o un eigenvalor o un valor característico o un autovalor de la matriz de covarianza  $C$  si existe un vector  $\mathbf{v}$  diferente del vector cero, es decir:

$$C\mathbf{v} = \lambda\mathbf{v}, \quad \mathbf{v} \neq 0. \quad (3.44)$$

O sea, un vector que al transformarlo mediante la multiplicación por  $C$ , mantiene su dirección, y cambia tal vez su magnitud o sentido. El vector  $\mathbf{v}$  se llama vector propio asociado al valor propio  $\lambda$ . La matriz cuadrada de transformación  $n \times n$  puede tener -



solo  $n$  eigenvectores, por tanto  $C$  tiene dos vectores propios. Estos dos autovectores son ortogonales el uno del otro.

El término derecho de la ecuación 3.44 queda igual si se multiplica por la matriz identidad:

$$\lambda \mathbf{v} = I\lambda \mathbf{v} \quad (3.45)$$

entonces la ecuación 3.44 queda como

$$C\mathbf{v} = I\lambda \mathbf{v} \quad (3.46)$$

luego

$$C\mathbf{v} - I\lambda \mathbf{v} = 0 \quad (3.47)$$

$$(C - \lambda I)\mathbf{v} = 0 \quad (3.48)$$

la cual es la ecuación de eigenvectores.

Por el teorema de Roché-Frobenius, para que el sistema tenga una solución distinta de 0, la matriz  $(C - \lambda I)$  tiene que ser singular.

Lo anterior implica que el determinante debe ser igual a cero:

$$|C - \lambda I| = 0 \quad (3.49)$$

Así que una solución para  $(C - \lambda I)$  diferente de cero existe si y solo si  $\lambda$  es un eigenvalor de  $C$ . Sin embargo,  $C$  tiene dos eigenvalores no negativos ya que  $C$  es una matriz definida positiva de orden  $2 \times 2$ , los cuales se pueden denotar por  $\lambda_1 > \lambda_2 \geq 0$ .

Entonces, el determinante en la ecuación 3.49 es un polinomio en términos de  $\lambda$ , el cual tiene el nombre de polinomio característico de  $C$ , que da la ecuación de eigenvalores, la cual se desarrolla en seguida.

$$\begin{vmatrix} \eta_{20} - \lambda & \eta_{11} \\ \eta_{11} & \eta_{02} - \lambda \end{vmatrix} = 0 \quad (3.50)$$

$$\lambda^2 - \lambda(\eta_{20} + \eta_{02}) + \eta_{20}\eta_{02} - \eta_{11}^2 = 0 \quad (3.51)$$

de donde se obtienen los dos eigenvalores  $\lambda_1 > \lambda_2 \geq 0$ ,

$$\lambda_1 = \frac{\eta_{20} + \eta_{02} + \sqrt{(\eta_{20} + \eta_{02})^2 - 4(\eta_{20}\eta_{02} - \eta_{11}^2)}}{2} \quad (3.52)$$

$$\lambda_2 = \frac{\eta_{20} + \eta_{02} - \sqrt{(\eta_{20} + \eta_{02})^2 - 4(\eta_{20}\eta_{02} - \eta_{11}^2)}}{2} \quad (3.53)$$

Para encontrar los eigenvectores  $\mathbf{v}_1 = [v_1, v_2]^T$  y  $\mathbf{v}_2 = [v_1, v_2]^T$  correspondientes a  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ , se sustituyen los dos eigenvalores en la ecuación 3.48. Para  $\lambda_1$  se tiene

$$(\eta_{20} - \lambda_1)v_1 + \eta_{11}v_2 = 0 \quad (3.54)$$

$$\eta_{11}v_1 + (\eta_{02} - \lambda_2)v_2 = 0 \quad (3.55)$$

despejando  $v_1$  de la ecuación 3.54,

$$v_1 = \frac{-\eta_{11}v_2}{\eta_{20} - \lambda_1} \quad (3.56)$$

si hacemos  $v_2 = 1$ , el eigenvector  $\mathbf{v}_1$  que corresponde a  $\lambda_1$  es

$$\mathbf{v}_1 = \begin{bmatrix} -\frac{\eta_{11}}{\eta_{20} - \lambda_1} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

el cual se normaliza a uno y además se sustituye  $\lambda_1$  de la ecuación 3.52,

$$\mathbf{v}_1 = \begin{bmatrix} -\frac{\eta_{11}/(\eta_{20} - \lambda_1)}{\sqrt{\left(-\frac{\eta_{11}}{\eta_{20} - \lambda_1}\right)^2 + 1}} \\ 1 \\ \frac{1}{\sqrt{\left(-\frac{\eta_{11}}{\eta_{20} - \lambda_1}\right)^2 + 1}} \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

Siguiendo el mismo procedimiento para  $\lambda_2$  se obtiene el eigenvector  $\mathbf{v}_2$  correspondiente:

$$\mathbf{v}_2 = \begin{bmatrix} -\frac{\eta_{11}/(\eta_{20} - \lambda_2)}{\sqrt{\left(-\frac{\eta_{11}}{\eta_{20} - \lambda_2}\right)^2 + 1}} \\ 1 \\ \frac{1}{\sqrt{\left(-\frac{\eta_{11}}{\eta_{20} - \lambda_2}\right)^2 + 1}} \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

Por lo que los dos eigenvectores,  $\mathbf{v}_1$  y  $\mathbf{v}_2$  representan la dirección de la mayor y menor variación, respectivamente, de los píxeles de una región de forma elíptica.

Los diámetros polar y ecuatorial del tomate buscados, se determinan trazando una línea en la dirección de  $\mathbf{v}_1$  y  $\mathbf{v}_2$ , desde el centroide de la imagen hasta su contorno, contando los píxeles y dividiendo por un factor de escala  $s_1$  de la ecuación 3.9, donde  $10 \text{ mm} = 9$  píxeles.

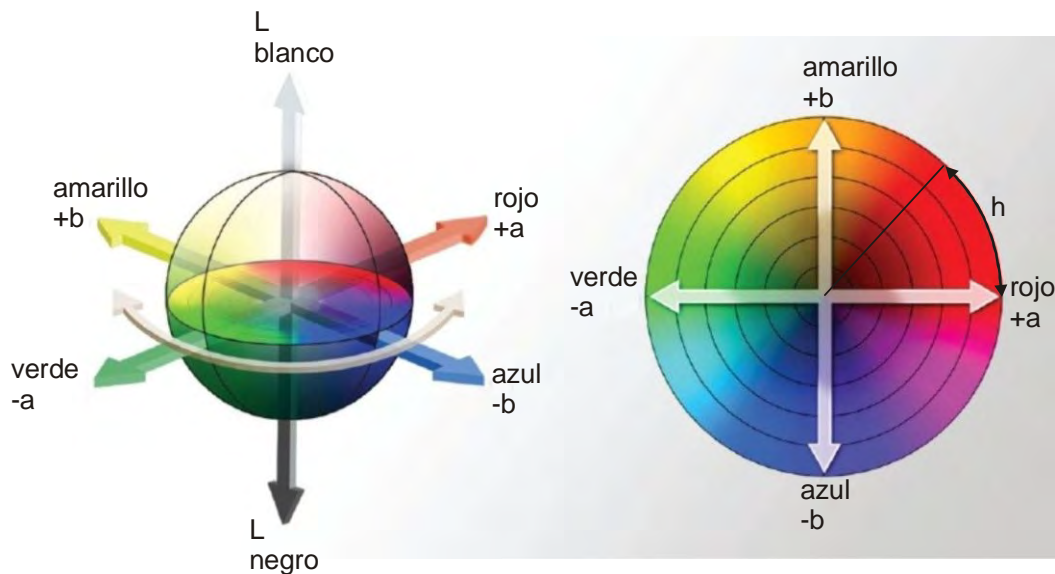
Luego, el diámetro ecuatorial obtenido, se compara con la altura del tomate calculada con la línea laser, el mayor de los dos es el diámetro ecuatorial definitivo. La clasificación por tamaño queda establecida con los datos de la tabla 3.1, para cada diámetro ecuatorial calculado.

### 3.6 Estimación del color del tomate

De acuerdo con los requisitos de selección presentados en el punto 3.1.2, el tomate se clasificará en seis colores basados en el porcentaje de color rojo en la fruta:

1. Verde: 0 %.
2. Verde Rosa: 0 - 10%.
3. Rayado: 10% - 30%.
4. Rosa: 30% - 60%.
5. Rojo claro: 60% - 90%.
6. Rojo: más de 90 %.

Para realizar la selección por color, independientemente del nivel de iluminación, se usa el componente H (*Hue*) del espacio de color CIELCH (Youngbae et al. 2008). CIELCH es la representación polar del espacio  $CieL^*a^*b^*$  desarrollado por la CIE (*Commission Internationale de L'Eclairage*). En  $CieL^*a^*b^*$  y CIELCH L (*Luminance*) es la luminosidad, la cual va de negro a blanco como se observa en la figura 3.21a. La cromaticidad C o saturación de un color y el ángulo de tonalidad H de CIELCH, se calculan a partir de los valores  $a^*$  y  $b^*$  de  $CieL^*a^*b^*$ . En esta tesis solo interesa el tono o matiz H del tomate, por esta razón solo este valor se obtiene del espacio CIELCH con la ecuación 3.68. En la figura 3.21b se muestra H dentro del círculo cromático.



**Figura 3.21.** a) Espacio tridimensional del modelo de color  $CieL^*a^*b^*$ , b) ángulo de matiz H en el modelo CIELCH.

### 3. Detección del tamaño, forma y color del tomate

El espacio Cie L\*a\*b\* es un espacio de color más perceptivamente lineal que otros espacios de color, es independiente del dispositivo y fue desarrollado para describir todos los colores que percibe el ojo humano (Hill et al. 1997). Los tres parámetros que lo forman como se observa en la figura 3.21a son: L\*, que representa la luminosidad del color, toma valores entre 0 y 100. a\* denota el valor rojo/verde, +a\* muestra un desplazamiento hacia el rojo, a\* toma valores entre 90 y -90. b\* describe el valor amarillo/azul y también toma valores entre 90 y -90.

Los valores RGB no lineales obtenidos de la webcam se convierten al espacio Cie L\*a\*b\* y luego se obtiene el ángulo H del modelo CIELCH que indicará el tono promedio de la fruta.

Tomando como referencia a Mendoza-Vilcarromero (2005) se tiene:

$$\begin{aligned}R' &= \frac{R_{8bits}}{255} \\G' &= \frac{G_{8bits}}{255} \\B' &= \frac{B_{8bits}}{255}\end{aligned}\tag{3.60}$$

Si  $R', G', B' \leq 0.04045$

$$\begin{aligned}sR &= \frac{R'}{12.92} \\sG &= \frac{G'}{12.92} \\sB &= \frac{B'}{12.92}\end{aligned}\tag{3.61}$$

Si  $R', G', B' > 0.04045$

$$sR = \left[ \frac{R' + 0.055}{1.055} \right]^{2.4}$$

$$sG = \left[ \frac{G' + 0.055}{1.055} \right]^{2.4} \quad (3.62)$$

$$sB = \left[ \frac{B' + 0.055}{1.055} \right]^{2.4}$$

Los valores triestímulos sRGB menores que 0 y mayores que uno se truncan a 0 y 1, respectivamente. Enseguida, los valores sRGB se convierten al sistema CIE XYZ, como sigue

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} sR \\ sG \\ sB \end{bmatrix} \quad (3.63)$$

Los parámetros  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  del espacio CIE  $l^*a^*b^*$  se definen como

$$L^* = 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16 \quad (3.64)$$

$$a^* = 500 \left[ f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right] \quad (3.65)$$

$$b^* = 200 \left[ f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right] \quad (3.66)$$

donde

$$f(q) = \begin{cases} q^{1/3}, & \text{si } q > 0.008856 \\ 7.787q + \frac{16}{116}, & \text{en otro caso.} \end{cases} \quad (3.67)$$

$X_n, Y_n, Z_n$  corresponden a los valores  $X, Y, Z$  de un blanco de referencia,  $q \in \{X/X_n, Y/Y_n, Z/Z_n\}$ . En este caso se usó un observador CIE estandar de 10 grados, debido al campo de visión de la cámara mostrado en el arreglo de la figura 2.10 y una iluminación D65 como se menciona en el punto 2.5, por lo que  $X_n=94.83, Y_n=100, Z_n=107.38$ .

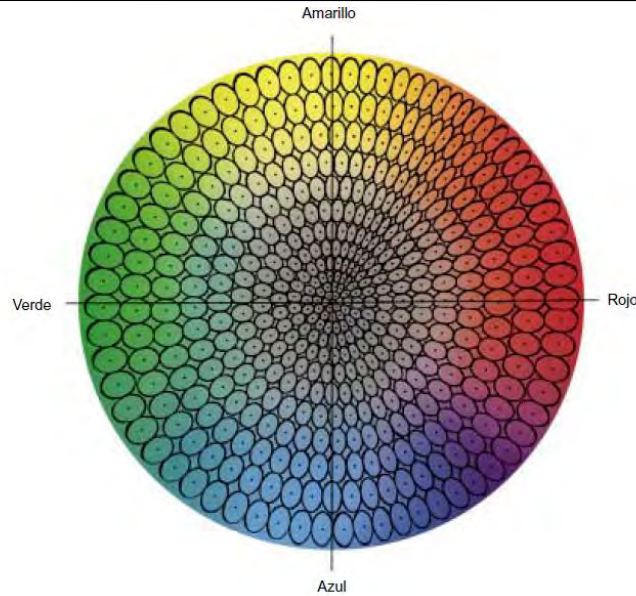
Luego, el ángulo  $H$  de matiz o tono, queda definido por,

$$H = \arctan (b^*/a^*) \quad (3.68)$$

A continuación, se toma el área de interés de la imagen binarizada como la mostrada en la figura 3.19, y se calcula el ángulo  $H$  para cada pixel de la imagen en color del tomate, que se encuentre dentro de dicha área. Posteriormente, se obtiene el promedio del ángulo  $\bar{H}$  de toda la imagen dado por,

$$\bar{H} = \frac{1}{n} \sum_i^n H_i \quad (3.69)$$

donde  $n$  es el número de pixeles. De esta manera,  $\bar{H}$  definirá el color en que se clasificará cada tomate, de los seis colores mencionados, basándose en la posición de  $\bar{H}$  en el círculo cromático de la figura 3.21b, previo establecimiento de un ángulo  $H$  de referencia para cada nivel de madurez. Para establecer los umbrales de  $H$  para cada uno de los seis colores en que se hará la clasificación, se toma en cuenta que el tamaño de los elipsoides de tolerancia varía para cada color (Carranza-Gallardo, 2002), dependiendo de la posición en el espacio de color, como se muestra en la figura 3.22.



**Figura 3.22.** Elipsoides de tolerancia para H en el espacio de color CIELCH.

Es importante mencionar que el color del tomate en el prototipo diseñado, se calcula en la superficie frontal de la fruta, vista desde la cámara, es decir, aproximadamente la mitad de la fruta. En una máquina con fines comerciales, la fruta rota sobre unos rodillos, y el color resultante es el promedio de todas las capturas de una misma fruta, tomadas por la cámara de manera sincronizada con el movimiento de traslación de la cinta transportadora, y el movimiento de rotación de los rodillos instalados en dicha cinta. En el prototipo realizado, las capturas de las imágenes se realizaron de forma asíncrona, calculando el color y tamaño para la fruta cuyo centroide se encontrara en la región del centro de la mitad izquierda de la captura, como se observa en la figura 3.23B, donde los centroides de la fruta están marcados con una cruz y la dirección del movimiento de la cinta con una flecha.



**Figura 3.23.** Centroides de la fruta en las capturas de video.



### 3.7 Medición de la forma del tomate

La forma del tomate, presentada en el punto 3.1.1, queda determinada por la siguiente relación

$$\textit{forma tipo saladette} = \frac{\textit{diámetro polar}}{\textit{diámetro ecuatorial}} > 1 \quad (3.70)$$

$$\textit{forma tipo bola} = \frac{\textit{diámetro polar}}{\textit{diámetro ecuatorial}} \leq 1$$

donde los diámetros polar y ecuatorial se obtuvieron en el punto 3.2 y 3.5. De esta manera se clasifica el tomate por su tipo, es decir *saladette* y *bola*.

## Capítulo 4

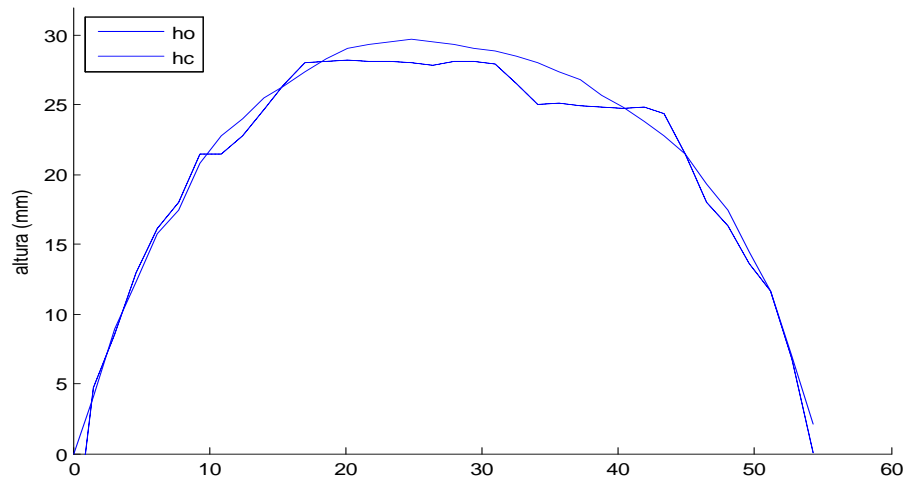
# Resultados y observaciones

### 4.1 Altura del tomate usando línea de luz laser y red de aproximación Bézier

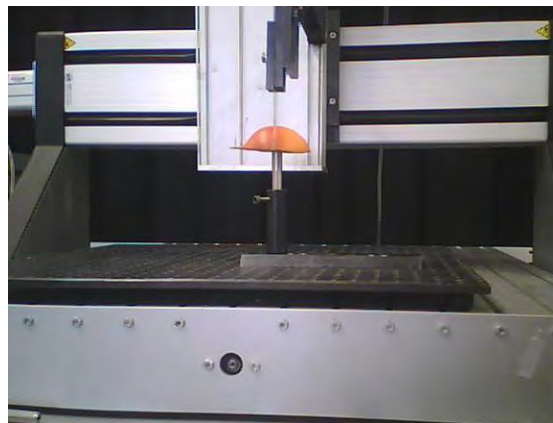
La figura 4.1 muestra el perfil de la altura de un objeto donde  $hc$  son las medidas realizadas con una máquina de coordenadas mostrada en la figura 4.2 y  $ho$  son las medidas calculadas con la red Bézier. La razón de la falta de uniformidad del perfil obtenido con la red Bézier es la resolución de 1.25 mm/pixel de la imagen y la posición perpendicular de la cámara al plano de referencia. Para conocer la precisión de la red Bézier se calculó el error medio cuadrático (Muñoz-Rodríguez, 2010) entre los dos perfiles, el cual está dado por

$$erms = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ho_i - hc_i)^2} \quad (4.1)$$

donde  $n$ , el número de datos fue de 36. Siendo el error  $erms$  de 1.6 mm, lo cual es tolerable, según la norma mexicana para la selección por tamaño del tomate.



**Figura 4.1.** Perfil de la altura de un objeto.



**Figura 4.2.** Máquina de coordenadas para medir la altura del objeto.

La media de la altura del objeto fue de 20.53mm. Dividiendo el error  $erms$  por la media de la altura del objeto, da 0.077, el cual representa 7.7% de error. Para determinar si  $n$  satisface la precisión de error deseada, se calculó  $n$  basado en el nivel de confianza deseado, con la siguiente relación

$$n = \left( z_{\alpha} \frac{\sigma_x}{e} \right)^2 \quad (4.2)$$

donde  $\sigma_x$  es la desviación estándar,  $e$  el error expresado en porcentaje y,  $z_\alpha$  la confianza deseada. Para un nivel de confianza de 95% corresponde  $z_\alpha = 1.96$ , basado en tablas de estadística. El error  $e$  fue de 7.7% y la desviación estándar de 8.79. Luego, sustituyendo en la ecuación 4.2 se obtuvo  $n = 5$ . Por tanto, el número  $n$  de datos si cumple la confianza deseada.

La altura del tomate se obtuvo del video en tiempo real, por ello se buscó que el tiempo de ejecución del algoritmo fuera mínimo, como muestran los resultados de tiempo descritos enseguida para dos posiciones de un tomate sobre la banda transportadora.

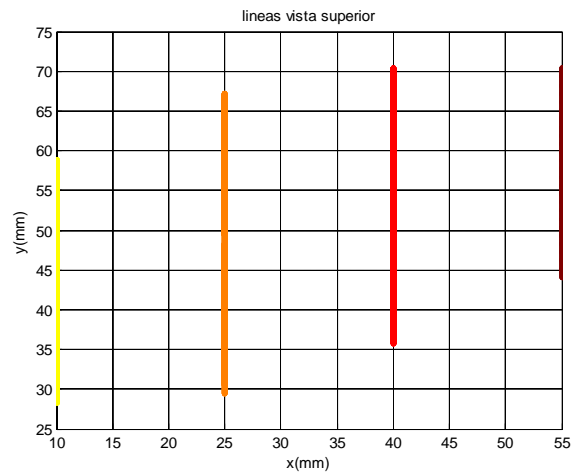
Como se planteó en el punto 3.2, para calcular la altura de un tomate es necesario obtener la máxima altura de las líneas proyectadas sobre la fruta, para lograr esto se tomó el tomate que se muestra en la figura 4.3 el cual tuvo 67 mm de longitud y 46 mm de ancho y se colocó dentro de la caja de iluminación, sobre la banda transportadora en movimiento a una velocidad de desplazamiento de 0.11 m/s. Las mediciones del perfil de su altura se muestran en las figuras 4.4 y 4.5, para dos posiciones.



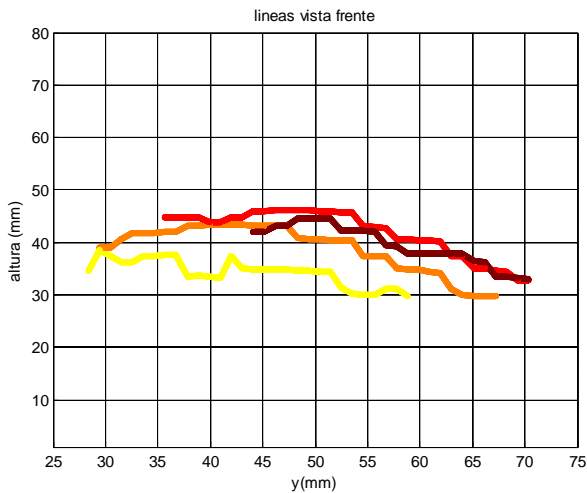
**Figura 4.3.** Muestra de tomate para obtener su perfil.



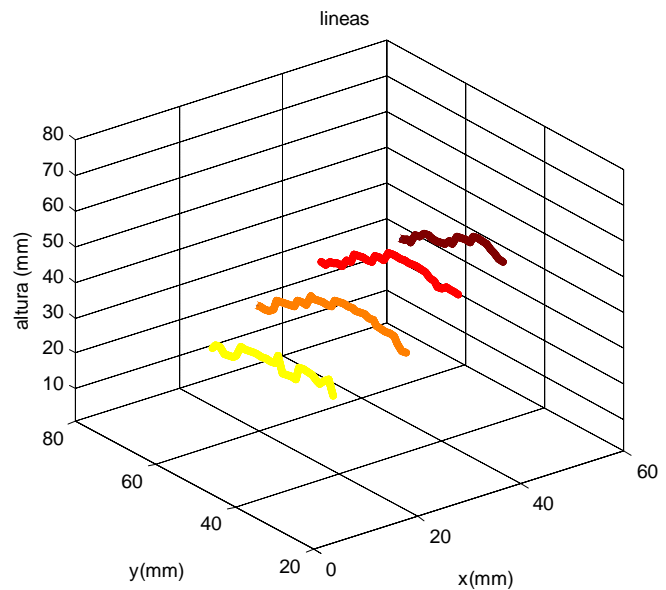
a)



b)



c)

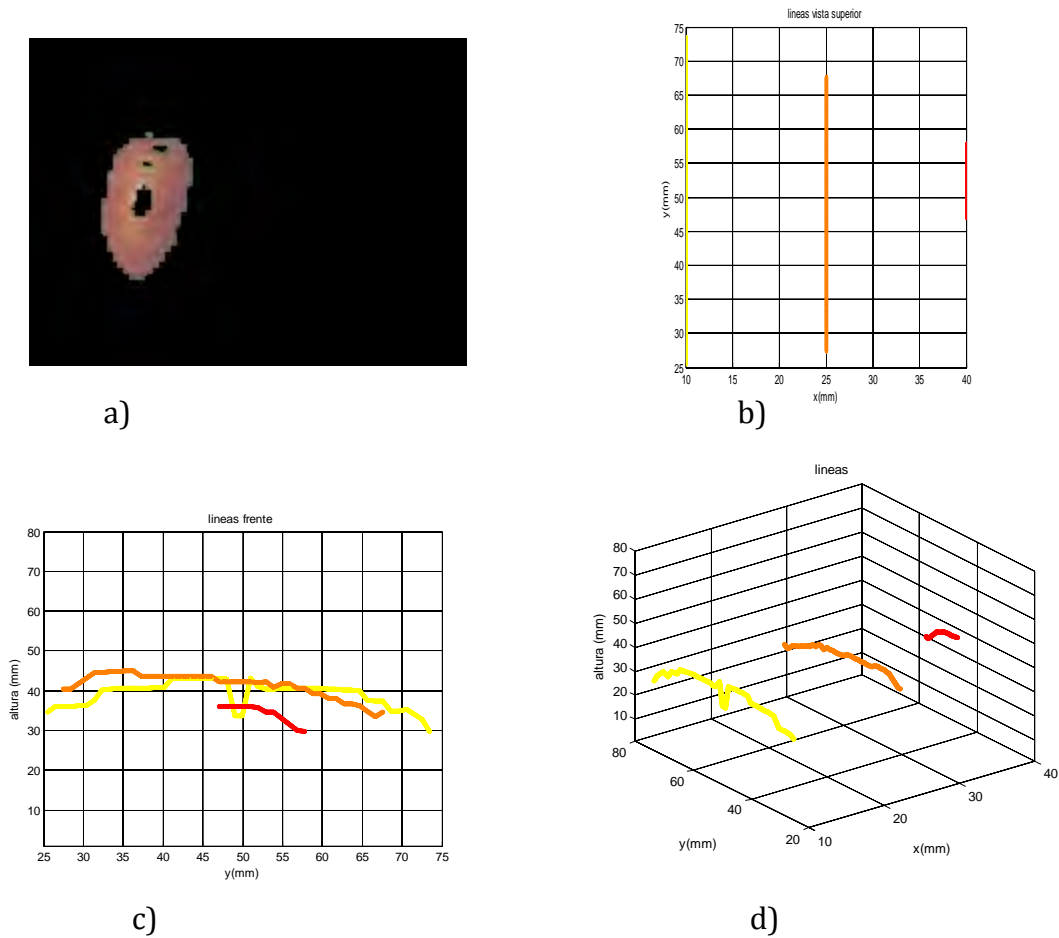


d)

**Figura 4.4.** Perfil del tomate, con una posición inclinada en la imagen.

En la figura 4.4a se observa que la fruta tuvo una pequeña rotación sobre la banda transportadora. En la figura 4.4b y 4.4d se observan cuatro líneas que pasaron sobre la fruta, las cuales tardaron un tiempo igual a 119.65 ms. En cada línea se empleó un tiempo aproximado de 30 ms, el cual varía, dependiendo de la longitud de la línea. Cuatro líneas detectadas implica que no se escaneó toda la superficie del tomate, es decir, el espacio entre cada línea sobre la superficie del tomate es aproximadamente 15 mm, como se muestra en la figura 4.4b.

Luego, la medida de la altura entre ese espacio se pierde. Sin embargo, esto no afecta demasiado en la clasificación, debido a la forma regular de la superficie y la tolerancia de las normas de selección por tamaño. Por lo tanto, la mayor altura como se observa en la figura 4.4c fue de 46.1 milímetros. La altura calculada con medición de contacto fue de 46 milímetros, por tanto el error fue de 0.1 mm en este caso.



**Figura 4.5.** Perfil del tomate con una posición vertical en la imagen.

En la figura 4.5a se muestra la captura del mismo tomate presentado en la figura 4.3 ahora en posición vertical, obteniéndose en este caso tres líneas de luz, mostradas en las figuras 4.5b, c, d, las cuales se procesaron en 120.4 ms., calculándose una altura máxima de 44.93 mm., cuyo error fue de 1.07 mm respecto de la medida realizada por contacto. Como se observa en la figura 4.5d, el perfil de la primera línea de izquierda a derecha no es continuo, a causa de la resolución de la imagen.



Altura de tomate $h_i$ (mm)			
	A	B	C
Medida por contacto	53	44	61
	52,66	43,78	59,95
	52,96	43,48	61,04
	52,81	43,62	61,24
	52,31	43,64	61,31
	53,23	43,84	60,19
	52,05	43,41	61,08
	53,09	43,76	61,05
	53,03	43,5	61,29
	53,1	43,56	60,99
	53,25	43,51	60,21
	52,25	43,47	61,11
	51,97	43,94	60,96
	52,7	43,85	60,16
	53,02	43,31	61,28
	52,72	43,46	59,95
	52,7	43,62	61,12
	52,82	42,62	61,12
	52,82	43,49	60,33
	53,2	43,86	60,9
	52,35	43,19	60,4
	53,01	43,72	61,19
	53,55	44,21	61,02
	52,87	43,57	61,03
	52,97	43,97	61,08
	52,43	43,64	61,12
	53,03	43,76	61,02
	53,3	43,69	59,71
	52,89	43,59	61,23
	49,97	43,6	60,84
	48,16	43,53	60,74
	51,92	43,86	60,87
	53,05	42,85	60,95
	53,65	43	60,97
	54,12	43,55	61,08
	53,07	43,73	60,54
	52,82	44,13	61,07
	52,95	43,85	61,15
	53,08	43,78	61,32
	52,76	43,88	60,1
	52,81	41,54	61
	52,86	43,8	60,03
	52,17	43,37	61,09
	52,38	43,55	60,74
	52,91	43,73	61,11
	51,54	43,4	60,75
	53,14	43,7	61,23
	52,06	43,63	61,27
	53,08	43,41	61,14
	52,38	42,57	60,37
	52,79	43,76	60,23
Erms	0,9485	0,6234	0,4616

**Tabla 4.1.** Mediciones de la altura de tomates.

donde  $h_i$  es la altura calculada con la red Bézier para cada medición,  $h_{contacto}$  es la medición de la altura realizada por contacto, el número de datos  $n = 50$ .

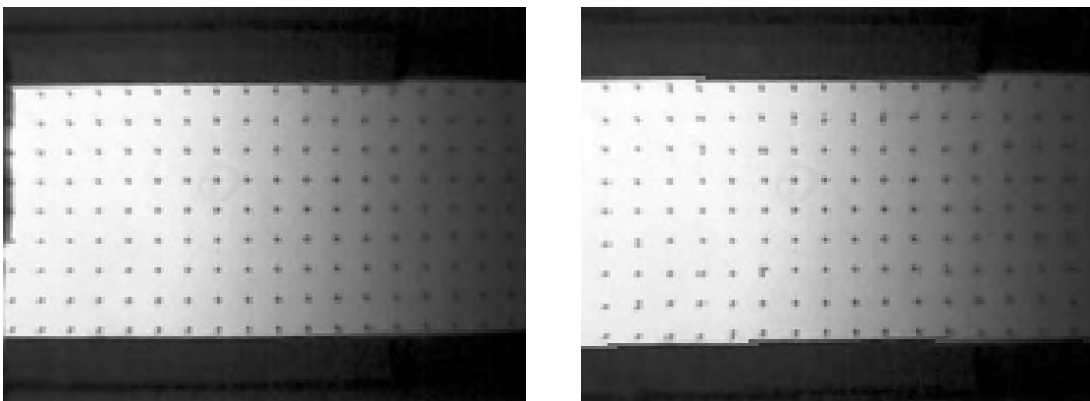
Para la muestra A, como se observa en la tabla 4.1, el error medio cuadrático de su altura fue de 0.9485 mm, para B fue 0.6234 mm y para C fue de 0.4616 mm.



El error en porcentaje para A es  $0.9485\text{mm} \times 100\% / 53\text{mm} = 1.8\%$ , para B es  $1.41\%$ , para C es  $0.75\%$ . Si se toma el máximo error respecto del máximo diámetro considerado en la red Bézier, se tiene;  $0.9485\text{mm} \times 100\% / 79\text{mm} = 1.2\%$ , que es el error al calcular la altura de cualquier tomate, este porcentaje de error máximo es aceptable para realizar la clasificación.

## 4.2 Corrección de la distorsión radial

En la figura 4.7a se observa el patrón usado para corregir la distorsión, el cual se colocó dentro de la caja de iluminación, sobre la banda transportadora en reposo. Luego se aplicó la ecuación 3.18 y se obtuvo la imagen de la figura 4.7b.



**Figura 4.7** a) imagen con distorsión, b) imagen corregida.

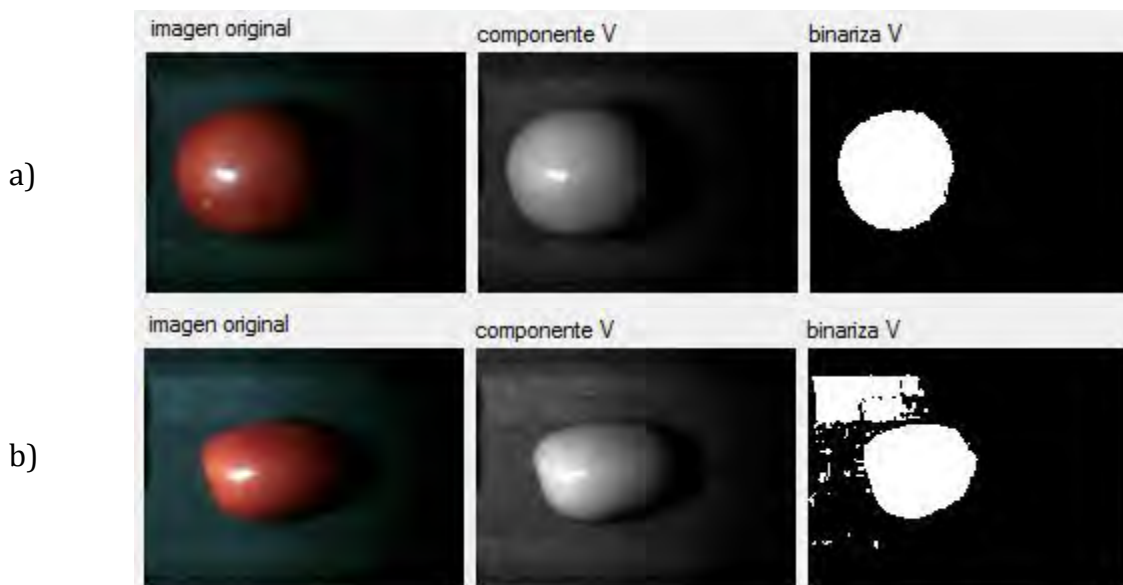
Como se observa en la figura 4.7b, la corrección de la distorsión ha introducido algunos píxeles de ruido en la imagen corregida, los cuales no alteran la medición de los tomates.

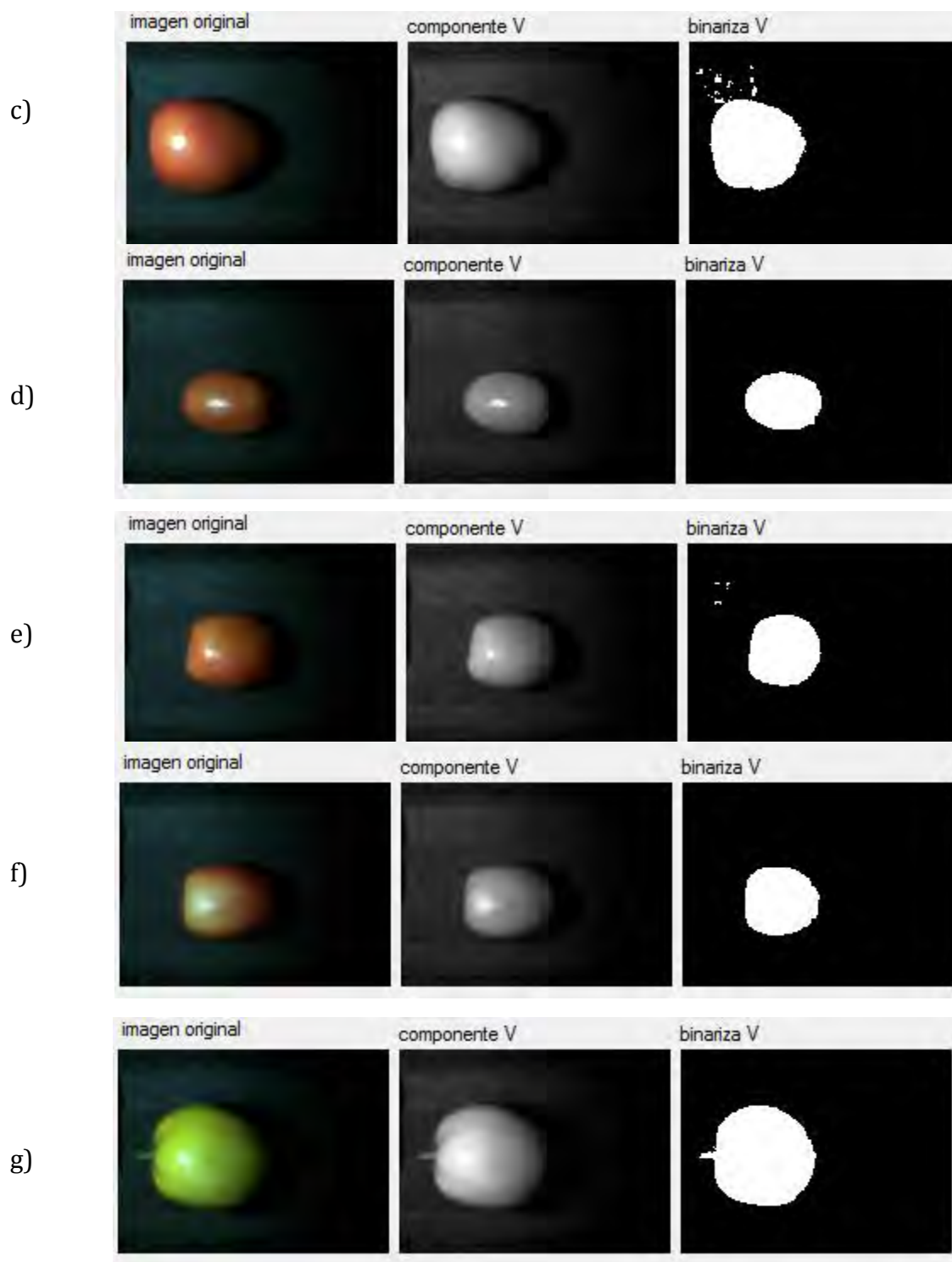
### 4.3 Preparación de la imagen para calcular color y tamaño del tomate

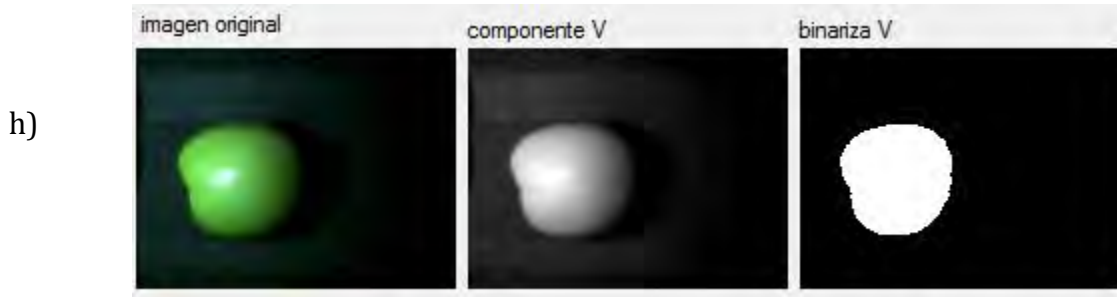
#### 4.3.1 Umbralización

En este punto se calculó el componente V del espacio de color HSV, aplicándole un umbral de 40 para las ocho muestras de tomate que se presentan en la figura 4.8, las cuales se colocaron dentro de la caja de iluminación, sobre la banda transportadora en reposo para adquirir la imagen.

A todas las muestras de la figura 4.8 se aplicó el mismo umbral de binarización. Sin embargo, las imágenes de las figuras 4.8b, 4.8c y 4.8e presentan problemas de ruido en el fondo de la banda oscura. Aunque se cambió el valor del umbral, esto no se pudo evitar, dado que es un problema de adquisición de la webcam, cuyas propiedades como la exposición, brillo, etc., no son estables. El método que usó para quitar el ruido mencionado, fue la apertura binaria, es decir, se erosionó el área en blanco de la imagen binaria y después se dilató como se explica en el siguiente punto. Sin embargo, un problema de mucho ruido como el de la figura 4.8b es difícil de resolver de esta manera, una solución sería usar una cámara tipo industrial.



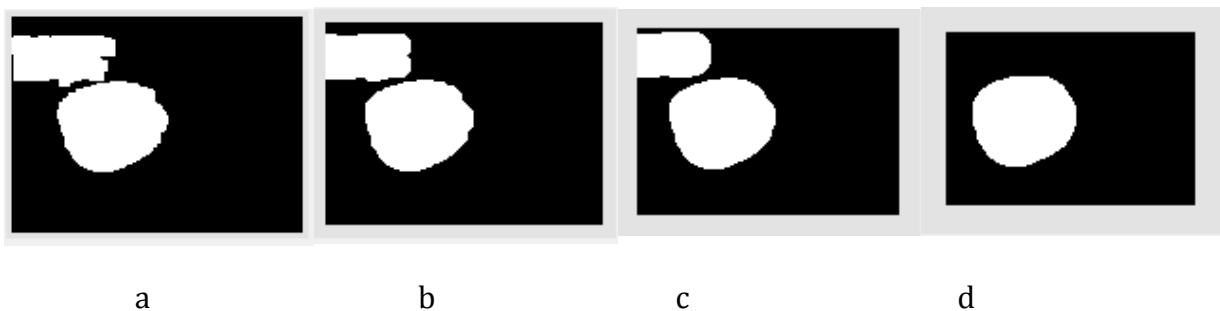




**Figura 4.8.** Binarización del componente V aplicando un umbral de 40 a ocho muestras a, b, c, d, e, f, g, h.

#### 4.3.2 Aplicación de apertura morfológica

En este punto solo se aplicó apertura a la imagen de la figura 4.8b, la cual tiene mayor ruido. En la figura 4.9 se muestra el resultado de usar un estructurante circular de distintos tamaños como el mostrado en la figura 3.17b.



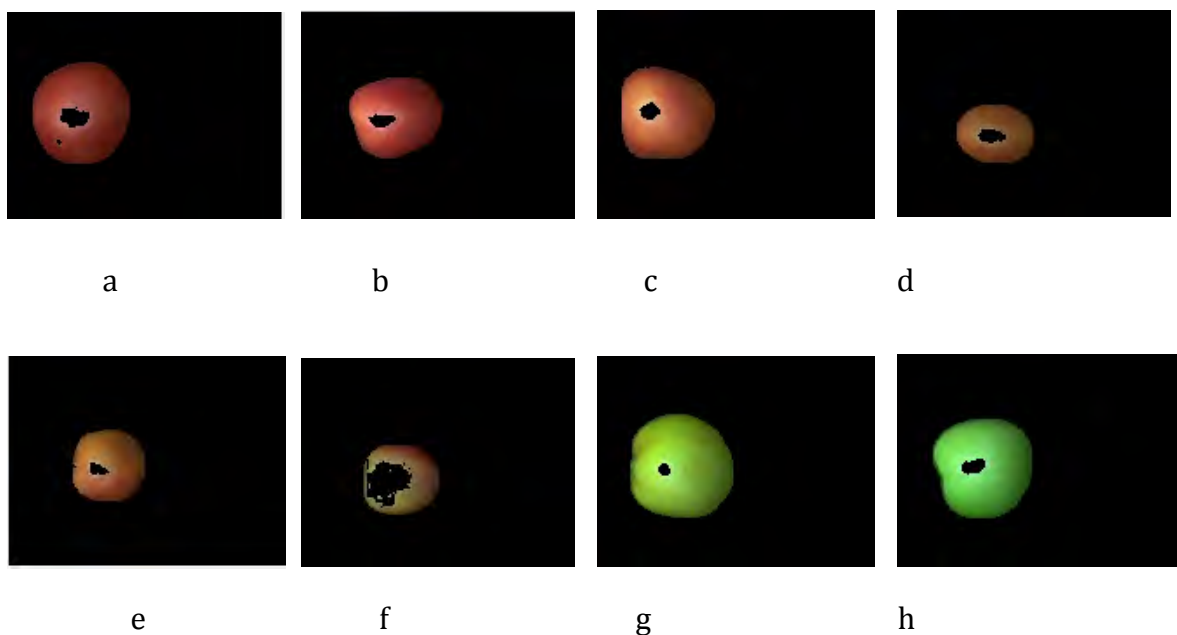
**Figura 4.9.** Apertura con estructurante de a) 7x7, b) 15x15, c) 23x23, d) 31x31 píxeles.

Como se observa en la figura 4.9d al aplicar un estructurante de 31x31 píxeles se eliminó el ruido de fondo, quedando solo el área de interés la cual se utilizó para calcular el área, diámetro polar y ecuatorial. Sin embargo al usar un estructurante de ese tamaño, se disminuyó el área útil de trabajo en la imagen, lo que fue crítico dado el

tamaño de la imagen usada, en este caso 160x120 píxeles. Por ejemplo un tomate de 70mm de longitud ocupó casi toda la región de trabajo considerada en la figura 2.9a. Por lo que el tamaño del estructurante que se seleccionó fue de 11x11 píxeles. Además se ajustaron las propiedades de la cámara de adquisición, buscando minimizar el ruido del fondo.

#### 4.3.4 Eliminación de reflejos de luz

En este caso, se usó un umbral de 70 para el componente de saturación S del espacio de color HSV para las ocho muestras consideradas en la figura 5.8. En la figura 5.10 se muestra la región para cada fruta después que se aplicó umbralización, apertura y eliminación de reflejos. La región que resultó, se utilizó para medir el color en la fruta.



**Figura 4.10.** Región que resultó para cada fruta al eliminar los reflejos.

---

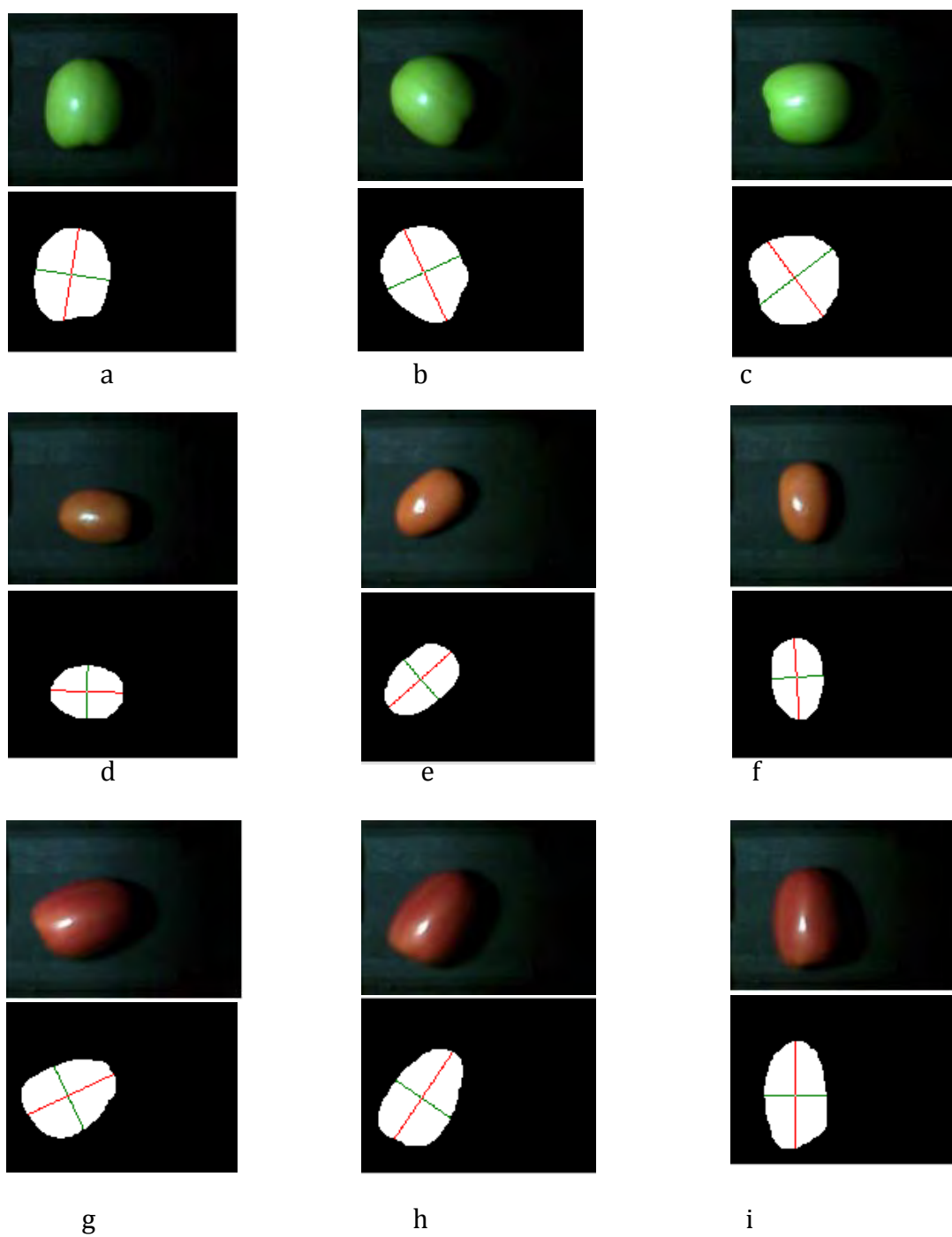
#### 4.4 Determinación del diámetro ecuatorial y polar del tomate

Los diámetros polar y ecuatorial se determinaron trazando una línea en la dirección de los eigenvectores, dados por las ecuaciones 4.58 y 4.59. Las líneas se trazaron desde el centroide de la región binaria blanca hasta el fondo negro. Después se contaron los píxeles de la línea y se dividió por el factor de escala  $s_1$  dado por la ecuación 4.9, donde  $10 \text{ mm} = 9 \text{ píxeles}$ .

Para visualizar el trazo de los diámetros se tomaron tres muestras de tomate que se presentan en la figura 4.11. El trazo del diámetro ecuatorial se pintó de color verde y el polar en rojo. Se tomaron tres capturas de cada muestra, en cada captura se giró la muestra sobre la banda transportadora en reposo, dentro de la caja de iluminación.

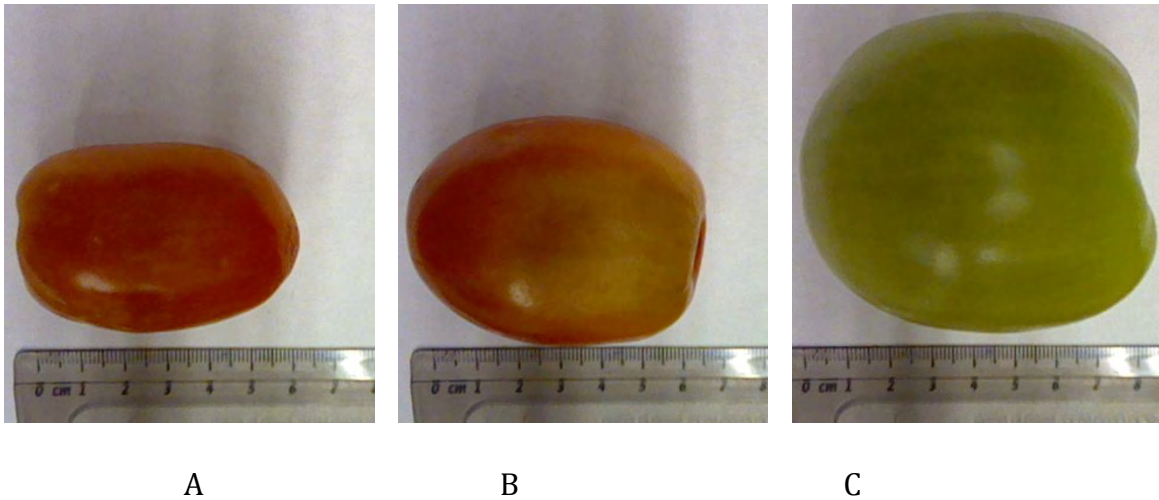
Como se observa en la figura 4.11, la iluminación lateral generó sombras en la fruta que introdujo errores al medir los diámetros. Una solución, para captar toda la fruta, sería usar iluminación difusa y uniforme en un escenario más amplio, o iluminación direccional o coaxial dirigida en el mismo eje de la cámara.

Otro factor de error es la forma de la fruta, por ejemplo para las frutas alargadas la inclinación de los diámetros coincide con la inclinación de la fruta como se observa en las figuras 4.11d, e, f, g, h, i. Pero para la figura 5.11c los diámetros calculados no coinciden con los de la fruta, esto es debido a la forma más redonda de la fruta.



**Figura 4.11.** Trazo de diámetro ecuatorial y diámetro polar.

El diámetro ecuatorial como se mencionó en el punto 3.5, se usa como parámetro de selección por tamaño, siendo por tanto, más importante que el diámetro polar. Para saber el error en la estimación del diámetro ecuatorial del tomate usando momentos, se tomaron tres muestras de distinta redondez las cuales se observan en la figura 4.12.



**Figura 4.12.** Muestras para calcular el diámetro ecuatorial de la fruta.

Las muestras se colocaron sobre la banda transportadora en movimiento, a una velocidad de desplazamiento de 0.11 m/s y se realizaron cincuenta mediciones del diámetro ecuatorial para cada una. Los diámetros calculados, el error *erms* y la medición realizada por contacto se presentan en la tabla 4.2.

El error medio cuadrático *erms* se obtuvo usando la siguiente expresión

$$erms = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - d_{contacto})^2} \quad (5.4)$$

donde el número de datos  $n = 50$ ,  $d_i$  es el diámetro ecuatorial en cada medición,  $d_{contacto}$  es la medición del diámetro realizada por contacto.



Para la muestra A, como se observa en la tabla 4.2, el error medio cuadrático fue 1.014 mm, para B fue 1.4435 mm y para C fue de 3.2097 mm. El error en porcentaje para A es  $1.014\text{mm} \times 100\% / 37\text{mm} = 2.7\%$ , para B es 3.2%, para C es 5.63%. Si se toma el máximo error respecto del máximo diámetro considerado en la red Bézier, se tiene;  $3.2097\text{mm} \times 100\% / 79\text{mm} = 4.06\%$ , que es el error al calcular el diámetro ecuatorial de cualquier tomate, este porcentaje de error máximo es aceptable para realizar la clasificación.

<i>Diámetro ecuatorial del tomate (di)</i>	<i>(mm)</i>		
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
Medición por contacto	37	45	57
	38,8	45,2	62
	34,6	46,2	55,6
	36,8	44,1	59,8
	36,8	45,2	62
	37,8	47,2	59,8
	35,7	47,2	60,9
	36,8	46,2	59,8
	35,7	45,2	59,8
	36,8	45,2	59,8
	36,8	46,2	59,8
	35,7	47,2	54,6
	34,6	43,1	60,9
	37,8	44,1	60,9
	36,8	46,2	60,9
	35,7	44,1	58,8
	37,8	45,2	59,8
	37,8	45,2	57,8
	36,8	43,1	57,8
	37,8	43,1	58,8
	37,8	44,1	59,8
	36,8	44,1	59,8
	35,7	45,2	59,8
	36,8	42	59,8
	34,6	45,2	51,4
	36,8	46,2	57,8

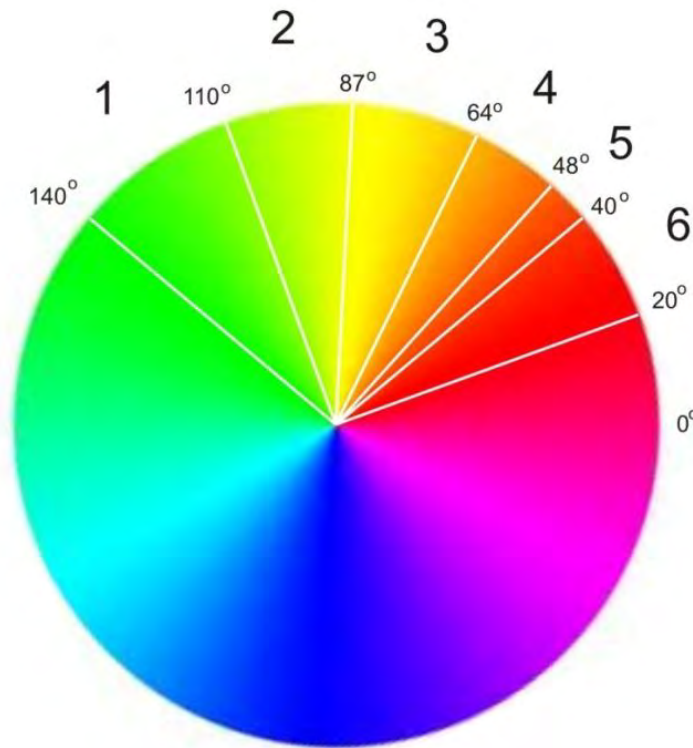
continuación

36,8	42	62	
36,8	46,2	58,8	
35,7	46,2	62	
37,8	45,2	59,8	
36,8	42	50,4	
38,8	43,1	58,8	
36,8	43,1	54,6	
38,8	45,2	60,9	
36,8	46,2	51,4	
35,7	45,2	59,8	
36,8	45,2	52,5	
37,8	45,2	58,8	
37,8	44,1	59,8	
36,8	45,2	58,8	
37,8	45,2	57,8	
36,8	45,2	57,8	
36,8	42	59,8	
35,7	45,2	57,8	
36,8	46,2	54,6	
37,8	42	59,8	
37,8	43,1	62	
36,8	45,2	57,8	
37,8	45,2	59,8	
36,8	43,1	58,8	
35,7	44,1	59,8	
<b>Erms</b>	<b>1,014</b>	<b>1,4435</b>	<b>3,2097</b>

Tabla 4.2. Mediciones del diámetro ecuatorial.

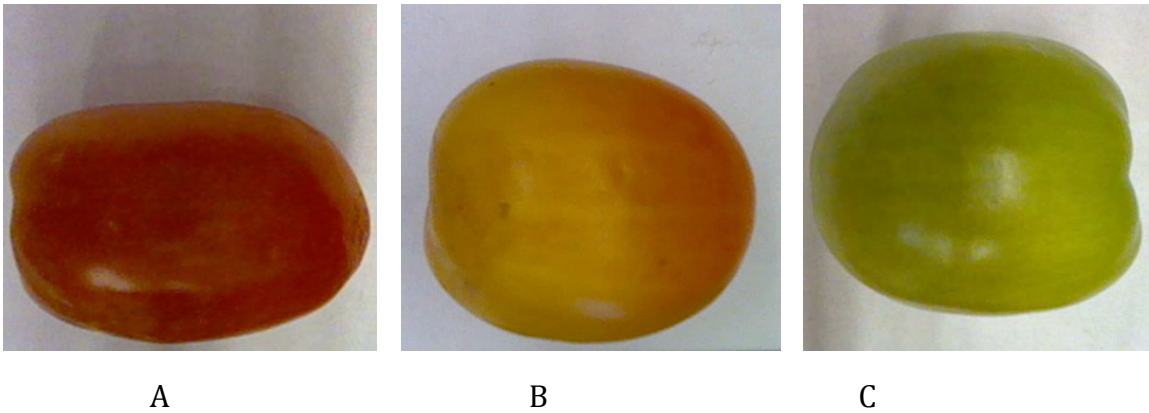
## 4.5 Estimación del color del tomate

En la figura 4.13 se muestran los seis umbrales para el componente  $\bar{H}$  del espacio de color CIELCH que se eligieron para clasificar los tomates por color. Los valores para el ángulo  $\bar{H}$  se obtuvieron experimentalmente de la imagen 3.2 para los seis niveles de madurez presentados.



**Figura 4.13.** Umbrales para el componente  $\bar{H}$  del espacio de color CIELCH elegidos para realizar la clasificación por color.

Para calcular la variación en la medición del componente  $\bar{H}$ , se obtuvo la desviación estándar de cincuenta mediciones, para cada una de las tres muestras de tomate de diferente grado de madurez presentadas en la figura 4.14.



**Figura 4.14.** Muestras de tomate usadas para calcular la desviación estándar en la medición de  $\bar{H}$  y para medir la forma.

Los tomates se colocaron sobre la banda transportadora en movimiento, a una velocidad de desplazamiento de 0.11 m/s, obteniéndose los valores de  $\bar{H}$  y desviación estándar mostrados en la tabla 4.3. La desviación estándar se calculó con la expresión siguiente,

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{H}_i - \bar{H}_{prom})^2}{n - 1}} \quad (5.5)$$

donde el promedio de  $\bar{H}$  está dado por

$$\bar{H}_{prom} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{H}_i$$

siendo el número de datos  $n = 50$  y,  $\bar{H}_i$  el componente H en cada medición.

Color Tomate H (grados)			continuación		
A	B	C			
44,74	77,6	116,57	44,29	77,22	115,99
43,75	78,06	115,74	44,11	78,83	115,93
45,12	76,02	116,69	44,64	76,78	116,27
44,3	78,2	120,74	43,42	78,63	116,24
45,09	76,12	116,73	45,58	77,86	115,93
43,69	78,48	115,93	44,77	78,32	116,29
44,63	75,33	116,07	44,48	77,07	116,31
45,03	78,15	116,15	44,91	78,91	116,32
45,32	76,26	116,3	44,8	77,06	116,61
44,18	78,41	115,9	45,34	79,65	117,74
44,82	76,78	116,08	43,67	76,66	116,71
43,51	78,63	116,17	44,12	78,87	116,22
45,18	76,5	116,58	44,5	77,06	116,68
45,17	76,7	116,28	44,7	80,03	115,86
43,54	76,2	115,95	43,71	77,07	116,47
44,22	78,97	116,3	44,8	78,87	116,27
44,06	76,69	116,46	43,61	77,56	116,01
44,93	78,5	116,18	44,44	78,95	116,12
44,56	76,6	116,15	44,32	77,29	116,31
44,66	80,15	116,14	44,32	78,49	116,54
44,83	76,96	116,16	44,29	77,27	116,5
43,57	78,73	116,28	41,54	79,7	116,82
44,47	78,58	116,15	44,57	77,41	116,02
42,8	77,18	115,87	44,75	79,98	116,45
44,33	79,02	116,65	44,52	77,18	116,34
		Media	44,374	77,8308	116,3834
		Desviacion estandar	0,707533802	1,169419601	0,712000946

**Tabla 4.3.** Mediciones del componente  $\bar{H}$ .

Como se observa en la tabla 4.3, la mayor desviación estándar se presentó para la muestra B de color amarillo, la cual fue de 1.169 grados. Esta muestra pertenece por su valor  $\bar{H}$  al nivel de madurez 3, como se observa en la figura 4.13. Suponiendo que el valor de  $\bar{H}$  estuviera entre dos niveles contiguos de madurez, entonces la

clasificación en uno u otro nivel no importaría tanto, dadas las tolerancias que establece la norma de selección por color.

#### 4.6 Medición de la forma del tomate

Se tomaron tres muestras de diferente relación largo ancho presentadas en la figura 4.14, la cuales se colocaron sobre la banda transportadora en movimiento, a una velocidad de desplazamiento de 0.11 m/s, obteniéndose los valores de su forma, como indica la ecuación 3.70. Se realizaron cincuenta mediciones de su forma las cuales se muestran en la tabla 4.4.

Luego se calculó el error medio cuadrático *erms* entre los valores obtenidos y la medición realizada por contacto usando la siguiente expresión

$$erms = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - f_{contacto})^2} \quad (5.4)$$

donde el número de datos  $n = 50$ ,  $f_i$  es la forma de la fruta en cada medición,  $f_{contacto}$  es la medición de la forma realizada por contacto.

Para la muestra A, como se observa en la tabla 4.4, el error medio cuadrático fue de 0.0769, para B fue de 0.0581 y para C fue de 0.0706. El error en porcentaje para A es  $0.0769 \times 100\%/1.39 = 5.53 \%$ , para B es  $4.76 \%$ , para C es  $6.48\%$ . Siendo el máximo error para la muestra C de la figura 4.14, por tanto, se observó que cuanto más redondo es un tomate, más error hay en la medición de la forma. Sin embargo el porcentaje de error máximo fue aceptable para realizar la clasificación por tipo de tomate, sea tipo alargado o tipo bola.

4. Resultados y observaciones

Forma de tomate = largo/ancho			
	A	B	C
<i>f contacto</i>	1,39	1,22	1,1
	1,41	1,17	1,14
	1,42	1,15	1,1
	1,43	1,15	1,08
	1,42	1,19	1,11
	1,46	1,17	1,12
	1,31	1,17	1,07
	1,44	1,15	1,12
	1,35	1,17	1,07
	1,39	1,26	1,1
	1,24	1,19	1,17
	1,28	1,17	1,12
	1,22	1,22	1,11
	1,27	1,15	1,1
	1,27	1,24	1,13
	1,28	1,19	1,14
	1,34	1,21	1,08
	1,43	1,17	1,15
	1,34	1,26	1,21
	1,39	1,17	1,1
	1,31	1,15	1,14
	1,41	1,19	1,19
	1,4	1,15	1,14
	1,31	1,15	1,1
	1,44	1,15	1,08
	1,28	1,15	1,11

continuación

	1,39	1,17	1,08
	1,3	1,15	1,35
	1,44	1,19	1,32
	1,33	1,17	1,12
	1,43	1,15	1,29
	1,41	1,15	1,12
	1,4	1,15	1,28
	1,45	1,17	1,09
	1,33	1,13	1,1
	1,42	1,21	1,12
	1,42	1,15	1,12
	1,33	1,19	1,21
	1,3	1,17	1,16
	1,31	1,17	1,17
	1,35	1,17	1,16
	1,41	1,13	1,08
	1,44	1,17	1,11
	1,28	1,19	1,11
	1,45	1,11	1,12
	1,42	1,17	1,09
	1,41	1,17	1,14
	1,21	1,13	1,12
	1,26	1,15	1,12
	1,25	1,19	1,12
	1,33	1,13	1,09
<b>Erms</b>	<b>0,0769</b>	<b>0,0581</b>	<b>0,0706</b>

**Tabla 4.4.** Mediciones de la forma del tomate.

## Capítulo 5

# Conclusiones

Se cumplió con el principal objetivo de esta investigación el cual fue, clasificar el fruto de tomate por tamaño y por color, usando un sistema de visión por computadora y metrología láser; atendiendo las normas establecidas en México para esos atributos, los cuales son seis colores y tres tamaños.

Para ello se desarrolló algoritmos computacionales en lenguaje C# para el procesado de las imágenes en tiempo real. Se diseñó un sistema opto-mecatrónico el cual constó de los elementos siguientes: cámara webcam, caja con un sistema apropiado de iluminación, fuente de luz estructurada laser, cinta transportadora de fondo oscuro donde son desplazadas las frutas y otras partes mecánicas y electrónicas para la separación de productos por categorías.

Algunos de los aspectos que pueden abordarse como trabajo futuro para el mismo prototipo, son los que se describen enseguida.

En cuanto a los elementos mecánicos, la banda transportadora presentaba problemas de fricción con los tambores de accionamiento, debido al desbalance de tensión de la banda, lo cual generó problemas de atascamiento en diversas ocasiones. Tampoco se logró hacer que la banda se desplazara uniformemente, ya que presentó pequeñas variaciones en cuanto a su ciclo de rotación, este problema afectó en pequeña porción todas las mediciones. Un motor de mayor potencia podría solucionar este problema.

La caja de iluminación requiere mejoras sustanciosas en su diseño, lo cual mejorará en gran medida la medición correcta de todas las variables, ya que se



eliminarían los problemas de sombras que alteran las mediciones y la percepción del color.

La webcam es muy inestable para realizar las mediciones, aunque es aceptable su comportamiento, una cámara industrial lograría grandes mejoras en cuanto a la estimación del color y el procesamiento de la línea de luz.

Otro problema que se abordó fue la optimización en los procesos de software, ya que si se emplea más código que use cantidades de tiempo mayores, el proceso de selección no funciona. En este sentido, la resolución de la imagen juega un papel importante, ya que si se aumenta, también aumenta la confiabilidad del sistema, pero se vuelve más lento el procesamiento, al menos para la cámara y la computadora empleada.

En cuanto a la estimación del color falta realizar el cálculo en toda la superficie de la fruta, pues en esta investigación el color solo se calculó en una cara del tomate.

Un objetivo a futuro es realizar una máquina que pueda aplicarse en la industria, tomando como base el trabajo realizado.

---

## Bibliografía

- Artés-Calero, F., y F. Artés-Hernández. *"Tratamiento postrecolección del tomate fresco, tendencias e innovaciones"*. España: Tomates. Producción y comercio. Ediciones de Horticultura S.L. Reus. 10: 109-120., 2004.
- Atencio, P., Germán Sánchez-T, y John-William Branch. *"Automatic visual model for classification and measurement of quality of fruit: case mangifera indicial"*. Colombia: Dyna. Vol. 76. Num. 170. pp. 317-326, 2009.
- Benalcázar-Palacios, F.G. *"Aplicación de morfología matemática difusa al filtrado de imágenes de resonancia magnética"*. Argentina: Tesis de maestría, Universidad Nacional de Cuyo, 2008.
- Blasco, J., S. Cubero, R. Arias, J. Gómez, F. Juste, y E. Moltó. *"Development of a computer vision system for the automatic quality grading of mandarin segments"*. Lecture Notes on Computer Science. 4478:460-466., 2007.
- Carranza-Gallardo, J. *"Manejo de las fórmulas de diferencias de color vs límites de aceptabilidad"*. Memorias del Simposio de metrología 2002, Centro Nacional de Metrología, México., 2002.
- Chinchuluun, R., W. S. Lee, y R. Ehsani. *"Machine vision system for determining citrus count and size on a canopy shake and catch harvester"*. Applied Engineering in Agriculture. Vol. 25(4): 451-458., 2009.
- Deshpande, S. S., S. Gunasekaran, M. R. Paulsen, y D. K. Salunkhe. *"Nondestructive optical methods of food quality evaluation"*. Crit Rev Food Sci Nutr. 21(4):323-79., 1984.
- Espinosa-Zapata, Carlos. *"Producción de tomate en invernadero"*. Torreón, Coah., México: Memorias del IV Simposio Nacional de Horticultura. Invernaderos: Diseño, Manejo y Producción, 2004.
- Fang, J., C. Zhang, y S. Wang. *"Application of genetic algorithm (ga) trained artificial neural network to identify tomatoes with physiological diseases"*. IFIP International Federation for Information Processing, Volume 259; Computer and Computing Technologies in Agriculture, Vol. 2; Daoliang Li; (Boston: Springer), pp. 1103-1111., 2008.

- Feng, G., C. Qixin, y N. Masateru. "*Fruit detachment and classification method for strawberry harvesting robot*". International Journal of Advanced Robotic Systems, Vol. 5, No. 1. ISSN 1729-8806, pp. 41-48., 2008.
- Feng, G., y C. Qixin. "*Study on color image processing based intelligent fruit sorting system*". Proceedings of the 5th. World Congress on Intelligent Control and Automation. June 15-19., 2004.
- Fideicomisos Instituidos en Relación a la Agricultura del Banco de México. FIRA. "*Agricultura protegida: cultivo de tomate en invernadero, costos de producción y análisis de rentabilidad 2006*". México: Informe, 2007.
- Fondo de Capitalización e Inversión del Sector Rural. FOCIR. "*Producción de tomate en invernadero en México: un negocio competitivo y en expansión*". México: Informe, 2008.
- Gasvik, K.J. "*Optical metrology*". 3a. U.K.: Wiley, 2002.
- Giró, Salvador. "*Visión artificial en la industria alimentaria*". Informe, Grupo Infaimon, 2009.
- Gobierno del Estado de Morelos. "*Boletín 327*". Morelos, México: [ consultado julio 2010 ] Disponible en: [http://e-morelos.gob.mx/00noticias/boletin\\_completo.php?id=388](http://e-morelos.gob.mx/00noticias/boletin_completo.php?id=388), 2007.
- González, R.C., y R.E. Woods. "*Tratamiento digital de imágenes*". E.U.A.: Addison-Wesley Iberoamericana, S.A., 1996.
- Hill, B., Th. Roger, y F.W. Worhagen. "*Comparative analysis of the quantization of color spaces on the basis of the Cielab color-difference formula*". ACM Transactions on Graphics, Vol. 16, No. 2. Pages 109–154., 1997.
- Mendoza-Vilcarromero, F.A. "*Characterization of surface appearance and color in some fruits and vegetables by image analysis*". Chile: Tesis de doctorado, Pontificia Universidad Católica de Chile, 2005.
- Mirzaei, H., y M. Saraee. "*A new and robust apple evaluation method using image processing*". Iran: First Joint Congress on Fuzzy and Intelligent Systems, Ferdowsi University of Mashhad, 2007.
- Muñoz-Rodríguez, A. "*Laser imaging and approximation networks for calibration of three-dimensional vision*". Opt. Laser Technol., doi:10.1016/j.optlastec.2010.05.020, 2010.
- Muñoz-Rodríguez, A., A. Asundi, y R. Rodríguez-Vera. "*Shape detection of moving objects based on a neural network of a light line*". Optics Communications Vol.221. pp. 73–86, 2003.
- Muñoz-Rodríguez, A., y R. Rodríguez-Vera. "*Aplicación de operaciones morfológicas a una línea de luz para reconstrucción 3-D de objetos*". CIC-IPN, ISSN 1405-5546. Computación y Sistemas. Vol. 6. No.1. pp. 005-012, 2002.

- 
- Muñoz-Rodríguez, J.A. *"Avances en la detección 3D por proyección de una línea de luz"*. León, Gto. México: Tesis, Centro de Investigaciones en Óptica, 2001.
- Muñoz-Rodríguez, J.A., A. Asundi, y R. Rodríguez-Vera. *"Recognition of a light line pattern by Hu moments for 3-D reconstruction of a rotated object"*. Optics & Laser Technology (37 ) 131 – 138., 2005.
- Nagata, M., J. Tallada, F. Ishino, Y. Gejima, y S. Kai. *"Estimation of tomato ripening stages using three color models"*. Japón: Bulletin of the Faculty of Agriculture, University of Miyaki, 2004.
- Norma mexicana para diametro de frutas. *"NMX-FF-009-1982.Productos alimenticios no industrializados para consumo humano - Fruta fresca - Determinación del tamaño en base al diámetro ecuatorial."*. México: [ consultado julio 2010 ] Disponible en: <http://www.economia-nmx.gob.mx/normasmx/index.nmx>, 1982.
- Norma mexicana para tomate. *"NMX-FF-031-1997-SCFI. Productos alimenticios no industrializados para consumo humano- Hortalizas frescas- Tomate (Lycopersicon esculentum Mill)- Especificaciones"*. México: [ consultado julio 2010 ] Disponible en: <http://www.economia-nmx.gob.mx/normasmx/index.nmx> , 1998.
- Ortiz-Zamora, F.G. *"Procesamiento morfológico de imágenes en color. Aplicación a la reconstrucción geodésica"*. España: Tesis doctoral. Universidad de Alicante, 2002.
- Pajares-Martinzans, G., y J. de la Cruz-García. *"Visión por computador"*. 2da. México: Alfaomega Grupo Editor, S.A de C.V., 2008.
- Peña, D. *"Análisis de datos multivariantes"*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana, 2002.
- Pérez-Marcial, J. *"Momentos wavelet del tipo B-spline cúbicos para clasificación de objetos"*. Puebla: Tesis de licenciatura, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 2005.
- Pla, F., J. Calpe, y J. Monfort. *"Procedimiento y dispositivo para clasificación cromática de frutas"*. Oficina Española de Patentes y marcas. Patente 9601489, 1999.
- Pla, F., y F. Juste. *"An approach to citrus vision systems in robotic harvesting"*. On-Machine Vision Systems for Agricultural and Bio-Industries, Ed. G. Rabatel, ISBN 2-85362-297-7, pp. 47-59, 1991.
- Pratt, W.K. *"Digital image processing"*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- Riquelme-Torres, M.T. *"Transmisión óptica e imagen en invisible infrarrojo en frutas, ensayo de equipos comerciales"*. España: Tesis, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, 2008.

- 
- Sadrnia, Hassan, Ali Rajabipour, Ali Jafary, Arzhang, Javadi Javadi, y Younes Mostofi. "Classification and analysis of fruit shapes in long type watermelon using image processing". Iran: International Journal of Agriculture and Biology 9(1):68-70, 2007.
- Sampallo, G.M., y A.O. González-Thomas. "Cálculo de descriptores de calidad de frutas esferoidales mediante procesamiento digital de imágenes". 37º JAIIO - Jornadas de Inf. Ind. - Agroinformática (JII 2008 Agroinfo), pp. 180-189., 2008.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. SAGARPA. "Mas allá de nuestro campo". México: Reporte, 1998.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. SIAP. "Anuario estadístico de la producción agrícola". México: Reporte, 2010.
- Simões, A.S., A.H. Reali-Costa, A.R. Hirakawa, y A.M. Saraiva. "Applying neural networks to automated visual fruit". Pp. 1-7 in Proceedings of the World Congress of Computers in Agriculture and Natural Resources (13-15, March 2002, Iguacu Falls, Brazil) 701P0301., 2002.
- Sirisathitkul, Y., N. Thumpen, y W. Puangtong. "Automated Chokun orange maturity sorting by color grading". Tailandia: Walailak J Sci & Tech 3(2):195-205. 1023, 2006.
- Somatilake, S., y A.N. Chalmers. "An image-based food classification system". Nueva Zelanda: Proceedings of Image and Vision Computing New Zealand 2007, pp. 260-265., 2007.
- Sonka, M., V. Hlavac, y R. Boyle. "Image processing, analysis, and machine vision". 3a. E.U.: Thomson, 2008.
- Subsecretaría de Agricultura de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. SAGARPA. "Programa de Ejecución directa 2009, Agricultura Protegida". México: Reporte, 2009.
- Sudhakara-Rao, P., A. Gopal, R. Revathy, y K. Meenankshi. "Colour analysis of fruits using machine vision system for automatic sorting and grading". India: J. Instrum. Soc. 34(4), 2004.
- Sundhakara, R., y S. Renganathan. "New approaches for size determination of apple fruits for automatic sorting and grading". Iranian Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol. 1, No. 2, 2002.
- Trucco, E., y A. Verri. "Introductory techniques for 3-D computer vision". New Jersey: Prentice-Hall, 1998.
- Urrestarazu-Gavilán, Miguel. "Tratado de cultivo sin suelo". 3a. Barcelona, España: Mundi Prensa, 2003.

- 
- Valero-Ubierna, C. *"Aplicación de la espectroscopía laser de reflectancia difusa (ERDT) a la medida de calidad interna de frutas y hortalizas"*. Madrid: Tesis. Departamento de Ingeniería Rural, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos., 2001.
- Ying, Y., H., Tao, Y. Jing, y N. Zhang. *"Detecting stem and shape of pears using Fourier transformation and an artificial neural network"*. Transactions of the ASAE. Vol. 46(1): 157-162, 2003.
- Youngbae, H., K. Jun-Sik, y K. In-So. *"Change detection using a statistical model in an optimally selected color space"*. Computer Vision and Image Understanding. (112) 231-242, 2008.
- Zapata, L., L. Gerard, C. Davies, L. Oliva, y M. Schwab. *"Correlación matemática de índices de color del tomate con parámetros texturales y concentración de carotenoides"*. Argentina.: Ciencia, Docencia y Tecnología, vol. XVIII. Num. 034. Universidad Nacional de entre Rios, 2007.
- Zheng, Chaoxin, y Da-Wen Sun. *"Object measurement methods"*. En Da-Wen Sun (Ed). Computer vision technology for food quality evaluation (pp. 57 - 80 ). Elsevier., 2008.