

DETERMINACIÓN DE MADUREZ DEL TOMATE (*SOLANUM LYCOPERSICUM*) MEDIANTE EL USO DE UN SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL CONTROLADO

Godínez García Francisco J., Martínez Rivera José A., Guerrero Rivera Rubén., Gamero Inda Eduardo.,
Reyes Venegas Manuel A.

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Durango.

Maestría en Ingeniería.

Felipe Pescador #1803 Ote. C. P. 34080 Durango, Dgo., México Tel. 618 829 0900,

fgodinez@itdurango.edu.mx, frangoga44@hotmail.com

RESUMEN.

El presente trabajo permite determinar la madurez del tomate (*solanum lycopersicum*), mediante el uso de un sistema controlado de visión artificial. Para el estudio e identificación de la calidad de las muestras de tomate son considerados el color, el tamaño y posibles imperfecciones. El método de detección se realiza mediante el diseño de un algoritmo en Matlab que calcula las poblaciones de los datos para n columnas y m renglones, dos cámaras de alta resolución, un sistema de posicionamiento angular controlado y métodos estadísticos para determinar la eficacia del método. Para el estudio fueron determinados los valores de las componentes de color R, G, B, así como los canales AB de la descomposición L^*a^*b , empleando una técnica de clasificación "thresholding". Los resultados, muestran como la descomposición L^*a^*b mejora la clasificación de los tomates ya que existe un desplazamiento y contraste notorio en los histogramas conforme este cambia su coloración.

Palabras clave: Invernadero, Tomate, visión artificial, sistema controlado.

ABSTRACT.

The present work allows to determine the maturity of the tomato (*solanum lycopersicum*), using a controlled system of artificial vision. For the study and identification of the quality of tomato samples, color, size and possible imperfections are considered. The detection method is performed by designing an algorithm in Matlab that calculates the data populations for n columns and m lines, two high resolution cameras, a controlled angular positioning system and statistical methods to determine the effectiveness of the method. For the study, the values of the color components R, G, B, as well as the AB channels of the L^*a^*b decomposition were determined, using a thresholding classification technique. The results show how the decomposition L^*a^*b improves the classification of tomatoes since there is a noticeable displacement and contrast in histograms as this changes its color.

Key words: Greenhouse, Tomato, artificial vision, controlled system.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las frutas más conocidas en todo el mundo y de mayor valor económico es el tomate, su demanda se incrementa continuamente y con ella su cultivo, producción y comercio [1]. México, ocupa el décimo lugar en la producción de tomate rojo a nivel mundial (FAO). A pesar de la importancia que representa incrementar la producción del tomate dentro y fuera del país, existen factores que evitan elevar su comercialización ya que es necesario mejorar las condiciones de cultivo, así como contar con técnicas de inspección eficientes al momento de su selección. El tomate (*Solanum Lycopersicum*), forma parte de la familia de las Solanáceas y es una planta perenne de porte arbustivo que se despliega en forma rastrera, semierecta o erecta. Existen variedades de crecimiento limitado (determinadas) y

otras de crecimiento ilimitado (indeterminadas). Su importancia en el contexto económico del país reside en la aportación de divisas y en la generación de empleos en todas y cada una de las fases de la cadena agroalimentaria. La variedad más significativa de tomate producida en México es el tomate rojo saladete de Sinaloa, con un 40% de la producción total del país, seguido por Baja California Norte. En el estado de Durango se producen aproximadamente 32,000 toneladas, de los cuales un alto porcentaje es cultivado en invernaderos donde son controlados los factores de crecimiento más relevantes que definen su calidad. Los principales productores del estado son el municipio de Lerdo con 11,194 toneladas y el municipio de Tlahualilo con 5,850 toneladas, pero en la actualidad se ha incrementado su cultivo en zonas donde se aplica agricultura protegida. El desarrollo de este trabajo, tiene como propósito detectar la madurez del tomate, mediante técnicas de visión artificial controlada, ya que en la actualidad las máquinas seleccionadoras de tomate, solamente identifican los factores de madurez por su tamaño y su color, pero no existe un método que permita identificar imperfecciones o deformaciones a causa de una mala polinización que pudiera presentarse durante el desarrollo de la planta en el interior del invernadero y que al momento de llevarlo a la máquina seleccionadora automatizada no es detectada su existencia. Por tal motivo, este trabajo pretende dar valor agregado al producto al momento de su selección, incrementando su comercialización con respecto a otros métodos. Así pues, es transcendental determinar el grado de calidad del tomate mediante técnicas y métodos de vanguardia, que permitan determinar sus propiedades o su morfología; para lograr este objetivo fue diseñado un sistema de visión artificial controlado, utilizando dispositivos electrónicos y mecánicos que permiten posicionar angularmente la cámara de alta resolución para efectuar la captura de las imágenes en puntos equidistantes del contorno del espécimen en estudio, logrando con ello enriquecer las bases de datos generadas. Posteriormente, las imágenes son tratadas en las fases de adquisición, procesamiento e identificación para definir la calidad del tomate mediante un método estadístico. Estudios previos en visión artificial [2], han demostrado una certeza del 86% de efectividad en el análisis y caracterización de superficies orgánicas, mientras que otros autores [3], con su investigación han determinado de manera satisfactoria la madurez de las frutas por medio de procesamiento de imágenes y redes neuronales, obteniendo una certeza de hasta el 97.98%. En la industria de alimentos la utilización de la técnica por visión artificial [4], ha permitido clasificar el producto conforme a su tamaño, color y forma. Un método para detectar los niveles de

madurez (verde, naranja y rojo), de tomates de la variedad roma fue llevado a cabo utilizando una técnica de clasificación mediante redes neuronales (BPNN) [5], donde las imágenes del tomate fueron tratadas mediante procesamiento de imágenes para definir el color y los valores de las subregiones fueron importados a la red neuronal para identificar la madurez de las muestras. En la actualidad se ha optado por utilizar tecnología óptica como herramienta no destructiva para la determinación de diversos atributos físicos en el tomate y se ha utilizado la tecnología NIRS (espectroscopia de reflectancia en el infrarrojo cercano), para 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. 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 que utilizan análisis ópticos en el rango visible [6], la tecnología NIRS es aplicada principalmente en frutas y hortalizas, para 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. Un método basado en filtros Gabor [7], muestra que son especialmente efectivos para determinar la textura en objetos biológicos y han sido utilizados ampliamente en biométrica y segmentación de imágenes ya que actúan como un filtro pasa banda sensible a la frecuencia y al tiempo, obteniendo la fase de adquisición de datos desde varias muestras de hojas de tomate infectadas que son recopiladas de diferentes granjas mediante una cámara Sony de 14 MP para después realizar una etapa de pre-procesamiento en la cual se extrae el ruido blanco de las imágenes y finalmente segmentarlas para realizar la etapa de filtrado y clasificación.

2. METODOLOGÍA

2.1. Diseño del estudio

Para el desarrollo de este trabajo es utilizado el procesamiento digital de imágenes con la finalidad de caracterizar la madurez en tomate, tomando en consideración que el color de la piel del tomate varía conforme cambia su madurez [8]. Para lograrlo fueron llevadas a cabo las etapas de adquisición, segmentación, procesamiento y análisis de las imágenes [9]. El procesamiento fue realizado mediante la adquisición de las imágenes de las muestras en condiciones ambientales controladas (adquisición), eliminando el ruido presente en la imagen y mejorando su calidad (preprocesamiento), por medio de software fue eliminado el fondo de la imagen separándolo de la región o zona de interés (Segmentación) y una vez examinadas las muestras elegidas para su estudio, los datos resultantes desde la imagen fueron analizados en color, contorno, superficie y luminosidad (Procesamiento), para posteriormente ser evaluados en función a la calidad de las muestras de tomate (Análisis) [10].

2.2. Adquisición de imágenes

Para este propósito, fue diseñado un sistema mecánico-eléctrico de precisión, que permite la adquisición de las imágenes del método propuesto bajo condiciones controladas de movimiento de la cámara, iluminación, así como del desplazamiento angular

del plato giratorio donde son colocadas las muestras de tomate para su examinación, mostrado en la figura 1.

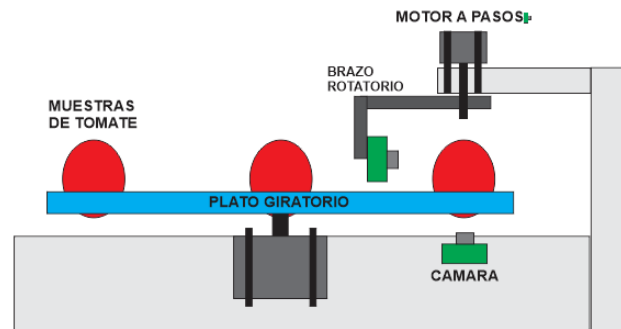


Figura 1. Sistema controlado para examinación de las muestras de tomate

El sistema cuenta con iluminación frontal y de fondo adaptables para que la iluminación entre la toma de muestras sea lo más homogénea posible. Una vez colocado el tomate, de forma automatizada son obtenidas 12 imágenes desde 6 diferentes ángulos (dos imágenes cada 60 grados de circunferencia del tomate) y 2 imágenes del pedículo para cada muestra de tomate diariamente durante un periodo de 30 días por medio de una cámara de 8 Megapíxeles, de 3264*2448, obteniendo una muestra de 14400 imágenes de la superficie del tomate y 2400 del pedículo.

Inicialmente, dos muestras de tomate con un nivel de maduración y calidad cuasi-óptimos fueron elegidas, para ser utilizadas como muestras de control (referencia), mientras que un total de 40 muestras de tomate fueron seleccionadas aleatoriamente para el estudio y conservadas en anaquel bajo ambiente controlado durante los 30 días de su examinación para la adquisición de los datos. La información almacenada en la base de datos fue tratada estadísticamente, de manera tal, que por cada muestra examinada diariamente fue determinado su valor promedio del total de los 6 puntos para tener un registro uniforme de los posibles cambios de coloración en todo su contorno para el total de 360°, asegurando con ello posibles cambios irregulares en el color de la muestra en el transcurso del tiempo.

2.3. Pre procesamiento.

Las imágenes obtenidas fueron mejoradas en calidad, para resaltar características que permitan una adecuada caracterización de las muestras de tomate. Para esto fue eliminado el ruido, adecuando un fondo homogéneo y resaltando las características del espécimen en estudio. Las imágenes fueron suavizadas para reducir el brillo producido por la cámara, utilizando un filtro de convolución de promedios móviles de 3x3, 5x5 y 7x7, para realizar pruebas con diferentes valores durante la difuminación o eliminación del brillo para ser importadas a MATLAB. Posteriormente, fue necesario pre-procesar las imágenes para mejorar la calidad de estas, ya que la adquisición de imágenes, es un proceso no determinista en el que interactúan diferentes causas aleatorias, en las que una imagen capturada resultante, $g(x,y)$ es el resultado de la suma entre la imagen ideal, $f(x,y)$, y el ruido blanco $r(x,y)$.

$$g(x,y) = f(x,y) + r(x,y) \quad (1)$$

Debido a que existe un ambiente controlado en iluminación, fondo y movimiento nulo en la adquisición de imágenes, se puede reducir la influencia del ruido en la imagen final mediante múltiple toma fotográfica sucesiva del mismo objeto.

El ruido es eliminado al efectuar un promedio de las imágenes, ya que la suma de la variable aleatoria generada da origen a una nueva función de densidad probabilística de carácter normal de media nula y varianza decreciente con el número de muestras:

$$N\left(0, \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) \quad (2)$$

El promedio de varias imágenes capturadas tomadas consecutivamente permite reducir el ruido sin tener que utilizar un filtro, evitando así la pérdida de detalles finos.

2.4. Segmentación

En este proceso se identificaron las regiones que conforman la imagen para separar las regiones de interés del fondo utilizado. El método de segmentación utilizado en esta investigación es el de "thresholding", el cual consiste en segmentar los objetos sólidos que poseen un contraste diferente al contraste de fondo imponiendo un valor de frontera entre el fondo y el objeto de interés. El valor de frontera (threshold) se puede obtener a partir de los histogramas de los canales de color de la imagen, que permiten identificar la distribución de los colores en el espectro y distinguir claramente las muestras homogéneas de aquellas que no presentan homogeneidad en el histograma. Los picos en el histograma indican los valores de cada canal en donde predomina tanto el objeto de interés, como el fondo, tanto para los tomates rojos como los verdes, con lo cual se pueden determinar los umbrales para cada componente de color, usando los valores promedio para cada componente.

Para la segmentación, a cada píxel del fondo se le asignó un valor RGB de $[0,0,0]$, mientras que los píxeles del objeto de interés fueron recalculados con una función de ganancia gamma de 1.2, esto para resaltar aún más su contorno. Para analizar las características superficiales de los tomates, fueron considerados los canales AB y facilitar el análisis desde el histograma para los canales de la imagen del tomate (objeto de interés) y separarlo del fondo de la imagen, encontrando un valor de umbral " T " que separe los grupos de valores. Para cualquier píxel en (x,y) si $f(x,y) \geq T$ el píxel corresponde al objeto de interés (RGB $[255,255,255]$), de lo contrario, el píxel se asigna al fondo (RGB $[0,0,0]$). Es decir, para los píxeles de los componentes de color rojo o verde, $T_{RG}=50$, en tanto que, para los píxeles del componente azul, $T_B=180$. Cuando ambos valores de umbral son excedidos, el píxel corresponde al objeto, de lo contrario, es asignado al fondo.

2.5. Procesamiento

Una vez segmentada la imagen, esta es procesada de dos maneras, la primera en escala de grises, esto con el objetivo de analizar la superficie del tomate por medio de una matriz de coocurrencias para determinar las diferencias de contraste en la misma y localizar regiones con parámetros de textura diferentes o no homogéneos que indiquen posibles daños físicos en el tomate.

Por último, se separan los componentes R , G y B de cada imagen además de descomponer las imágenes en sus componentes Lab , empleando tanto los componentes RGB como los canales A y B , para determinar el nivel de maduración del tomate con respecto a las muestras de control.

2.6. Análisis

Para determinar el nivel de maduración de las muestras, es comparada la saturación de los píxeles rojos con respecto a los verdes, mientras que los azules pueden ser despreciados. Una vez obtenida esta relación, se aplica un análisis estadístico de cada muestra en función a la maduración a través del tiempo. Además, para determinar si el tomate tiene algún daño físico, se analiza la homogeneidad de la imagen, la cual debe ser primordialmente uniforme, sin embargo, esta uniformidad se vería afectada en caso de encontrar zonas irregulares por causa de algún defecto.

Por último, con la base de datos generada y almacenada mediante las imágenes procesadas, es posible realizar un análisis estadístico de las características de las muestras de tomate para determinar la calidad de estas y la duración de anaquel en diferentes etapas de maduración.

3. RESULTADOS

Diariamente fueron capturadas 2 imágenes (figura 2), con una diferencia en tiempo de poco menos de 1 segundo cada 60° de rotación por muestra de tomate, haciendo un total de 12 imágenes diarias por cada tomate examinado haciendo uso del sistema controlado para el posicionamiento de las muestras para la adquisición de las imágenes con la cámara de alta resolución. Una vez capturadas las imágenes, estas fueron procesadas digitalmente para eliminar el "ruido blanco". Durante los experimentos, las muestras de tomate ya examinadas, fueron mantenidas a una temperatura de $10^\circ C$ con iluminación regulada durante todo el periodo de pruebas. En los resultados generados diariamente, es posible apreciar una mejora en la calidad de la imagen y una leve mejora en la nitidez de la imagen tal como se observa en las figura 2 y figura 3. Esta información puede ser útil para procesos posteriores de filtrado mediante el uso del toolbox para procesamiento de imágenes de Matlab.

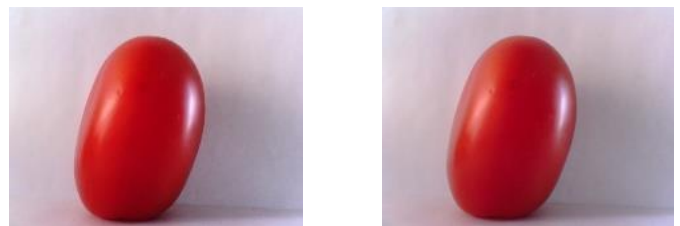


Figura 2. Imágenes obtenidas de un tomate en el mismo Angulo con 1 segundo de diferencia.



Figura 3. Imagen resultante después de restar el ruido blanco y combinar ambas imágenes.

Mediante el pre procesamiento de las imágenes, fue posible obtener el histograma de color para el reconocimiento de la frecuencia de aparición de color en los pixeles de la imagen, tal como se muestra en la figura 4 y figura 5.

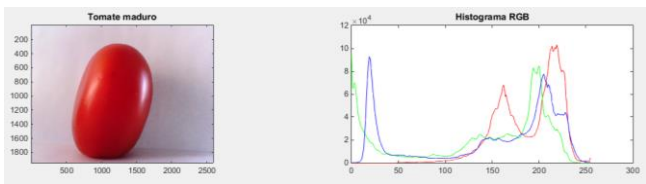


Figura 4. Histograma correspondiente a un tomate maduro.

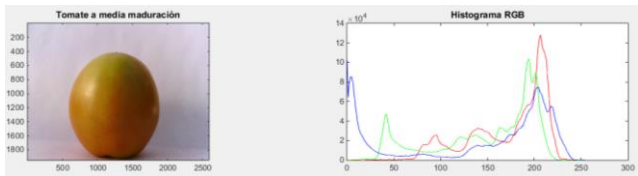


Figura 5. Histograma correspondiente a un tomate a media maduración.

En la figura 4, se pueden observar concentraciones más altas en el canal R lo que indica que hay zonas del tomate con altos niveles de color rojo, como un indicador de madurez alta, mientras que en la figura 5, la concentración de pixeles verdes y rojo es más homogénea, indicando que el tomate tiene un proceso de maduración medio. También se puede observar que el canal azul y el canal verde están muy relacionados entre sí, de manera tal que el procesamiento se evaluó para los colores rojo y verde. Para determinar el nivel de maduración del tomate, fueron comparadas las saturaciones entre colores rojo y verde, dando resultados de maduración proporcionales a las variaciones de predominio de color rojo en la superficie del tomate, mientras que entre mayor sea la concentración de color verde en la superficie del tomate menos maduro estará. En la tabla 1 se puede observar que existen diferentes grados de madurez que van del grado 1 al 5, para la relación de color con respecto a la madurez del total de muestras de tomates examinados.

Tabla 1. Grado de maduración de tomates recolectados para el estudio.

Grado de madurez	Color (%)	
	Verde	Rojo
1	100	00
2	75	25
3	50	50
4	25	75
5	00	100

En la figura 6 se muestra la descomposición de los canales G y R de dos muestras de tomate distintas, la primera con una coloración roja de entre 98 y 100% (grado de madurez 4 - 5) y la segunda con una coloración roja de aproximadamente el 65% (grado de madurez 3), en ella se puede apreciar la falta de coloración verde respecto a la primer muestra y saturaciones de intensidad de color más parecidas en la segunda imagen procesada, indicando que aún está en proceso de maduración. Por otra parte, es posible identificar para cada grupo de muestras, que a medida que el tomate va madurando, existe un desplazamiento y cambio de área en los histogramas resultantes.

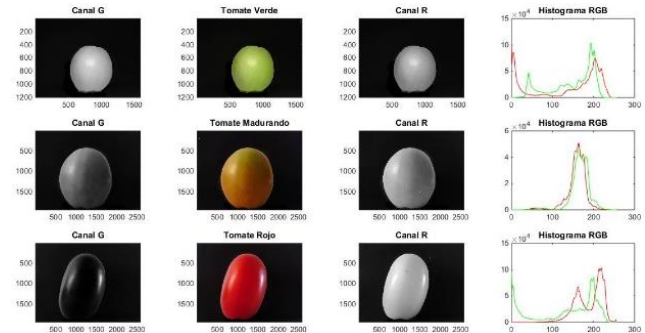


Figura 6. Descomposición de las muestras en canales G y R

Mediante la aplicación del método y la evaluación de los datos provenientes de los 40 tomates examinados, fue posible registrar el tiempo en el cual el tomate tarda en pasar del grado 1 hasta el 4, estos resultados son mostrados en la tabla 3.

Tabla 3. Valores límite de maduración para periodo de 30 días

Grado de maduración	Tiempo hasta maduración
1	19 – 22 días
2	14 – 16 días
3	7 – 9 días
4	5 – 8 días

Con la aplicación del sistema de gestión de color *Lab*, tomado como referencia de color para transformar un color de forma predecible de un espacio de color a otro. Fue posible ajustar la componente de luminosidad (*L*) con una variación en el rango de 0 a 100, para la obtención de los contrastes para las componentes *a* (eje verde-rojo) y *b* (eje azul-amarillo).

En la figura 7, se puede observar que las concentraciones en los canales *a* y *b*, definen claramente las diferencias entre los niveles de contraste como un resultado de la madurez del tomate, indicando que el tomate tiene un proceso de maduración medio, ya que existe una tendencia de desviación hacia la izquierda o derecha en el histograma, según el grado de madurez del tomate, tal como se muestra en la figura 8.

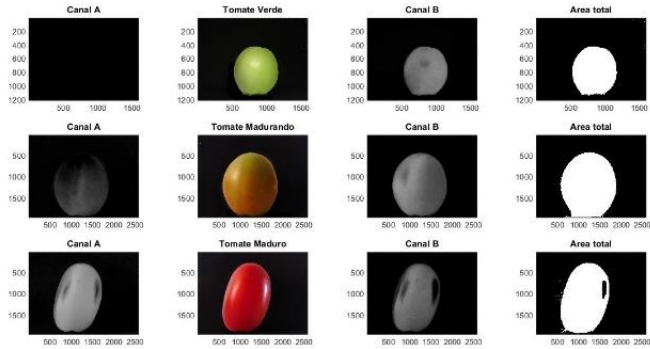


Figura 7. Descomposición de las muestras en canales A y B

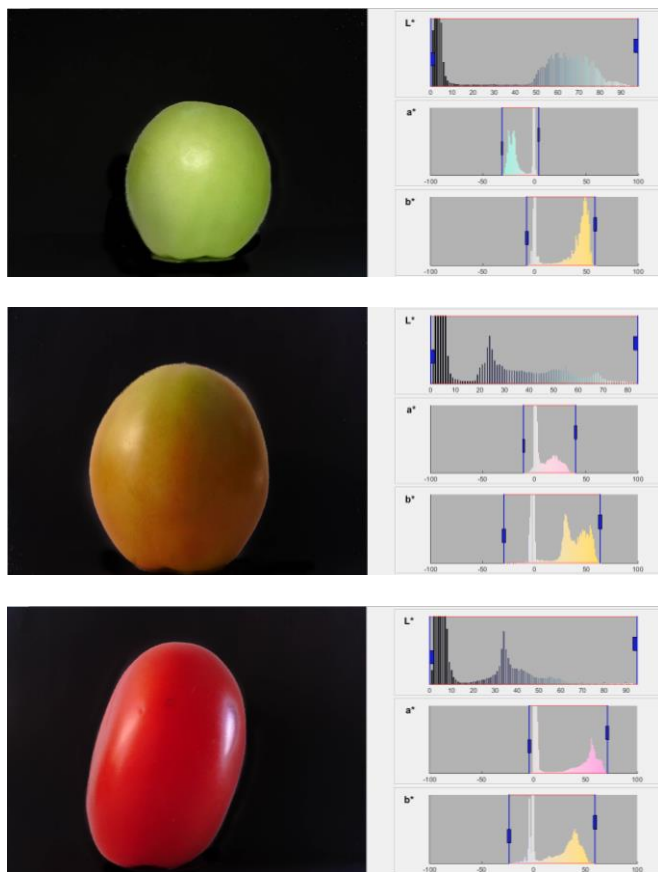


Figura 8. Histogramas para canales A y B, mostrando la tendencia.

CONCLUSIONES

El análisis muestra que la caracterización de las propiedades físicas del tomate pueden ser medidas, evaluadas y clasificadas a través de un sistema de visión artificial y procesamiento digital de imágenes, esto debido a que se obtuvieron resultados favorables en la determinación del cambio en la coloración de

las muestras a través del tiempo, pudiendo ser analizado el proceso de maduración de las muestras para obtener el tiempo aproximado de vida de anaquel y el grado de calidad del producto.

El algoritmo desarrollado fue capaz de diferenciar las diferentes coloraciones del grado de madurez del tomate mediante el modelo tipo Lab, ya que mejora la respuesta en los canales *a* y *b* para la definición de cambios en las imágenes y permite establecer un verdadero cambio en la coloración del tomate, ya que el valor de L^* disminuye a medida que los tomates maduran y se vuelven rojos porque la síntesis de carotenoides y la pérdida de color verde reducen el brillo de la fruta [11].

Los datos obtenidos pueden ser utilizados como base para proyectos de clasificación y discriminación a futuro dado a que se pueden seleccionar límites de banda para las coloraciones que indican el nivel de maduración del tomate.

La implementación de este tipo de sistemas de inspección de calidad y clasificación por calidad aumentan el valor del producto, dado que aseguran una calidad homogénea según su clasificación y coloración reduciendo el error humano ya que el tomate es una fruta que madura con la edad y cosecharla en la etapa de color rojo claro representa el valor óptimo de la productividad [12].

REFERENCIAS

- [1] DIEES. *Panorama Agroalimentario - Tomate 2016*. FIRA, 2016.
- [2] N. Alavi. *Date grading using rule based fuzzy interference system*. J. Agric. Technol. 2012, 8(4): 1243-1254.
- [3] J. Jhawar. *Orange sorting by applying pattern recognition on color image*. Int. Conf. Inf. Sec. Pryvací, 691-697. 2016.
- [4] C. Sánchez., N. Arizcuen., J. Abril. *Importancia de la visión artificial aplicada a la industria agroalimentaria*, 2014.
- [5] W. Peng., A. Toudeshiki., H.Tan., & R. Ehsani. *A methodology for fresh tomato maturity detection using computer vision*. Huazhong Agricultural University, 2018.
- [6] O. Rosario. *Sistema para la Clasificación de Jitomates basado en metrología laser y algoritmos computacionales*. León, Guanajuato, México, 2010.
- [7] A. E. Hassanien., T. Gaber., U. Mokhtar., & H. Hefny. *An improved moth flame optimization algorithm based on rough sets for*. Science Direct, 2017, 86-96.
- [8] S. L. Molyneux., C. E. Lister., G.P. Savage. *An investigation of the antioxidant properties and colour of glasshouse grown tomatoes*. Int. J. Food Sci. Nutr. 2004, 55:537-545.
- [9] R. Gonzales., & R. Woods. *Digital Image Processing (Third edition)*. New Jersey: Prentice Hall, 2006.
- [10] K. Plataniotis. *Color image processing and applications*. Berlin: Springer-Verlag, 2000.
- [11] W. Carvalho., M. Fonseca., H. R. Silva., L.S. Boiteux., L.B. Giordano. *Estimativa indireta de teores de licopeno em frutos de genótipos de tomateiro via análise colorimétrica*. Hortic. Bras., 2005, 23:819-825.
- [12] V.C. Caron., M.A. Tessmer., S.C. Mello., A. P. Jacomino. *Quality of mini tomatoes harvested at two maturity stages and kept chilled in three packages*. Hortic. Bras., 2013, 31:279-286.