



Universidad Autónoma de Querétaro  
 Facultad de Ingeniería  
 Maestría

Monitoreo de la Calidad del Tomate en Invernadero  
 Mediante Análisis de Imágenes

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
 Maestra en Ciencias (Recursos Hídricos y Ambientales)

**Presenta:**  
 I.Q. Ana Gabriela Castañeda Miranda

**Dirigido por:**  
 Dra. Klavdia Oleschko Lutkova

**SINODALES**

Dra. Klavdia Oleschko Lutkova  
 Presidente

Firma

M. en C. Juan José García Escalante  
 Secretario

Firma

Dr. Carlos Fuentes Ruiz  
 Vocal

Firma

Dr. Gilberto Herrera Ruiz  
 Suplente

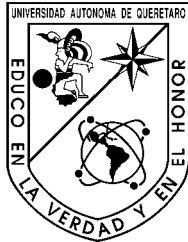
Firma

M. en C. Vianey Torres Argüelles  
 Suplente

Firma

Dr. Gilberto Herrera Ruiz  
 Director de la Facultad

Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval  
 Director de Investigación y  
 Posgrado



**Universidad Autónoma  
de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ciencias**

Monitoreo de la Calidad del Tomate en Invernadero Mediante  
Análisis de Imágenes

**TESIS:**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

**Maestría en Ciencias  
(Recursos Hídricos y Ambientales)**

**Presenta:**

I.Q. Ana Gabriela Castañeda Miranda

**Dirigido por:**

Dra. Klavdia Oleschko Lutkova

Centro Universitario, Querétaro, Qro. Julio 2008

## Resumen

El objetivo de este estudio fue seleccionar y calibrar un conjunto de técnicas no destructivas para el monitoreo de la calidad de tomates a partir de las imágenes digitales multi-escalares. El sabor del tomate está determinado por el contenido de sólidos solubles totales (SST) y pH. Las prácticas de monitoreo de SST tradicionales que se manejan a lo largo del proceso productivo son destructivas limitadas por dificultades técnicas, tiempo de monitoreo y costo de mano de obra. Los sensores de SST y otros atributos que se utilizaron en el presente estudio se basan en las técnicas no destructivas del análisis: exploración electromagnética pasiva (imágenes digitales) y activa. Se calibró un nuevo método estadístico preciso y exacto para visualizar la variabilidad de las imágenes de tomate a partir de las PDF (funciones de densidad de probabilidad) y se estableció la relación entre el color de la superficie del tomate, rugosidad, SST, pH y algunos otros parámetros. Los resultados documentan que PDF es una función estadística apta para extraer la rugosidad de las imágenes de tomate, lo cual puede ser utilizado para definir la fecha de corte óptima del fruto con base en sus propiedades intrínsecas así como la morfología de su superficie.

**Palabras Clave:** *Calidad del Tomate, Rugosidad, Espacio de Color, Métodos no-destructivo de medición.*

## Summary

The goal of this study was to design a non-destructive technique to monitor certain physical and chemical properties of the tomato fruit (*Lycopersicon esculentum*) such as surface roughness, pH, total soluble solids (TSS), color (in CIE Lab space) from multispectral digital images. The tomato fruit flavor is determined by the contents of TSS and pH. Common TSS monitoring practices during the productive process are destructive and fall short due to technical difficulties, monitoring time and labor costs. Sensors for measuring TSS and pH need to be based on non-destructive analysis techniques: passive and active electromagnetic scanning. A precise and exact statistic method to determine the variability of tomato fruit images from probability density functions (pdf's) was found and a relationship between the tomato fruit surface color and the aforementioned properties was established. Results prove that pdf's are a proper statistical tool for determining the surface roughness from the tomato fruit images which in turn can be used to select the most efficient harvesting date.

**(Key words:** Tomato quality, Color space, Roughness, Non destructive measurements methods)

**Dedico este trabajo:**

A mi madre **Ma. Victoria Miranda Escalera**, por el cariño que todos los días me brinda y que es motivación en todas las cosas que hago.

A mi padre **José Amador Castañeda García** por ser siempre la persona que me impulsa a seguir adelante.

A mis hermanos **Alejandro, Rodrigo, Celina y Victor**, por el apoyo, la confianza y sobre todo por los momentos felices que me brindan y que han hecho más fácil esta etapa de mis estudios.

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, por concederme todos y cada uno de mis deseos.

A la Dra. Klavdia Oleschko por su confianza, apoyo constante y excelente asesoría.

A mi amigo y asesor Juan José García Escalante, por sus asesorías y por todo el tiempo que me ha regalado para mi mejor preparación profesional.

A mis compañeros Vianney Torres, Claudia Gaona y Sergio Zamora por su apoyo y consejos que siempre han sido muy oportunos.

A Roberto Gómez, por su gran respaldo y amistad.

Al Dr. Gilberto Herrera por su apoyo y confianza en mi trabajo académico.

Al personal del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) dirección centro regional INIFAP.

Al CONACYT por el apoyo institucional y económico recibido para la realización de mis estudios de maestría.

## ÍNDICE

	<b>Página</b>
Resumen.....	i
Summary.....	ii
Dedicatorias.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Índice.....	v
Índice de Cuadros.....	vii
Índice de Figuras.....	viii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo e hipótesis.....	4
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
2.1 Origen y descripción del tomate.....	5
2.2 Visualización de la calidad del fruto.....	7
2.3 Monitoreo de la calidad del tomate.....	9
2.4 Atributos de la calidad del tomate.....	13
2.4.1 Color.....	13
2.4.2 Firmeza.....	15
2.4.3 Sólidos solubles totales.....	17
2.4.4 pH.....	20
2.5 Digitalización y Análisis de Imágenes.....	21
2.5.1 Formación y tipos de imágenes.....	21
2.5.2 Imagen analógica.....	22
2.5.3 Imagen digital.....	22
2.6 Geometría fractal.....	24
2.7 Fundamentos teóricos.....	26
2.7.1 Teoría del color.....	26
2.7.2 La Firmeza.....	31
2.7.3 Sólidos solubles totales.....	32
2.7.4 pH.....	33
2.7.5 Rugosidad.....	35

2.7.6	Iluminación.....	37
2.7.7	Geometría fractal.....	38
2.7.8	Modelo Matemático.....	41
2.9	Coeficiente de correlación lineal de Pearson .....	43
2.8.1	Correlación.....	43
2.8.2	Nube de Puntos.....	44
2.8.3	Coeficientes de correlación.....	45
2.8.4	Coeficiente de Determinación, $R^2$ .....	47
3	MATERIALES Y MÉTODOS.....	48
3.1	Ubicación geográfica y clima del área experimental.....	49
3.2	Selección de las muestras.....	50
3.3	Determinación no invasiva de color.....	52
3.4	Medición no invasiva de la firmeza.....	53
3.5	Medición de sólidos solubles totales.....	54
3.6	Medición del pH.....	55
3.7	Tratamiento de las imágenes.....	56
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	58
4.1	Relación entre los atributos de color del tomate y los parámetros internos de calidad.....	58
4.2	Relación entre los atributos internos del tomate y la Función de Distribución de Probabilidades de los tonos de gris (PDF) de sus imágenes.....	64
4.3	Análisis de la calidad del tomate según su estado de madurez.....	67
4.4	Firmagrama.....	72
4.5	Singularidad visual.....	72
4.6	Coeficiente r-Pearson de correlación lineal.....	74
5	CONCLUSIONES.....	79
	LITERATURA CITADA.....	82



## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro</b>		<b>Página</b>
2.1	Métodos para determinar los índices de composición cuantificables calidad del producto hortícola (Olmo <i>et al.</i> ,2000); (Reid 2002).	11
2.2	Métodos tradicionales para la determinación de características físicas y textura de los productos hortícolas (Olmo <i>et al.</i> , 2000); (Reid 2002).	12
2.3	Etapas de avance del color con la madurez del tomate (USDA, 2003).	14
2.4	Índices objetivos de la firmeza y textura del tomate (Jones, 2007).	16
2.5	Composición de sólidos en el fruto de tomate (Davis y Hobson, 1981).	19
2.6	Sabor del fruto de tomate (Peet, 1997).	20
2.7	Instrumentos para medir los atributos físicos y químicos de la calidad de frutas y verduras (Kader y Seung, 2002).	27
4.3.1	Análisis comparativo de las funciones de distribución de probabilidades de intensidad de grises promedio por clase de tomate.	68
4.6.1	Matriz de correlación entre los atributos analizados en el fruto de tomate.	75

4.6.2	Matriz de correlación entre los atributos analizados en el fruto de tomate, excluyendo la clase 2.	77
4.6.3	Matriz de correlación entre las medias de los atributos analizados en el fruto de tomate	79

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
2.1	Etapas de avance de color del tomate según el Departamento de agricultura de Estados Unidos- USDA Color Stage (Jones, 2007).	15
2.2	Imágenes analógicas (Flores, 2007).	22
2.3	Discretización de una imagen (Flores, 2007).	23
2.5	Comparación entre la forma en que detecta el color el ojo humano y el colorímetro (La CIE, 2007).	28
2.6	Diagrama de cromaticidad (Wolfram, 2007).	31
3.1	Ubicación del Campus Amazcala de la DEPFI, Fac. de Ingeniería, UAQ (Imagen tomada de GoogleEarth, 2004).	50
3.2	Planta número dos seleccionada y etiquetada para fines experimentales.	51
3.2.1	Captura de imagen a color del fruto.	52

3.3	Medición de color <i>in situ</i> .	53
3.4	Medición de firmeza con durómetro digital HPE-II-Fff.	54
3.5	Medición de SST.	55
3.6	pH-metro digital Twin pH B-212.	56
3.7	Procesamiento de las imágenes (a) Imagen en escala de grises. (b) Series de Tiempo de intensidades de gris. (c) Función de distribución de probabilidades (PDF) extraídas a partir de la imagen.	57
4.1.1	Relación entre la luminancia y SST(a), pH (b), así como entre la luminancia promedio respecto al pH (c).	59
4.1.2	Relación de la componente de color verde-magenta $a^*$ con SST (a) y pH (b), $a^*$ promedio respecto al pH (c).	60
4.1.3	Relación de la componente de color azul-amarillo $b^*$ con SST (a), $b^*$ con pH (b), $b^*$ promedio con pH (c).	62
4.1.4	Correlación entre el índice $a^*/b^*$ y SST (a); pH (b); $a^*/b^*$ promedio respecto al pH (c).	63
4.2.1	PDFs representativas del estado de madurez.	65
4.2.2	Correlación entre el exponente de Hurst obtenido mediante el método R/S aplicado a los PDF's de las imágenes de tomate y la concentración de sólidos solubles totales estimados mediante los grados Brix.	66

4.2.3	Correlación entre el exponente de Hurst obtenido mediante el método R/S aplicado a los PDF's de las imágenes de tomate y la concentración de iones hidrógeno (pH).	67
4.3.1	Análisis comparativo de las funciones de distribución de probabilidades de grises promedio extraídas a partir de las imágenes del tomate de seis clases comparadas.	68
4.3.2	Análisis de la concentración de SST por clase de tomate. Se observa una clara tendencia de la clase Rompiente a desviarse del comportamiento general de los valores de grado Brix que fue excluido del análisis.	69
4.3.3	Correlación entre $H_{R/S}$ y grado Brix por cinco clases de tomate, sin considerar la clase Rompiente.	70
4.3.4	Análisis por clase de relación entre la concentración de iones hidrógeno y exponente de Hurst extraído a partir del PDF de las imágenes digitales. Se observa una clara tendencia de separarse la clase Rompiente de la tendencia general lo cual es indicativo de la separación artificial de esta clase de madurez.	71
4.3.5	Análisis de correlación entre $H_{R/S}$ del PDF promedio según clase de tomate y la concentración de iones hidrógeno, excluyendo del análisis a la clase Rompiente.	71
4.4.1	La comparación de los firmagramas extraídas de las imágenes de seis clases de tomates, muestra una clara	72

diferencia en la densidad de puntos.

- 4.5.1 La singularidad visual establecida al comparar dos clases de maduras de tomate se expresa como la similitud entre los elementos que conforman los dos PDF's de las muestras. 73
- 4.5.2 Las diferencias visuales entre los elementos que conforman el PDF de las muestras pertenecientes a diferentes clases de clasificación de tomates según su madurez. El simple análisis visual permite establecer las diferencias mediante el concepto de la Singularidad Visual. 74

## 1 INTRODUCCIÓN

El Tomate (*Lycopersicon esculentum*, Mill) es considerado una de las hortalizas de mayor importancia en el mundo debido al sin número de productos que se derivan de él y a la demanda de mano de obra que genera. México ocupa el décimo lugar a nivel mundial como productor de tomate y es el tercer comercializador de éste (SAGARPA, 2002). El tomate es el principal producto hortícola de exportación ya que representa el 37% del valor total de las exportaciones de legumbres y hortalizas, y el 16% del valor total de las exportaciones agropecuarias (SIAP, 2001). Actualmente, la producción de tomate en superficies con ambientes controlados (invernaderos) aumenta exponencialmente. Sin embargo, los consumidores asocian la disponibilidad del tomate durante todo el año con la disminución de los estándares de su calidad, así como con el detrimento en el sabor de los derivados (Causse *et al.*, 2001).

La calidad de hortalizas se define en función de sus atributos externos e internos. En el caso particular del tomate, su apariencia, textura, sabor, y valor nutricional integran el índice de calidad del producto (Jarén, 2005; Jones, 2007). La preocupación por la salud de la población ha llevado a un proceso de alteración en la conducta adquisitiva de consumidores que exigen estándares de calidad cada vez más altos. Por consiguiente, la demanda de nuevos procedimientos para monitorear la calidad de un producto es cada vez mayor, exige la creación de tecnologías de punta que tengan un menor rango de error, siendo baratas, no destructivas, instantáneas y fáciles de emplear.

Un elevado nivel de calidad y la necesidad de determinar la caducidad del producto de un modo preciso aumentan la necesidad de una evaluación interna simple y rápida de sus propiedades (De Baerdemaeker *et al.*, 2006). Este tipo de evaluación debe ser realizada preferentemente con el uso de dispositivos de control no destructivos capaces de medir la calidad del fruto sobre la planta, sin la necesidad

de cortarlo (De Baerdemaeker *et al.*, 2006). El desarrollo de tecnologías de clasificación de frutos con base en sus atributos tanto externos como internos podría asegurar la confianza y satisfacción de su consumo, incrementando así la competitividad del producto y la rentabilidad de la industria (Gamal *et al.*, 2006).

Hasta ahora, los sistemas de clasificación se basan solamente en los atributos externos, inspecciones visuales, carentes de medidas cuantitativas que disminuyen el sesgo humano. La baja precisión de los medios instrumentales utilizados comúnmente para medir los parámetros de calidad del fruto e interpretar la información contenida en los datos obtenidos es ampliamente conocida. Los procesos convencionales para estimar los atributos internos, aunque no siempre tan costosos, son consumidores de tiempo, siendo en su mayoría métodos destructivos, lo cual significa que el fruto tiene que ser extraído de la planta cada vez que se realice el análisis.

La evaluación no destructiva de la calidad interna del fruto es un objetivo prioritario en las investigaciones recientes. Con este propósito, se han realizado diversas aproximaciones dirigidas a encontrar la metodología más adecuada mediante mediciones físicas (Shewfelt *et al.*, 1987), acústicas (Tu *et al.*, 2000), eléctricas (Langenkens, 2003), ópticas (Forbus, 1985), de fluorescencia (Velázquez *et al.*, 2005) y de reacciones nucleares que acompañan las técnicas de resonancia magnética (Ito, 2004).

El presente estudio se dirige al diseño de una tecnología no invasiva del monitoreo de la calidad del tomate en invernadero a partir de las imágenes digitales multi-escalares. Aplicando el concepto de rugosidad de distribución de los tonos de gris sobre la imagen, ampliamente empleado en las Ciencias de la Tierra (Torres, 2007), al estudio de la superficie del tomate se pretende establecer una relación directa entre el índice de rugosidad de sus imágenes, el color, el contenido de los sólidos solubles totales (SST), pH y firmeza, infiriendo a través de las características externas del fruto sus características internas, y de este modo, determinar la fecha

óptima de corte a partir de los atributos morfométricos e internos del tomate. Se sabe, que la recolección prematura del tomate afecta negativamente la calidad del producto mientras que su cosecha realizada después del punto crítico significa las pérdidas sustanciales por el mantenimiento (fertilización y riego) que se le da al cultivo. La conjetura principal del estudio es que el conjunto de ondas dispersadas o reflejadas por un sistema complejo imprime la variabilidad y rugosidad multi-escalar espacio-temporal de la resistividad del sistema, y por ende es una medida precisa de la calidad física, química y mecánica de esta última, útil para un diagnóstico y medición instantáneos de la calidad del fruto.



## 1.1 Objetivos e hipótesis

Objetivo General:

Diseñar una técnica no destructiva para el monitoreo instantáneo *in situ* de la calidad del tomate a partir de las imágenes digitales multi-escalares y multi-temporales.

Objetivos específicos:

- Buscar un método estadístico preciso y exacto para visualizar y cuantificar el grado de homogeneidad de las imágenes de tomate;
- Establecer la relación entre el color y rugosidad de la superficie de tomate, y el contenido de azúcares, pH y firmeza;
- A partir de los atributos morfométricos e internos del tomate determinar la fecha óptima de su corte.

Hipótesis General:

Los atributos morfométricos del tomate en combinación con las variables internas (pH, firmeza y cantidad de sólidos solubles) se correlacionan con la rugosidad de las imágenes.

Hipótesis específicas:

- PDF es una función estadística apta para medir la rugosidad de las imágenes de tomate;
- Existe una relación no lineal entre el color del tomate y las variables físicas, químicas y mecánicas;
- Con base en las imágenes digitales es factible definir la fecha óptima del corte del tomate, lo cual asegura la sustentabilidad del manejo de invernadero.

## 2 REVISION DE LITERATURA

### 2.1 Origen y descripción del tomate

La clasificación científica del tomate es: reino plantae, subreino tracheobionia, división magnoliopsida, clase magnoliopsida, subclase asteridae, orden solanales, familia solaneaceae, especie *solanum lycopersicum* y género *lycopersicon esculentum* (Jones, 2007).

*Lycopersicon* es un género relativamente pequeño dentro de la diversa y gran familia de las solanáceas. Dentro de este género se encuentran, el tomate cultivado *L. esculentum Mill.* y siete especies relacionadas (Jarquin, 2005). La clasificación botánica del tomate tiene una historia interesante. Primero comienza, junto con la papa, inserto en el género *solanum*, y se identifica con *Solanum lycopersicon*, sin embargo, se cambia a *Lycopersicon esculentum* por el simple hecho de ser comestible (Jones, 2007).

El tomate se clasifica con base en varios aspectos: su crecimiento, color o forma; siendo ésta última el parámetro básico para la comercialización en nuestro país. Entre las variedades que se destacan por su importancia en el mercado; se encuentran el bola y saladette o guajillo que son las de mayor producción, sin olvidar otras como el "cherry" cuya participación es menor.

El tomate, (*Lycopersicon esculentum Mill.*), es una planta plurinaria o perenne que se cultiva anualmente. Su fruto es una baya con 2 a 9 lóbulos. Los ejemplares con muchos lóbulos son por lo general de forma irregular. Su peso oscila entre 40 y 300 gr (Jarquin, 2005). Toda la planta posee pelos de naturaleza granular que le dan su olor tan característico (Lorente, 1998). Los frutos de la planta de tomate se diversifican por el tamaño y forma. Los más largos son conocidos como *beefsteak*, mientras que los pequeños son nombrados como *cherry*, *grape*, o *cocktail*. Tamaños medianos se conocen como roma, *oxheart* y pera (Jones, 2007).

El tamaño del fruto es determinado primordialmente por la variedad del cultivo, pero también puede ser modificado por la influencia de factores externos como la radiación solar (disminuyendo éste en cuanto es menor la intensidad), o el espaciamiento entre plantas (disminuyendo el tamaño cuando aumenta la población de plantas, Papadopoulos y Pararajasingham, 1996). Los frutos del tomate varían considerablemente, tanto según sus características físicas como químicas. Las formas habituales del fruto que se consumen hoy en día son muy diferentes de las que se consumían hasta hace sólo unas décadas.

La importancia del tomate a nivel mundial radica en la amplia diversidad de usos que tiene en la alimentación de prácticamente todos los grupos de población humana (Ocaña, 2004). El tomate, es considerado como uno de los vegetales de mayor importancia en muchos países del mundo, por el sinnúmero de subproductos que se obtienen de él y las divisas que aporta (Santiago *et al.*, 1998).

En México, el cultivo de tomate sobresale por ser una de las hortalizas que más ha contribuido al desarrollo y crecimiento del sector hortícola; abastece el mercado nacional y es el producto de exportación agrícola de mayor valor comercial en el país (Jarquin, 2005). Se considera que a nivel internacional, las hortalizas junto con las frutas ocupan en nuestros días el segundo lugar entre los productos agropecuarios, apenas aventajadas por los cereales. Se estima que tan sólo dos hortalizas contribuyen con el 50% de la producción en el mundo: la papa y el jitomate, lo cual nos indica el enorme valor que este último cultivo representa no sólo para el comercio, sino también para el sistema alimentario mundial (SAGARPA, 2002).

México ocupa el décimo lugar a nivel mundial como productor de jitomate, pero es el tercer comercializador del producto en el mundo. Los principales productores de jitomate a nivel mundial son China, Estados Unidos, Turquía, Italia, Egipto e India, quienes han producido el 70% de la producción mundial en los últimos

10 años (SAGARPA, 2002), siendo China el país que ha invertido más en investigación sobre este producto. El potencial de producción de tomate se ha incrementado en los últimos años debido al uso y manejo de invernaderos automatizados (operados por computadoras) donde se controlan los factores ambientales lo cual permite optimizar la producción y mejorar la calidad externa del fruto (Ho, 1996).

## **2.2 Visualización de la calidad del fruto**

El término calidad se define según varios autores como: 1) el grado en que un producto satisface las necesidades y exigencias de un comprador y por ende, de un consumidor (Jarquin, 2005); 2) en función del uso al que va a ser destinado el producto por lo cual en el caso del tomate fresco se debe tender al concepto de “calidad total” considerando todas las características valoradas por los consumidores, no sólo la forma, el color y la ausencia de daños, sino también el sabor, el aroma y la textura (Jarén, 2005); 3) y como una propiedad muy compleja que puede definirse, en nuestro caso, como la suma de todos los atributos que se combinan para asegurar que las frutas y verduras sean aceptables, deseables y nutritivamente valiosas como alimentos humanos (Duckworth, 1975).

Las perspectivas de visualización de la calidad de un producto ahora son diferentes en comparación con las posibilidades que existían en el pasado. Desde hace más de 10 años, los productores mexicanos aceptaron que cultivando bajo condiciones de invernadero se llega a una mayor cantidad de fruto. A la par se dieron cuenta de que la gente prefería pagar un poco más para tener un producto mejor que tuviera mayor vida de anaquel.

Con la disponibilidad del tomate durante todo el año, los consumidores empezaron a quejarse del sabor frecuentemente insatisfactorio (conocido bajo el nombre *sin sabor*) del tomate (Causse *et al.*, 2001). Estas críticas parecen ser

comunes para muchos países como los Estados Unidos (Kader y Morris, 1977), Australia (Ratanachinakorn *et al.*, 1997), los Países Bajos (Janse y Schols, 1995) y Francia (Decoene, 1995). Los consumidores asocian las nuevas variedades (muchas de ellas transgénicas) con la pérdida del sabor, aunque ello aun no se allá comprobado (Bruhn *et al.*, 1991).

La calidad óptima de tomate fresco para el consumo se obtiene cuando se espera que los frutos maduren en la planta alcanzando de este modo el máximo sabor (Kader y Morris, 1977), aunque en este proceso disminuye la resistencia al transporte. Ambos atributos también dependen de las técnicas de cultivo y de la variedad. El tomate se cultiva en invernadero, directamente en el suelo o en hidroponía. De estos tres métodos el cultivo en suelo es más tradicional mientras que la hidroponía es menos utilizada a pesar de asegurar mayor control del cultivo.

Algunos autores consideran que la calidad del tomate para el consumidor se define en función de los siguientes atributos: apariencia externa, sabor y características nutritivas (González *et al.*, 2000); mientras que para otros el aspecto, la textura y el sabor son los tres componentes principales de la calidad de la fruta fresca. El aspecto da la primera impresión sobre la calidad de la fruta pero son la textura y el sabor los que determinan en última instancia la satisfacción del consumidor (Renfu, 2004).

En *Practical Hydroponic and Greenhouses* (2005) se reportan los resultados de una encuesta que define tres razones principales según las cuales el consumidor elige un tomate. El primer lugar lo ocupa el sabor (28%), después sigue la firmeza (15%) y posteriormente la madurez (13%). En esta misma encuesta se menciona que las variedades que prefiere el consumidor son las más pequeñas ya que se considera que éstas son las que tienen mas sabor en comparación con las variedades grandes. Para la producción industrial del tomate, los parámetros de calidad más empleados hasta la fecha son el contenido de sólidos solubles totales (°Brix), color, firmeza, pH y acidez titulable (AVRDC, 1994).

### **2.3 Monitoreo de la calidad del tomate**

Mediante un simple examen visual se puede saber mucho sobre la calidad de un producto. Así es como se puede detectar fácilmente los defectos derivados de las, diversas causas, que reducen el grado de aceptabilidad de un producto (Duckworth, 1975).

La definición de la calidad de un producto en términos cuantitativos es un proceso importante que tiene que contar con un sistema de análisis, una metodología definida y sistemática (Jarquin, 2005). Actualmente, las tecnologías para clasificar fruta de acuerdo a su aspecto (es decir, color, tamaño y/o forma) se desarrollan extensamente en los Estados Unidos y otras naciones industrializadas (Renfu, 2004). Bajo esta misma perspectiva, Arana *et al.* (2007) señalan que la calidad puede evaluarse mediante un análisis sensorial o mediante los ensayos instrumentales que son objetivos, rápidos y baratos.

En México se ha creado un sello distintivo para asegurar la confianza del consumidor en un producto de buena calidad. Para obtenerlo los productores tienen que someter sus productos a certificaciones relevantes. Este sello es el de “México Calidad Selecta”, el cual es una marca oficial mexicana registrada por la SAGARPA, S.E. y BANCOMEXT. Su objetivo es garantizar la calidad superior de los productos agroalimentarios con base en sus cualidades, propiedades y naturaleza, además de identificarlos y diferenciarlos como productos que cumplen con las Normas Oficiales Mexicanas (NOM's), Normas Mexicanas (NMX) y Normas Internacionales (SAGARPA, 2002).

Actualmente las prácticas de monitoreo de la calidad de hortalizas en el invernadero son subjetivas, y sólo se enfocan en los atributos externos porque los procesos convencionales para evaluar los atributos internos, aunque no son muy costosos, requieren de mucho tiempo, siendo comúnmente los métodos destructivos.

La preocupación cada vez mayor de la sociedad sobre la salud ha llevado a un proceso de alteración en la conducta adquisitiva de consumidores que exigen cada vez más los estándares altos de calidad. Por consiguiente, la demanda de los nuevos procedimientos para evaluar la calidad de un producto cada vez es mayor, exige la creación de tecnologías de punta que tengan un menor rango de error.

La clasificación de la calidad y la evaluación de frutas y verduras frescas se basa en los criterios de organismos oficiales internacionales como USDA que están basados en las normas alimenticias de la Organización de Alimentos y Agricultura de las Naciones Unidas (FAO) y la Organización Mundial de la Salud (WHO) (Bickelman, 1993; Kader y Seung, 2002). Sin embargo, estas normas oficiales de la calidad de productos son útiles exclusivamente para determinar los atributos externos del producto. Al evaluar la calidad de un producto sin considerar sus propiedades intrínsecas tales como la composición química no se cumple con algunos de los requisitos del consumidor (Lennernäs y Fager, 1997; Pecher y van Oppen, 2000).

Las normas de calidad basadas tanto en los atributos externos como internos sirven como una medida objetiva para asignar el valor de calidad a los artículos en el mercado hortícola. Esta clasificación es decisiva para que el comercio nacional e internacional sea económicamente sustentable.

Determinación de la calidad de cualquier producto hortícola orientada al consumidor y realizada con base en los atributos específicos del producto es esencial para definir el punto crítico de su madurez así como para controlar e inspeccionar la dinámica de su crecimiento.

Varios métodos son conocidos para determinar la calidad de productos hortícolas en términos de los componentes químicos, el valor nutritivo, los atributos

de sensibilidad, así como de las propiedades físicas (Monnot, 1990; Abbott, 1999; Kader y Seung, 2002).

Los métodos para evaluar la calidad pueden ser destructivos o no destructivos, incluyendo las escalas objetivas de cuantificación basadas en las lecturas de los diversos instrumentos y métodos subjetivos, basados en el juicio humano. A continuación se presenta una tabla referente a la clasificación de los métodos más comunes (Cuadro 2.1).

Cuadro 2.1.- Métodos para determinar los índices de composición cuantificables de la calidad del producto hortícola.

ÍNDICE	MÉTODO DE DETERMINACIÓN	SUBJETIVO	OBJETIVO	DESTRUCTIVO	NO-DESTRUCTIVO
Almidón	Pruebas químicas Refractómetro		X	X	
Azúcar	Pruebas químicas Titulación		X	X	
Acidez	Pruebas químicas Extracción	X	X	X	
Jugo	Pruebas químicas Extracción		X	X	
Aceite	Pruebas químicas		X	X	
Etileno interno	Cromatografía		X	X	X
Volátiles	Cromatografía		X	X	X

Olmo *et al.*, (2000); Reid, (2002).



Cuadro 2.2.- Métodos tradicionales para la determinación de características físicas y textura de los productos hortícolas.

ÍNDICE	MÉTODO DE DETERMINACIÓN	SUBJETIVO	OBJETIVO	DESTRUCTIVO	NO-DESTRUCTIVO
Tamaño	Anillos viscosos				X
Estructura de la superficie	Visual	X			X
Forma	Medidas, caracterizar el radio	X			X
Color externo	Visualización del color mediante la reflectancia de la luz	X	X		X
Color interno	Examinación visual, emisión de luz	X		X	X
Firmeza	Pruebas de firmeza, deformación		X	X	X

Olmo *et al.*, (2000); Reid, (2002).

Los avances actuales de la microelectrónica y otras tecnologías de circuitos integrados incrementan la posibilidad de una detección rápida e insesgada de atributos de frutas y verduras que definen su calidad usando métodos de ensayo no destructivos (Tollner *et al.*, 1993). Siempre que sea posible, se deberá intentar de aplicar los ensayos no destructivos e incorporables a la cadena de selección para clasificar los frutos de forma individual (Dris *et al.* 2004; Arana *et al.*, 2007).

Una definición de la evaluación no destructiva de calidad es dada por Dull *et al.* (1980) como un adelanto significativo de información la cual puede ser usada para

realizar un juicio sea este positivo o negativo, acerca del grado de excelencia del alimento sin alteraciones físicas, ni químicas.

Hasta la fecha, ya son muchas las investigaciones que se han dirigido a la búsqueda de las técnicas no destructivas de evaluación de atributos de la calidad de frutas y verduras tanto a partir de los parámetros internos como externos. Estos atributos se obtienen mediante las mediciones físicas, acústicas, eléctricas, ópticas, fluorescencia y propiedades nucleares de resonancia magnética (Dris *et al.* 2004).

Actualmente el color no se considera como un indicador confiable del sabor y de la textura de los productos hortícolas. Sin embargo, las tecnologías no destructivas que extraen las cualidades importantes de la calidad de la fruta a partir de su color proveen a la industria de alimentos frescos las medidas necesarias para asegurar al consumidor una calidad superior, productos de frescura constante mejorando así la capacidad de la industria para resolver las demandas del consumidor (Renfu, 2004).

## **2.4 Atributos de la calidad del tomate**

### **2.4.1 Color**

Stevens y Rick (1986), mencionan que el color es una de las características más importantes de la calidad de cualquier alimento. Asimismo, para el consumidor, el color es un indicador de su calidad gustativa (Jarquin, 2005). Mientras que para el procesador, la calidad de algunos productos elaborados está determinada por la intensidad del color, el cual condiciona la cantidad de fruta requerida y la rentabilidad del proceso (Jarquin, 2005). De este modo el color del tomate es uno de los atributos más importantes de la calidad para el consumidor y la industria (Stevens y Rick, 1986). El color rojo debe ser uniforme y hay una amplia gama de matices de color entre verde y rojo, inducido por el contenido de licopeno (Jarquin, 2005).

La consecución de una sapidez y textura satisfactorios se asocian frecuentemente con un cierto desarrollo de coloración, como sucede en las frutas maduras, aunque sólo la apariencia puede ser engañosa siendo la prueba del producto la única manera totalmente satisfactoria para apreciar la sapidez y textura (Duckworth, 1975). Los siguientes términos son usados como indicadores de la etapa de madurez para cualquier parte de los tomates de una variedad roja (Jones, 2007). Carta de colores se divide en seis categorías según el Departamento de Agricultura de Estados Unidos - "USDA Color Stage": el verde, rompiente, cambiante, rosa, naranja y rojo.

Cuadro 2.3.- Etapas de avance del color con la madurez del tomate.

CLASE	NÚMERO DE ETAPA	DESCRIPCIÓN
Verde maduro	1	Material gelatinoso bien desarrollado en los lóbulos, pero aún completamente verde; significa que la superficie es completamente verde en color. Los tonos de verde varían entre claro y oscuro.
Rompiente	2	Primera señal del rompimiento del color verde con coloración externa rosada o amarilla en el punto de florecimiento; que no sea más del 10% de la superficie.
Cambiante	3	Significa que más del 10% pero no más del 30% de la superficie total, muestra un cambio definitivo en el color verde a amarillo tenue, rosa o rojo o una combinación de estos.
Rosado	4	Más del 30% pero no más del 60% de la superficie muestra color rosado o rojo.
Rojo claro	5	Más del 60% pero menos del 90% de la superficie del tomate, muestra color rosa o rojo.
Rojo	6	Más del 90% de la superficie muestra coloración roja.

USDA, 2003.

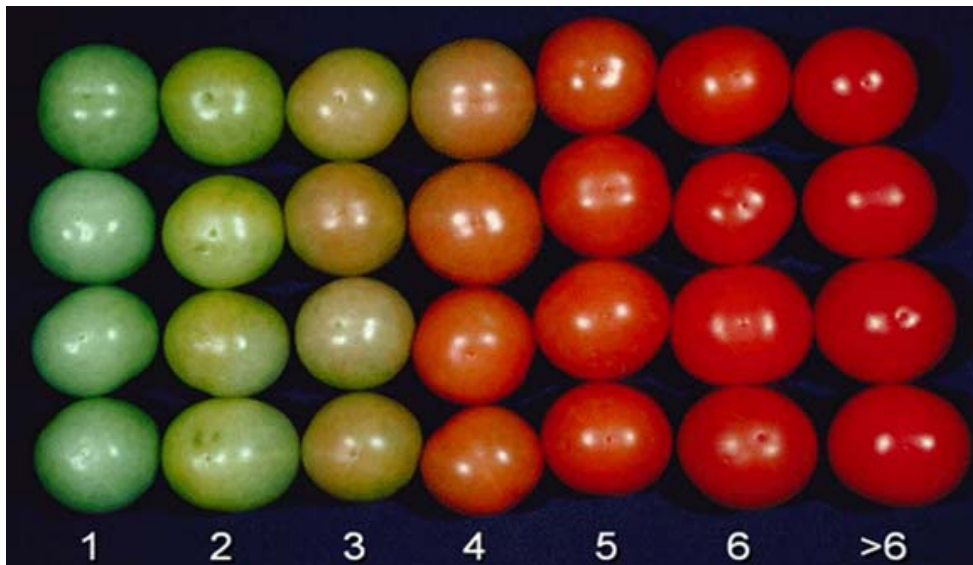


Figura 2.1.-Etapas de avance de color del tomate según el Departamento de Agricultura de Estados Unidos - USDA Color Stage (Jones, 2007).

El color de los frutos de tomate se asocia al contenido de los carotenos. El licopeno es el principal carotinoide del tomate que constituye el 83% de los pigmentos totales presentes, mientras que los  $\beta$ - carotenos corresponden al el 3-7% del total de los carotenos contenidos en el fruto del tomate (Thakur et al., 1996). La mayoría de las variedades de tomate tienden al color rojo derivado del carotenoide licopeno. Diferentes genes son específicos para distintos tonos de amarillo, naranja, o verde. El color amarillo se caracteriza por no ser relacionado con la acidez de la fruta. El color rosa se deriva de los genes únicos (Y) que impiden la formación de pigmento amarillo del fruto. Otros colores de la clasificación de frutos son naranja, rayado o bicolor, púrpura, negro, café y verde (Jones, 2007).

#### 2.4.2 Firmeza

La firmeza es el atributo de textura más importante del tomate que fue perfectamente caracterizado por Cantwel (2004), quien clasificó los tomates de acuerdo a este atributo en seis categorías; abarcando los tomates desde muy firme

hasta muy blandos. Esta división se realizó en función de la máxima resistencia que ofrece el tomate durante un ensayo normalizado de compresión.

Un factor importante para definir la firmeza de un fruto es la nutrición de planta madre; siendo potasio y nitrógeno los elementos que mayor influencia tienen. Las plantas con un suministro adecuado de potasio, tienden a una firmeza adecuada, mientras que las plantas que no reciben un suministro de los nutrientes que aseguran el balance adecuado entre nitrógeno y potasio podrán producir frutos menos firmes (Jones, 2007).

Cuadro 2.4. Índices objetivos de la firmeza y textura del tomate

Clasificación según firmeza	Descripción basada en resistencia a la deformación	Firmeza (mm de presión)	Descripción basada en características de corte
Muy firme	La fruta cede levemente la presión considerable	0.5-1.0	No se pierde jugo o semillas cuando se corta
Firme	La fruta cede levemente la presión moderada	1.0-1.5	X
Moderadamente firme	-----	1.5-2.0	X
Moderadamente blando	-----	2.0-2.5	X
Blando	La fruta cede levemente la presión suave	2.5-3.0	X
Muy blando	La fruta cede muy fácilmente	>3.0	X

Jones, 2007.

Hasta la fecha no se ha encontrados un sensor que pueda medir la firmeza de fruta de un modo preciso, ya que el método tradicional sigue produciendo las

pérdidas significativas del producto, cuando se aplica en embarques, alcanzando hasta un 10 % debido al ablandamiento de la fruta (Watkins, 1997).

A partir de la década de los años sesentas se han propuesto técnicas y dispositivos basados en la respuesta acústica del fruto al impacto así como en las vibraciones forzadas, para intentar correlacionar las características dinámicas con la calidad interna de los productos de interés. Se han estudiado los diferentes coeficientes de firmeza, como  $f^2m^{2/3}$  y  $f^2m$  (siendo  $f$  la primera, segunda o tercera frecuencia natural según la fruta ensayada, y  $m$  la masa de la misma) y otros parámetros acústicos en numerosos productos hortofrutícolas (Diezma, 2003).

Recientemente se han surgido los módulos de selección capaces de detectar la firmeza de los frutos a partir de la vibración producida por un pequeño toque que no deja marcas en el producto. Las mediciones también se realizan con métodos ópticos basados en la transmitancia, reflectancia o absorbancia de la radiación mono o policromática de los rayos ultravioletas (UV), así como en el espacio visible del espectro electromagnético cercano al infrarrojo (Benítez, 2006).

#### 2.4.3 Sólidos solubles totales

Uno de los factores primarios de la calidad de los frutos del tomate, es el contenido de los sólidos solubles totales (SST) que varía según la variedad, el grado de madurez y las técnicas de cultivo. Las medidas de SST están expresadas en grados Brix ( $^{\circ}\text{Bx}$ ), representando los azúcares reductores, no reductores y los ácidos (Primo, 1997).

Los principales azúcares en el jugo de tomate son: sacarosa, glucosa y fructosa, que suman alrededor del 65 % de los SST y frecuentemente están equilibrados por los reductores. También existen pequeñas cantidades de maltosa y otras sustancias que se presentan en una menor proporción (Primo, 1997).

El porcentaje de sólidos en el fruto determina su sabor: mientras más altos son los SST, mejor es el sabor. La mayoría de los tomates contienen SST en un rango de 5 a 7% (Primo, 1997).

El contenido de azúcares experimenta un brusco incremento cuando el fruto alcanza un color amarillento, aumentándose éste paulatinamente durante su maduración, por lo cual la recolección prematura de este producto afecta negativamente el contenido de azúcares y por ende su sabor (Jarquin, 2005).

El sabor está determinado principalmente por los niveles de azúcares y ácidos, de manera que al aumentar los niveles de éstos, se mejora el sabor (Kader y Morris, 1977; Baldwin *et al*; Jarquin, 2005). Sin embargo, debe existir un punto crítico en el cual el crecimiento señalado de la curva se estabiliza. Este punto se tomara en el presente trabajo como un indicador objetivo de la fecha óptima de corte del cultivo.

Los cambios que ocurren en el tomate con la maduración han sido analizados en detalle por Kader y Morris (1977), en cuyo estudio se menciona que durante este proceso se degradan los almidones y comienza la producción de glucosa y fructuosa. Al mismo tiempo se observó un incremento en la proporción de los ácidos cítrico ( $C_6H_8O_7$ ), málico ( $C_4H_6O_5$ ) y glutámico ( $C_5H_9NO_4$ ).

La mayor parte de la composición del tomate corresponde al agua, mientras que sólo un 15% - 7% son sólidos. Más de la mitad del contenido de sólidos son azúcares y algunos ácidos. Davis y Hobson (1981) reportaron la siguiente composición de sólidos en el tomate que puede ser considerada de referencia:

Cuadro 2.5.-Composición de sólidos en el fruto de tomate

CONSTITUYENTE		PORCENTAJE DE MATERIA SECA
Azúcares	Glucosa	22
	Fructuosa	25
	Sucrosa	1
Sólidos insolubles	Proteínas	8
	Pectinas	7
	Celulosas	6
	Hemicelulosas	4
Ácidos orgánicos	Ácido Cítrico	9
	Ácido Málico	5
	Minerales(principales K, Ca, P)	9

Davis y Hobson, 1981

Urrestarazu (2000) reportó que para tomates de consumo en fresco los valores de °Bx oscilan entre 3.1 y 7.8 °Bx, mientras que Pérez *et al.* (1997) mencionan los valores de 3 cultivares de tomate que varían entre 4 y 5.5 °Bx.

A medida que el tomate se va desarrollando, la concentración de sucrosa va reduciéndose, mientras que la del almidón y de los azúcares reductivos va aumentándose (Jones, 2007). Se han hecho numerosas pruebas en las que se ha encontrado que las variedades de tomate pequeñas tienen mayor porcentaje de sólidos solubles. Las variedades pequeñas testan en un rango de 8 a 10 mientras que las variedades grandes abarca un rango de 4 a 6 °Bx (Jones, 2007).



#### 2.4.4 pH

El potencial de iones  $H^+$  (pH) es una medida objetiva de la acidez, que se cuantifica por el método de acidez titulable (Stevens y Rick, 1996). A pesar de que muchos medidores del pH tienen escalas marcadas que van de 1 a 14, los valores del pH, pueden ser menores de 1 y mayores que 14 (Chang, 2007).

Los ácidos volátiles son los responsables del sabor que identifica al tomate. El rango de pH en este fruto se encuentra entre 4.0 y 4.5. Mientras más bajo es el pH, mayor es la acidez, un factor que algunos consumidores emplean para juzgar la calidad del tomate. El rango promedio de pH para la mayoría de los tomates se encuentra entre 4.3 y 4.4.

Según Charley (1987), los tomates son las verduras con más alta concentración de ácido, con pH que varía de 4 a 4.6. En González *et al.* (2000) se reporta un valor de pH en frutos de diferentes tomates de consumo en fresco de 4.12. Por otro lado, Hoyos *et al.* (1997) mencionan que diferentes frutos de tomates híbridos tienen valores de pH del rango más amplio entre 3.90 y 4.43. En Niesen *et al.*, (1990) se considera que los valores de pH inferiores a 4.4 son los que aseguran un buen sabor, aunque los resultados de otras investigaciones documentan que ello varía según los cultivares. Estudios realizados por Peet (1997) relacionan el sabor del fruto con la combinación entre la acidez (pH) y el contenido de azúcares, según siguiente Cuadro (2.6):

Cuadro 2.6.-Sabor del fruto de tomate

ACIDEZ	CONTENIDO DE AZÚCARES	SABOR
Alta	Alto	Bueno
Alta	Bajo	Agrio
Baja	Alto	Suave
Baja	Bajo	Sin sabor

Peet, 1997

## 2.5 Digitalización y Análisis de imágenes

El desarrollo de la microinformática en los últimos años ha propiciado que cada vez sea más común el trabajar con imágenes digitalizadas. La imagen digital se ha incorporado a la totalidad de los equipos de microscopía electrónica y microscopía confocal y está sustituyendo rápidamente a las tradicionales cámaras fotográficas en los microscopios ópticos (Nistal, 2001).

Las ventajas de la imagen digital frente a la analógica vienen dadas por las múltiples posibilidades de manipulación que nos ofrece. Además, podemos procesar dichas imágenes para obtener información. Reconocer, contar y medir tamaño, forma, posición o densidad de determinados objetos (por ejemplo el área de los núcleos en una imagen histológica), es algo que, con una correcta preparación de la muestra, está al alcance de cualquier ordenador personal complementado con un software adecuado de análisis de imágenes (Flores, 2007).

El Tratamiento Digital de Imágenes (González *et al*, 2006) contempla el procesamiento y el análisis de imágenes. El procesamiento está referido a la realización de transformaciones y a la restauración y mejoramiento de las imágenes. El análisis consiste en la extracción de propiedades y características de las imágenes, así como la clasificación, identificación y el reconocimiento de patrones.

### 2.5.1 Formación y tipos de imágenes

Desde el punto de vista físico, una imagen puede considerarse como un objeto plano cuya intensidad luminosa y color puede variar de un punto a otro. Si se trata de imágenes monocromas (blanco y negro), se pueden representar como una función continua  $f(x, y)$  donde  $(x, y)$  son sus coordenadas y el valor de  $f$  es proporcional a la intensidad luminosa (nivel de gris) en ese punto (Flores 2007).

Las imágenes son representaciones de objetos los cuales son sensados a través de su energía radiante, por ejemplo, la luz. Por lo tanto, por definición la formación de una imagen requiere de una fuente de radiación, un objeto y un sistema de formación ( Flores, 2007). Las fuentes de formación pueden ser de varios tipos (fuente de luz blanca, sistemas con láser, tubos de rayos X, fuentes térmicas y también fuentes de ondas acústicas) .

Existen diferentes tipos de sistemas de formación de imagen: biológicos (sistema de visión en humanos y animales), fotoquímicos (cámaras fotográficas) y fotoelectrónicos (cámaras de TV).

### 2.5.2 Imagen analógica

Una imagen analógica es una figura, representación o reproducción de un objeto o una cosa, puede ser un cuadro o lámina, un mapa, una fotografía, un grabado o dibujo e inclusive un texto (Figura 2.2).



Figura 2.2. Imágenes analógicas (Flores, 2007)

### 2.5.3 Imagen digital

Para obtener una imagen que pueda ser tratada por el ordenador es preciso someter a la función  $f(x, y)$  a un proceso de discretización tanto en las coordenadas como en la intensidad, a este proceso se le denomina digitalización (Figura 2.3).

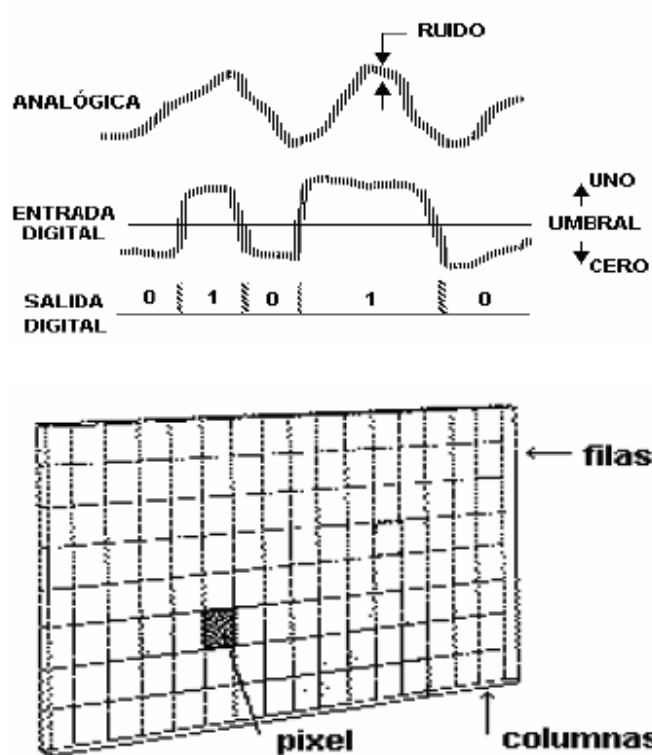


Figura 2.3. Discretización de una imagen (Flores, 2007).

La salida de este proceso pueden ser, o bien un único valor (escala de grises) o bien un vector con tres valores por polígono (RGB) que corresponden con la intensidad de color rojo (R), verde (G) y azul (B). La escala de colores también tiene un rango discreto (por ejemplo, de 8bits = 256 valores). Las imágenes en escala de grises con sólo 2 colores: blanco y negro (0 y 1, respectivamente), se llaman imágenes binarias (Flores, 2007).

Una imagen digital puede considerarse como una matriz cuyos índices de fila y columna identifican un punto de la imagen y el valor del correspondiente elemento de la matriz indica el nivel de gris de ese punto. Los elementos de una distribución digital de este tipo se denominan elementos de la imagen o más comúnmente píxels

o pels, que son abreviaturas de su denominación inglesa “picture elements” (Nistal, 1995).

Las imágenes digitales se puede dividir en cuatro tipos: monocromáticas (son imágenes blanco y negro y también imágenes en escala de gris), colormapped o paleteada (cada píxel está representado por un número llamado índice que se toma para el color real del píxel desde una tabla llamada palet) , color verdadero (estas imágenes son las de más alta calidad y las de mayor ocupación de memoria, cada píxel contiene la información de color completa, usualmente expresada como la intensidad de la componente de color rojo, verde o azul; RGB).

## **2.6 Geometría Fractal**

Hay que reconocer que el método tradicional de los agricultores (prueba y error) sigue siendo el principal motivo que nos inspira a realizar los nuevos proyectos de investigación experimental que requieren importantes inversiones de recursos y de capital humano y que, con mucha frecuencia, nos llevarán a la misma conclusión: las diferencias observadas del fenómeno estudiado no son estadísticamente significativas (Oleschko, 2004).

Para superar esta limitación es indispensable percibir a un Agroecosistema como un organismo vivo, dinámico en el tiempo, y variable en el espacio, cuya complejidad reclama los nuevos enfoques sobre el análisis, así como las nuevas técnicas de caracterización (Oleschko, 2004).

En este contexto, la principal ventaja del enfoque fractal aplicado al análisis de los sistemas naturales es la posibilidad de extrapolar las propiedades del objeto, conocidas a una escala dada, o cualquier otra si su forma o las medidas de su complejidad son auto-similares o auto-afines, la propiedad que se conoce como la invariancia al escalado (Mandelbrot, 1983).

En años recientes se han diseñado los diversos métodos del análisis de la complejidad de sistemas con propósitos diferentes, así como las técnicas de cuantificación de las imágenes, series de tiempo y bases de datos extraídos a partir de los sistemas complejos, usando herramientas que aseguran la precisión de las medidas. Este nuevo acercamiento al estudio interno de los sistemas, se realizó dentro del marco de una nueva área de Geometría Fractal llamada la Metrología Fractal (Oleschko, 2006). Metrología es el campo del conocimiento dirigido al estudio de los diversos métodos de medición que se deriva de la teoría y práctica de las mediciones comunes, su incertidumbre y campos de su aplicación. La Metrología Fractal se define por como una disciplina que selecciona a un conjunto de variables y técnicas para la medición de la invarianza al escalado, útil para cuantificar los rangos o atributos de cualquier objeto o sistema irregular, fragmentada y rugosa, extrayendo estos atributos a partir de los diversos bancos de datos multiescalares y multitemporales.

La teoría fractal ha tenido un impacto notorio como una alternativa para cuantificar las características de diversos fenómenos. En los últimos años en el área de alimentos han sido publicados diversos estudios que utilizan dimensiones fractales para cuantificar los atributos de calidad de diversos alimentos (Barrett y Peleg 1995; Rahman 1997; Dziuba *et al.* 1999; Hagiwara *et al.*, 2002; Quevedo *et al.*, 2002; Kubík *et al.* 2003; Alamilla *et al.*, 2005; Devaux *et al.*, 2005).

La invariancia al escalado de la mayoría de los fenómenos observados en la constitución y el comportamiento de los agroecosistemas, han sido ya explorados por los agrónomos, aunque su importancia para investigaciones agrícolas a sido reconocida, solo recientemente (Eghball y Power, 1995; Valdez y Olivares, 1998). La invariancia al escalado, es un tipo de simetría generalizada (del tipo de dilatación) que garantiza la coincidencia de la naturaleza con las matemáticas (Mandelbrot, 2002), y que será de suma importancia para la presente investigación.

De acuerdo a Cajueiro y Tabak (Turvery, 2007) existen dos diferentes áreas para medir los atributos de sistemas naturales y sociales. El primero es un acercamiento paramétrico para determinar el exponente de Hurst o dimensión fractal. La segunda es un acercamiento no paramétrico, que se base en los estadísticos tales como la desviación estándar (Torres *et al.*, 2007).

## **2.7 Fundamentos teóricos**

Muchos investigadores han dirigido sus estudios a la búsqueda de las técnicas no destructivas para evaluar los factores tanto internos como externos de la calidad de frutas y verduras. La mayoría de estos intentos se basa en las mediciones físicas, acústicas, eléctricas, ópticas, de fluorescencia y de propiedades nucleares que se toman en cuenta en la resonancia magnética (Dris *et al.* 2004).

### 2.7.1 Teoría del color

El color de un objeto, está constituido por las ondas de diferentes frecuencias que éste refleja, las que por ende no son absorbidas. El color depende de la naturaleza de la luz recibida, de ahí la importancia de la fuente de luz a la hora de definir un color (Txabi, 2006).

Para evaluar el color de frutos de tomate existen métodos subjetivos y objetivos. La escala de colores holandesa "*Kleur-Stadia Tomaten*" es la más utilizada para la clasificación subjetiva del estado de madurez. Esta escala divide los diferentes estados de maduración, en seis y doce, en una gama progresiva desde tomate verde a rojo, especificándolos tanto de forma gráfica como descriptiva. El método objetivo de evaluación del color emplea técnicas de medida del grado de reflexión (Riquelme, 1995).

Cuadro 2.7.- Instrumentos para medir los atributos físicos y químicos de la calidad de frutas y verduras:

MÉTODOS	CARACTERÍSTICAS	REACCIONES SENSORIALES
Colorímetro triestímulo	Valores físicos (X,Y,Z; L,a,b)	Espectro (atributos del color): iluminación, color (rojo, azul, etc.) y saturación
Espectrofotómetro Radiación-X Ultravioleta (UV) Luz visible Infrarrojo cercano (NIR)	Energía radiante (refracción, transmisión, absorción, espaciamiento de la luz)	Defectos (color interno)
Medidas Químicas Medidas Físicas Cromatografía Espectroscopia de masa	Pigmentos Tamaño, forma. Volatilidades Azúcar	Atributos geométricos Atributos externos Dulzura Amargor
Medidas químicas	Ácidos Orgánicos	Sabor de la fruta Sin sabor
Medidas de fuerza	Resistencia a la compresión	Atributos mecánicos: dureza, encrespadura
Medidas de distancia Deformación	Resistencia a la compresión	Atributos geométricos
Espectrómetro acústico	-----	Jugosidad
Texturometro	Muchas variables	Compactación
Medidas físico-químicas	Sólidos insolubles en alcohol Contenido de almidón Contenido de fibra Humedad	Atributos relacionados con el agua

Kader y Seung, 2002



Uno de los instrumentos más empleados en la medición objetiva del color en la industria alimenticia es el colorímetro triestímulo. Con este aparato los procedimientos de integración incorporan las curvas del observador patrón, dividiéndolas a ordenadas ponderadas y ordenadas seleccionadas, sustituyendo los filtros correspondientes que simulan la respuesta final (Aguilera, 1997).

El colorímetro usa sensores que simulan el modo en que el ojo humano percibe el color. El colorímetro expresa el color en forma numérica, cuantificando la diferencia en color entre un estándar y una muestra de producción (Angón *et al.*, 2006). La representación del color varía según el dispositivo empleado, dependiendo los sistemas de administración del color de varios factores (La CIE, 2007).

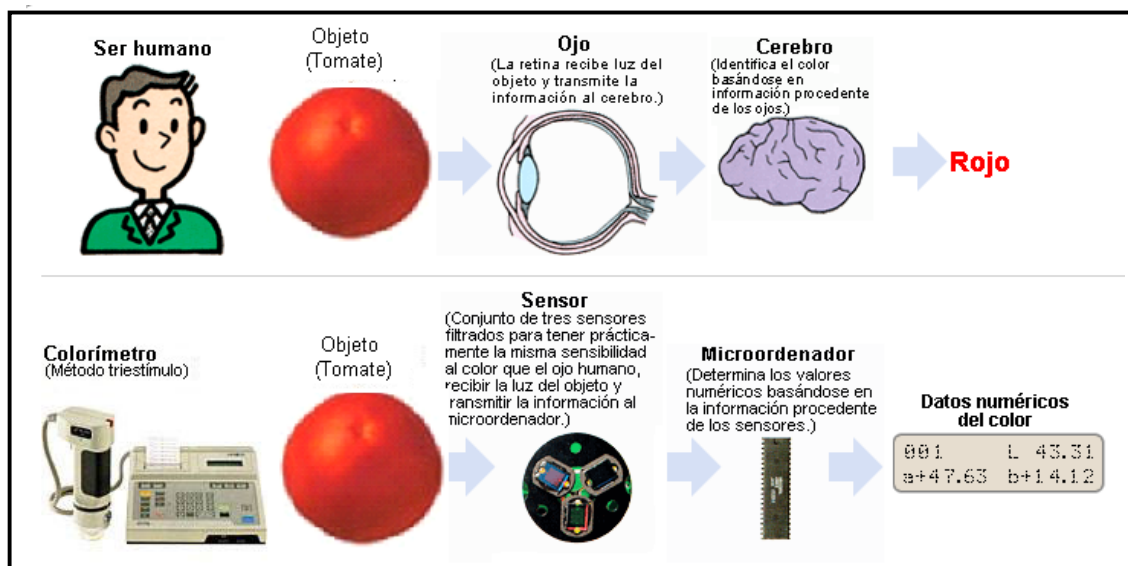


Figura 2.5. Comparación entre la forma en que detecta color el ojo humano y el colorímetro (La CIE, 2007).

Un modelo de color es una fórmula matemática abstracta que describe cómo pueden ser representados los colores. Para ello, el modelo se basa en tuplas numéricas compuestas normalmente por tres o cuatro valores o componentes de color (La CIE, 2007).

Los modelos más conocidos que describen las fluctuaciones de color son el RGB y el CMYK. Éstos al ser abstractos, no son útiles para describir un color concreto sin definir primero la escala o referencia. Son sistemas de color más o menos sesgados y sin mucha relación con las necesidades de cada aplicación, sobre todo, si no se tiene una función de asignación asociada a un espacio de color absoluto (La CIE, 2007).

La CIE (Comisión Internacional de Iluminación) es la autoridad internacional máxima en cuestiones de luz, iluminación, color y espacios de color. Gracias a esta entidad, se ha llegado a entender mejor el funcionamiento del color. La CIE estableció en los años 30 una serie de normas para los diferentes espacios de color que representan el espectro visible. Gracias a estas normas, se hacen factibles las comparaciones entre los diversos espacios de color de los visores y dispositivos.

Para definir al espectador medio y su respuesta al color, la CIE realizó una serie de pruebas sobre una amplia muestra de personas. Definieron un espectador medio, al que denominaron “observador estándar”, con tres tipos de sensores de color que responden a diferentes gamas de longitud de onda. Así, un área de trazado completa de todos los colores visibles, se percibe como una figura tridimensional (Ryer, 1998).

La CIE desarrolló el sistema de color XYZ o estándar. En la actualidad, este sistema se sigue usando como referencia para definir los colores que percibe el ojo humano y otros sensores de color. La necesidad de un espacio de color uniforme condujo a una serie de transformaciones no lineales del espacio CIE XYZ 1931. Pero no fue hasta el año 1976 cuando el espacio CIE XYZ se transformò al espacio CIELab que representa una especificación concreta de estas transformaciones la cual se conoce como espacio de color CIE1976 ( $L^*a^*b^*$ ) (Westland, 2001).

Lab es un espacio de color independiente. El espacio CIELAB permite especificar estímulos de color en un espacio tridimensional. El eje  $*L$  corresponde a

la luminosidad y va de 0 (negro) a 100 (blanco). Los otros dos ejes de coordenadas son  $a^*$ (eje rojo-verde) y  $b^*$ (eje azul- amarillo) que van de +120 a -120. Aquellos casos en los que  $a^* = b^* = 0$  se reconocen como acromáticos; por eso el eje  $L^*$  representa la escala acromática de grises que va de blanco a negro (Westland, 2001). La relación  $a^*/b^*$  se usa frecuentemente para representar color rojo en frutos de tomate (Worthington y Blaurock, 1969; Hall, 1964; Koskitalo y Ormrod, 1972).

Para especificar el color en distintos sistemas de coordenadas, se selecciona una cuya naturaleza depende del objetivo de medición. Cada sistema de coordenadas permite representar los colores en lo que se llama un diagrama de cromaticidad. La CIE ha estandarizado algunos de estos sistemas de coordenadas. Lo que se pretende con ello es conseguir representar la mayor cantidad de colores posibles con coeficientes triestímulo positivos (para que los colores se puedan obtener de forma aditiva). Es un estándar del CIE que pretende representar la mayor cantidad de colores posible mediante los valores triestímulo positivos. Sus coordenadas 'x', 'y' y 'z' (obtenidas a partir de los primarios 'X', 'Y' y 'Z' donde la componente 'Y' representa el factor de luminancia) cumplen con la siguiente igualdad:

$$x + y + z = 1 \quad ('x', 'y' \text{ y } 'z' \text{ valores entre } 0 \text{ y } 1).$$

Una aproximación útil para representar los colores es el diagrama cromático o de cromaticidad, que muestra la composición del color como función de 'x' e 'y'. Para cada valor de 'x' e 'y', se obtiene el valor correspondiente de 'z' a partir de la ecuación  $z = 1 - (x + y)$ . Las posiciones de varios colores del espectro – desde violeta (380nm) a rojo (780nm)- se indican alrededor del límite del diagrama cromático con forma de dedo pulgar. El diagrama de cromaticidad que se obtiene en el sistema de coordenadas XYZ abarca un espectro lo más amplio posible y tiene la siguiente representación grafica:

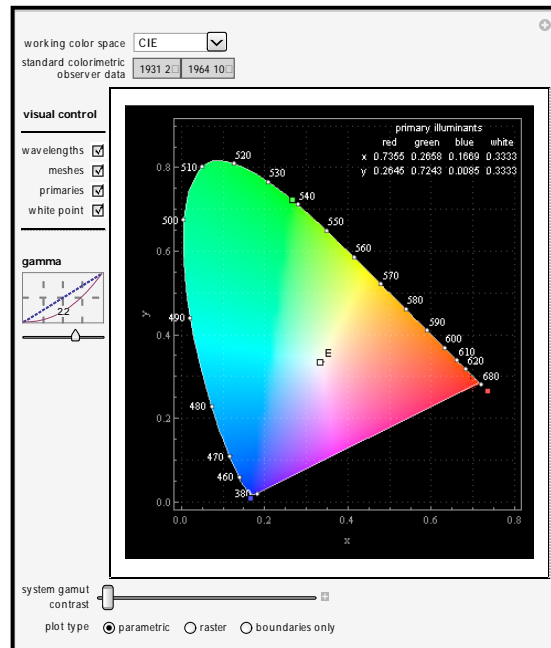


Figura 2.6. Diagrama de cromaticidad (Fuente: Wolfram, 2007).

## 2.7.2 La firmeza

Por tradición se ha empleado la práctica de golpear algunas frutas y hortalizas y definir según el sonido que se produce el estado de madurez. Tratando de emular esta práctica algunos autores han desarrollado dispositivos basados en la llamada técnica de “impulso acústico” o “respuesta acústica al impacto”, en los que la excitación de la muestra se produce cuando ésta es golpeada de forma controlada por un cuerpo impactante. Otros autores excitan la muestra sometiéndola a vibraciones de frecuencias determinadas conocidas como técnicas de “vibración forzada” (Diezma, 2003).

La firmeza de una fruta puede ser determinada por medio del penetrómetro, siendo esta una técnica destructiva que se basa en la estimación de presión necesaria para insertar un cono de tamaño específico en la pulpa de la fruta hasta una profundidad dada (Angón *et al.*, 2006). Actualmente se han diseñado los diversos sensores de firmeza que tienen la particularidad de no ser destructivos, sin

embargo, ninguno de ellos hasta el momento no ha dado buenos resultados, siendo el penetrómetro más exacto que otras técnicas (Angón *et al.*, 2006).

En tomates se han establecido correlaciones entre el coeficiente de firmeza y los resultados de evaluaciones sensoriales de paneles de expertos. Se ha medido la velocidad de transmisión de la onda acústica en melones, manzanas y peras, relacionandola con la firmeza de la pulpa. Con un mismo dispositivo se ha caracterizado la firmeza de productos tan dispares como melocotones y sandías (Herppich *et al.*, 2003).

### 2.7.3 Sólidos solubles totales

Los grados Brix ( $^{\circ}\text{Bx}$ ) se miden con un sacarímetro, que cuantifica la gravedad específica de un líquido, o, más fácilmente, con un refractómetro. La razón de que frecuentemente se repita el termino “azúcar y sólidos solubles” se debe a que el sistema refractométrico no sólo mide el contenido de azúcar en un líquido, sino también suma a la lectura de azúcar a todos o casi todos los componentes restantes solubles en agua, o sea todos aquellos elementos que se disuelven en agua como por ejemplo: los aminoácidos, fructuosa, proteínas, sacarosa, vitaminas, etc. Todas o casi todas estas sustancias forman parte de la lectura refractométrica, sumándose al contenido de azúcar y formando la lectura del refractómetro (Tobarra, 2003).

El refractómetro es un instrumento que se utiliza para determinar el contenido de sólidos solubles a partir del índice de refracción. De esta manera se establecen los  $^{\circ}\text{Brix}$ ,  $^{\circ}\text{Baumé}$ , que posee el tomate. El funcionamiento del refractómetro se basa en las variaciones que experimenta la refracción de un líquido al modificarse el contenido de sustancias disueltas (Tobarra, 2003).

La refractometría estima los cambios del índice de refracción de una sustancia cuando otra es disuelta en ella. Si consideramos el jugo de fruta como una sustancia

constituida por agua, su índice de refracción será mayor en cuanto mayor sea la cantidad de azúcar presente en ella (Tobarra, 2003).

La refracción se define como el cambio de dirección que experimenta una onda al pasar de un medio material al otro. Sólo se produce si la onda incide oblicuamente sobre la superficie de separación de los dos medios y si éstos tienen índices de refracción distintos. La refracción se expresa en el cambio de velocidad que experimenta la onda (Tobarra, 2003).

El índice de refracción se denomina como el cociente de la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la misma en el medio cuyo índice se calcula. Se simboliza con la letra  $n$ , tratándose del valor adimensional. El descubrimiento de este método, se atribuye al químico alemán profesor Brix (Tobarra, 2003).

$$n = c / v,$$

donde:

$c$  = la velocidad de la luz en el vacío;

$v$  = velocidad de la luz en el medio cuyo índice se calcula (agua, vidrio, etc.);

$n$  = índice de refracción del medio.

#### 2.7.4 pH

Cuando hablamos de ácido y alcalino estamos refiriéndonos a la concentración del hidrógeno. Ácido se caracteriza por el dominio del hidrógeno en la solución química, mientras que el alcalino es una sustancia que adsorbe el hidrógeno de esta solución.

Puesto que las concentraciones de los iones  $H^+$  y  $OH^-$  en una solución acuosa con frecuencia son representadas por los números muy pequeños y, por lo tanto, es difícil trabajar con ellos, Soren Sorensen propuso en 1909, una medida más práctica para expresarlos denominandola pH (Chang, 2007).

El pH es el logaritmo negativo de la concentración del ion de hidrógeno (Chang, 2007):

$$pH = -\text{Log} [H^+],$$

donde:

pH= potencial de iones hidrógeno;

$[H^+]$ = concentración de iones hidrógeno (mol/L).

Debido a que el pH sólo es una manera de expresar la concentración del ion hidrógeno y una medida de acidez, las soluciones ácidas y básicas se identifican por los valores de pH a 25°C, como sigue:

Ácidas:  $[H^+] > 1.0 \times 10^{-7} M$ ,  $pH < 7.00$ ;

Básicas:  $[H^+] < 1.0 \times 10^{-7} M$ ,  $pH > 7.00$ ;

Neutras:  $[H^+] = 1.0 \times 10^{-7} M$ ,  $pH = 7.00$ ;

Observe que el pH se aumenta a medida que la concentración de  $[H^+]$  disminuye. El valor del pH se puede medir de forma precisa mediante un potenciómetro, también conocido como pH-metro, un instrumento que mide la diferencia de potencial entre dos electrodos: un electrodo de referencia (generalmente de plata/cloruro de plata) y un electrodo de vidrio que es sensible al ión hidrógeno (Chang, 2007).

Otra forma imprecisa de medir pH de una solución es empleando los indicadores, ácidos o bases débiles que presentan diferente color según el pH. Una de las disoluciones de referencia más utilizadas es la Fenolftaleína. Por lo general, se emplea un papel impregnado con una mezcla de indicadores

Los componentes microelectrónicos han hecho posible diseñar los pequeños instrumentos portátiles de elevada calidad con pantallas digitales para la medición de pH (Jarquin, 2005).

### 2.7.5 Rugosidad

Es típico que en las aplicaciones de visión computarizada en la industria alimenticia, los elementos clave sean los descriptores visuales de los alimentos a partir de sus imágenes (Ballard y Brown, 1982). Estos descriptores son conocidos como características de las imágenes que pueden ser extraídos de ellas como indicadores de la calidad de los alimentos (Chaoxin *et al.*, 2006).

Las imágenes de productos alimenticios son capturadas mediante un sistema computarizado, y posteriormente son almacenadas, procesadas, y desplegadas en forma de matrices (cuyos elementos son píxeles las unidades elementales de procesamiento de imágenes), a través de las cuales es posible extraer las características de las imágenes (Chaoxin *et al.*, 2006).

De acuerdo a la información almacenada en los píxeles, las características de la imagen pueden ser clasificadas en cuatro tipos: color, tamaño, forma, y textura (Du y Sun, 2004). Color se refiere a la intensidad de grises en los píxeles, mientras que el tamaño refleja el número de píxeles y la forma de las fronteras de las imágenes de los alimentos. La rugosidad establece la dependencia entre los píxeles y sus vecinos, o bien, la variación de la intensidad de los píxeles (Chaoxin *et al.*, 2006).



Los descriptores basados en color pueden ser extraídos a partir de los diferentes espacios de color, tales como RGB (red, green, blue) y HSI (*hue, saturation, intensity*) por medio de los métodos estadísticos (Du y Sun, 2005; Zheng *et al.*, 2006). Los descriptores de forma son obtenidos generalmente mediante las mediciones del área, perímetro, largo, y ancho (Du y Sun, 2005; Wagner, 2005). La forma es caracterizada principalmente de dos modos: mediante mediciones dependientes de la forma tales como la compacticidad y la elongación; y mediciones independientes del tamaño, tales como, los momentos espaciales y descriptores de Fourier (Russ, 1999).

Respecto al análisis de textura son cuatro diferentes métodos utilizados: textura estadística, textura estructural, textura basada en transformaciones y textura basada en modelos (Bharati *et al.*, 2004; Zheng *et al.*, 2006). Los descriptores de textura han probado ser indicadores potenciales de las propiedades sensoriales, químicas y físicas de los alimentos (Chaoxin *et al.*, 2006).

De forma similar al color, tamaño y forma, la textura es otro importante descriptor que ha demostrado ser una herramienta eficiente por identificar en los patrones debido a su poderosa habilidad discriminativa (Chaoxin *et al.*, 2006). El análisis de textura es uno de los tópicos más activos en el campo de la inteligencia artificial, donde el análisis de los patrones inició desde la década de los 50 cuando apareció el análisis de textura que se mencionó por primera vez en la literatura (Kaizer, 1955).

El análisis de textura intenta discriminar entre los diferentes patrones que se observan dentro de imágenes mediante el análisis de la dependencia que existe entre los píxeles y sus píxeles vecinos, o bien, obteniendo la varianza de la intensidad de los píxeles a lo largo de la imagen (Kartikeyan y Sarkar, 1991).

La textura estadística se extrae por medio de las diversas aproximaciones estadísticas sobre la matriz que se obtiene de acuerdo con los órdenes de intensidad de los píxeles en las imágenes (Bharati *et al.*, 2004).

Se ha encontrado que los descriptores de textura contienen información útil para evaluar la calidad de frutas y vegetales. Fernández *et al.* (2005) predijo mediante estos descriptores de textura el contenido de azúcares en las naranjas con un coeficiente de correlación de 0.83 (Kondo *et al.*, 2000). Más aún, con la contribución de las imágenes espectrales (SI) y de resonancia magnética (MRI) ya es posible adquirir imágenes de la estructura interna de los alimentos (Chaoxin *et al.*, 2006). Mediante la aplicación de análisis de textura, principalmente el método de la matriz de co-ocurrencia (COM), a la estructura interna de los alimentos se obtiene un mayor número de atributos de la calidad de frutos y vegetales (Kavdir y Guyer, 2002; Létal *et al.*, 2003; Thybo *et al.*, 2004).

Los atributos de rugosidad de las imágenes describen ya sean los patrones de textura o bien las propiedades de la superficie de los alimentos, incluyendo la tosquedad, la fineza, la granularidad, la aleatoriedad y la linealidad (Haralick *et al.*, 1973). Estas propiedades de textura, las cuales caracterizan los detalles acerca de cómo están compuestas las superficies y de cómo está estructurada la dependencia entre los píxeles mediante la variabilidad de la intensidad y corresponden a la forma en que la percepción humana capta la superficie de los alimentos (Amadasun y King, 1989).

#### 2.7.6 Iluminación

La iluminación durante la adquisición de las imágenes tiene un impacto significativo sobre los descriptores obtenidos, especialmente color y rugosidad (Du y Sun, 2004). Un sistema de iluminación correctamente diseñado incrementa el contraste y reduce el ruido presente en las imágenes, lo cual a su vez aumenta la

exactitud de los resultados de la segmentación, relacionando de una mejor forma los descriptores presentes en la imagen de los alimentos.

Mas allá de esto, cuando se incrementa la iluminación, la intensidad de los píxeles se aumenta también, lo cual incrementa los valores de los descriptores de color, como consecuencia de la modificación en la intensidad. Esto cambiará los descriptores de textura, los cuales están basados en la intensidad y la información espacial de los píxeles lo contrario se observa cuando la iluminación disminuye (Chaoxin *et al.*, 2006).

Debido al impacto que tiene la iluminación sobre los descriptores de la imagen, es importante señalar que las imágenes de referencia tiene que adquirirse bajo un mismo y consistente sistema de iluminación (Chaoxin *et al.*, 2006).

Los métodos estadísticos de análisis de la textura son más adecuados para las imágenes que han sido capturadas con cámaras ordinarias, mientras que los métodos basados en transformaciones son más competentes cuando se trabaja con imágenes obtenidas por medios ultrasónicos o de resonancia magnética. La aplicación de los métodos basados en modelos es mucho menos común que la de los métodos estadísticos o basados en las transformaciones, debido a que las últimas se derivan de las estimaciones empíricas.

### 2.7.7 Geometría Fractal

La investigación a realizarse parte del supuesto que si no se puede medir algo con precisión no se puede manejar (Cox *et al.*, 2002), de un modo sustentable. Las ondas electromagnéticas de diferente longitud son barras métricas de alta precisión aptas para medir los diversos atributos de los sistemas complejos (y por ende su calidad y sustentabilidad de su manejo), y en primer lugar la rugosidad del sistema.

Las técnicas tradicionales de análisis de los sistemas naturales (y específicamente de los agro-ecosistemas) han demostrado ser poco representativas de la complejidad natural o inducida por el hombre (antropogénica) de la variabilidad espacio/temporal de los sistemas. Por ende, tanto técnicas de medición como de interpretación, incluyendo la estadística clásica y geoestadística requieren de una modernización acorde a los avances científicos alcanzados en distintas áreas del conocimiento. Para poder medir los atributos de estos sistemas complejos, multiescalares, variables en el espacio y dinámicos en el tiempo, hemos seleccionado una caja de herramientas (Mandelbrot, 2002) de la Geometría Fractal para el análisis estadístico de los datos de estos sistemas: sean éstos las medidas puntuales de los atributos del sistema, series de tiempo que reflejan su comportamiento o las imágenes multiescalares, siempre cuando las técnicas de medición utilizadas sean no invasivas. En el caso concreto de la presente investigación todos los datos serán recopilados vía la exploración electromagnética pasiva o activa. El rasgo universal que une estos bancos de datos tan diversos es su invariancia al escalado o *scaling* (Kei *et al.*, 2004).

Las distribuciones homogéneas en una dimensión en el plano o en el espacio E- dimensional (E de Euclides) tienen dos propiedades deseables: son invariantes al desplazamiento y al cambio de escala. Sin embargo actualmente, no se cree en la homogeneidad estricta del mundo (Mandelbrot, 1983). Y, a pesar de esto la mayor parte de los fenómenos naturales son invariantes bajo ciertas transformaciones de escala, propiedades que Mandelbrot llamó escalado.

El fractal es un objeto irregular y fragmentado (Mandelbrot, 1983). Un conjunto fractal que se formó bajo una similitud geométrica ordinaria se llama auto-similar. Fractal significa desorden y cubre casos de irregularidad intratable; el fenómeno de escalado establece cierto tipo de orden (Oleschko, 2004). En física los aspectos analíticos del escalado se asocian con la noción de grupos de renormalización, mientras que la Geometría Fractal estudia los aspectos geométricos del escalado no ordinario (Mandelbrot, 1983).

Los fractales son construcciones geométricas con propiedades específicas, cuya complejidad se deriva de su textura no homogénea y su importante rugosidad externa (Smith *et al.*, 1996). La lagunaridad  $\Lambda(r)$  y la dimensión de masa  $D_m$  son medidas de la primera, mientras que la dimensión de la superficie fractal  $D_s$  lo es de la última (Oleschko, 2004). Las principales medidas de los objetos fractales varían como una potencia fraccionaria de la escala (ley de potencia) (Oleschko, 2004). La auto-similitud es la propiedad más estricta de los fractales isotropitos, cuyas piezas son geoméricamente similares a la forma completa (auto-similitud geométrica), y cuyos momentos estadísticos (media, desviación estándar y otros) son los mismos independientemente de la escala (Mandelbrot, 1983; Turner *et al.*, 1998). La invariancia al traslado de un fractal auto-similar se mide mediante la lagunaridad. Todos los neologismos y medidas específicas introducidas [ $\Lambda(r)$ ,  $D_m$ ,  $D_s$ ] son las herramientas más comunes de la rica caja que maneja la Geometría Fractal (Oleschko, 2004). Estas herramientas se utilizan como pruebas mucho más potentes de la invarianza al escalado que las medidas alternativas, ya que no destruyen las tendencias empíricas observadas (Mandelbrot, 2002).

Auto-afinidad es otro concepto fractal básico que es especialmente útil cuando se analizan las superficies rugosas, series de tiempo, trazas o perfiles (Oleschko, 2004). Para los objetos auto-afines, las diferentes direcciones geométricas se escalan de distinto modo lo cual permite preservar la forma o los momentos estadísticos del conjunto (Carr, 1997).

El exponente de Hurst al igual que la dimensión fractal describe la invariancia al escalado de diferentes sistemas.  $H$  es especialmente útil para expresar la rugosidad de las imágenes, series de tiempo y bases de datos, con base en la siguiente conjetura (Mandelbrot, 1983):

$$D=2-H,$$

donde  $D$  es la dimensión fractal, y 2 es la dimensión del espacio común Euclidiano, en el cual está embebido el fractal.

De acuerdo con la literatura los parámetros fractales arriba mencionados pueden ser calculados a través de varios métodos, como el Rango Re-escalado (R/S), Ondoletas (WT), Semivariograma (SV), entre otros. Todos estos métodos forman parte del software comercial Benoit (1.3) utilizado en el presente estudio.

### 2.7.8 Modelo Matemático

La hipótesis principal de esta tesis es que el histograma de una imagen digital en escala de grises de cualquier fractal hereda la invariancia al escalado del objeto (Oleschko *et al.*, 2008). Se afirma que el contorno superior del histograma tiene una forma auto-afín, y su rugosidad se cuantifica mediante el exponente de Hurst, aplicando el modelo de Korvin (Oleschko y Korvin, 2008). Se denota el nivel de gris por el valor entero  $g$  (con  $0 \leq g \leq 255$ ) y por  $f(g)$  a la frecuencia normalizada en la columna del histograma correspondiente a  $g$ . La auto-afinidad (Mandelbrot, 1983) significa que la rugosidad promedio  $S(g, k)$  del histograma en el rango de  $k$  niveles de gris consecutivos  $0 \leq g_1, g_1 + 1, \dots, g_1 + k - 1 = g_2 \leq 255$ , cambia con la longitud de este rango como una función de potencia:

$$S = \sqrt{\langle S^2 \rangle_{ave}} = ak^\beta. \quad [1]$$

El cumplimiento de [1] se ha verificado experimentalmente analizando imágenes tomadas a diversas escalas según se reporta en las investigaciones previas (Oleschko *et al.*, 2004; 2006; 2008). El exponente  $\beta$  se puede usar de manera confiable para caracterizar la rugosidad de la distribución sólido/poro de un suelo durante su secado (Korvin *et al.*, 2006). En este documento el modelo matemático señalado se ajustó para soportar la hipótesis [1] y utilizarlo para el caso especial del análisis de madurez del tomate.

Supóngase que se tiene una imagen digital de un objeto fractal formado por una colección de  $N_1$  pixeles, donde existen las razones físicas para asumir que los niveles de gris superiores a un umbral  $g_1$  se distribuyen según una función de potencia (Mandelbrot 1983, Korvin *et al.*, 2006):  $\text{Prob}(g = x) = p_g \sim x^{-\alpha}$ . El número total de pixeles empleados para construir el histograma no es sesgado desde la columna  $g_1$  hasta la columna  $g_2$  es decir:

$$N \approx N_1 \int_{g_1}^{g_2} g^{-\alpha} dg \sim N[(g_1 + k)^{1-\alpha} - g_1^{1-\alpha}] \sim N_1 k^{1-\alpha}, \quad (2)$$

para un  $k$  suficientemente grande.

Consideremos una columna  $g$  dentro del rango arriba especificado. La probabilidad de que la altura de la columna sea  $h$  (es decir, que  $h$  pixeles de la imagen tengan el nivel de gris  $g$ ) está dada por  $P(g, h) = \binom{N}{h} p_g^h (1 - p_g)^{N-h}$ . Si empleamos paréntesis angulares para denotar la esperanza matemática, por medio de álgebra simple (véase, por ejemplo, "Binomial distributions" de Weisstein, 2008) se obtiene:

$$\langle h_g \rangle = \sum_{h=0}^N h P(g, h) = N p_g, \quad (3)$$

$$\langle h_g^2 \rangle = \sum_{h=0}^N h^2 P(g, h) = N p_g (1 - p_g) + N^2 p_g^2, \quad (4)$$

así que la desviación estándar de la altura de la columna  $g$  es según Korvin (Oleschko *et al.*, 2008) igual a:

$$S_g^2 = \langle (h - \langle h_g \rangle)^2 \rangle = \langle h_g^2 \rangle - \langle h \rangle^2 = N p_g (1 - p_g). \quad (5)$$

A partir de las ecuaciones (5) y (2), el promedio  $S_g^2$  sobre el rango  $g_1 \leq g \leq g_1 + k - 1 = g_2$  es, para  $k$  suficientemente grande, iguala:

$$\begin{aligned}
 S_{\text{ave}}^2 &= \frac{N}{k} \sum_{g=g_1}^{g_2} p_g (1 - p_g) \approx \frac{N}{k} \sum_{g=g_1}^{g_2} p_g \sim \frac{N}{k} \int_{g_1}^{g_2} g^{-\alpha} dg \\
 &\sim \frac{N}{k} k^{1-\alpha} \sim \frac{N_1 k^{1-\alpha}}{k} \sim k^{1-2\alpha},
 \end{aligned} \tag{6}$$

lo cual demuestra la ecuación [1] si hacemos  $\beta = \frac{1-2\alpha}{2}$ .

Este simple modelo matemático (Oleschko *et al.*, 2008) permite realizar diversas generalizaciones. Al adquirir las imágenes a diferentes resoluciones se cambia el histograma a niveles de gris debido a que un patrón de intensidad dado puede perder sus detalles a resoluciones bajas, o revelar más detalles con un escrutinio más detallado. Es posible especular que la resolución afectará al parámetro  $\alpha$  en una distribución de pixeles teórica  $\text{Prob}(g = x) = p_g \sim x^{-\alpha}$ , y en consecuencia también al exponente de Hurst  $\beta = \frac{1-2\alpha}{2}$ . Si en la ecuación [1],  $S = \sqrt{\langle S^2 \rangle_{\text{ave}}} = ak^\beta$ , el factor  $a$  y el exponente  $\beta$  cambian con el primer elemento del rango ( $g_1$ ), esto indica que tanto la imagen como el objeto correspondiente tienen una naturaleza multifractal.

## 2.8 Coeficiente de correlación lineal de Pearson

### 2.8.1 Correlación

En probabilidad y estadística, la correlación indica la fuerza y la dirección de una relación lineal entre dos variables aleatorias. Se considera que dos variables cuantitativas están correlacionadas cuando los valores de una de ellas varían sistemáticamente con respecto a los valores homónimos de la otra: si tenemos dos



variables (A y B) existe correlación si al aumentar los valores de A lo hacen también los de B y viceversa. La correlación entre dos variables no implica, por sí misma, ninguna relación de causalidad (Montgomery, 1999).

La relación entre dos variables cuantitativas queda representada mediante la línea de mejor ajuste, trazada a partir de la nube de puntos. Los principales componentes elementales de una línea de ajuste y, por lo tanto, de una correlación, son la fuerza, el sentido y la forma:

- La fuerza mide el grado en que la línea representa a la nube de puntos: si la nube es estrecha y alargada, se representa por una línea recta, lo que indica que la relación es *fuerte*; si la nube de puntos tiene una tendencia elíptica o circular, la relación es *débil*.
- El sentido mide la variación de los valores de B con respecto a A: si al crecer los valores de A lo hacen los de B, la relación es *positiva*; si al crecer los valores de A disminuyen los de B, la relación es *negativa*.
- La forma establece el tipo de línea que define el mejor ajuste: la línea recta, la curva monótonica o la curva no monótonica.
- Relación espuria.

En estadística, una relación espuria (o, a veces, correlación espuria) es una relación matemática en la cual dos acontecimientos no tienen conexión lógica, aunque se puede implicar que la tienen debido a un tercer factor no considerado aún (llamado "factor de confusión" o "variable escondida"). La relación espuria da la impresión de la existencia de un vínculo apreciable entre dos grupos que es inválido cuando se examina objetivamente (Montgomery, 1999).

### 2.8.2 Nube de Puntos

La representación gráfica se realiza mediante un dibujo realizado en un sistema bidimensional de coordenadas Cartesianas. En este tipo de diagramas cada

punto representa la puntuación que el sujeto obtiene en las dos variables, determinando su puntuación por la lectura de los valores que aparecen en la escala vertical y horizontal (Montgomery, 1999).

Según la forma de la nube de puntos podemos obtener la siguiente información:

- Conocer si existe una relación directa o inversa entre las variables;
- Saber si esa relación es fuerte o débil;
- Determinar si la relación se ajusta a un modelo lineal o bien a otro modelo matemático (ej: modelo curvilíneo).

La producción de este tipo de diagramas es el paso más importante a la hora de estudiar la correlación entre dos variables. Con frecuencia se descuida a veces este paso, o incluso es despreciado en los análisis de datos pasando directamente los autores a utilizar estadísticos más complejos.

La inspección del diagrama es esencial para detectar problemas como son las puntuaciones "outliers", que pueden deberse desde una mala introducción de la información a la mezcla de datos correspondientes a distribuciones distintas.

Es también útil para determinar si los estadísticos de correlación que dependen de relaciones lineales son apropiados, o bien es necesario sustituirlos por otros más pertinentes (Montgomery, 1999).

### 2.8.3 Coeficientes de correlación

Existen diversos coeficientes que miden el grado de correlación, adaptados a la naturaleza de los datos. El más conocido es el coeficiente de Pearson, que se obtiene dividiendo la covarianza de dos variables por el producto de sus desviaciones estándar (Montgomery, 1999).

$$r = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \cdot \sigma_Y}$$

siendo:

$\sigma_{XY}$  la covarianza de  $(X, Y)$ ,

$\sigma_X$  y  $\sigma_Y$  las desviaciones típicas de las distribuciones marginales.

El valor del índice de correlación varía en el intervalo  $[-1, +1]$ :

- Si  $r = 0$ , no existe ninguna correlación. El índice indica que existe una independencia total entre las dos variables, por lo tanto, que la variación de una de ellas no influye en absoluto en el valor que pueda tomar la otra.
- Si  $r = 1$ , existe una correlación positiva perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables denominada relación directa: cuando una de ellas aumenta, la otra también lo hace en idéntica proporción.
- Si  $0 < r < 1$ , existe una correlación positiva.
- Si  $r = -1$ , existe una correlación negativa perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables llamada relación inversa: cuando una de ellas aumenta, la otra disminuye en idéntica proporción.
- Si  $-1 < r < 0$ , existe una correlación negativa.

El coeficiente de correlación de Pearson es un índice estadístico que mide la relación lineal entre dos variables cuantitativas. A diferencia de la covarianza, la correlación de Pearson es independiente de la escala de medición de las variables.

#### 2.8.4 Coeficiente de Determinación, $R^2$

El coeficiente de determinación mide la proporción de la variación de Y que se explica por la variable independiente X en el modelo de regresión (Montgomery, 1999).

Para estimar la bondad de un ajuste frecuentemente se prefiere utilizar el Coeficiente de Determinación,  $R^2$ , que es el Coeficiente de Correlación elevado al cuadrado.  $R^2$  se determina mediante cualquiera de las dos expresiones siguientes:

$$R^2 = \frac{\left( \frac{\sum x_i y_i}{n} - \bar{x} \bar{y} \right)^2}{\left( \frac{\sum x_i^2}{n} - \bar{x}^2 \right) \left( \frac{\sum y_i^2}{n} - \bar{y}^2 \right)}$$

$$R^2 = \frac{\left( n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i \right)^2}{\left[ n \sum x_i^2 - \left( \sum x_i \right)^2 \right] \left[ n \sum y_i^2 - \left( \sum y_i \right)^2 \right]}$$

El valor de  $R^2$  oscila entre 0 y +1 y cuando hay una buena correlación lineal,  $R^2$  es muy cercano a +1. Normalmente los valores de  $R^2 \geq 0.70$  se aceptan como indicadores de la significancia estadística de correlación, sin embargo, es a consideración del investigador y su fin que  $R^2$  se toma como el límite. Cuando no hay correlación o bien ésta no es lineal,  $R^2$  es bajo e incluso cercano a cero.

### 3 MATERIALES Y METODOS

Para determinar la calidad del fruto de tomate por medio de diversas características visuales del mismo se ponderaron diversos factores para definir cuáles de ellos eran los más pertinentes para el presente estudio. Las características visuales que fueron consideradas como posibles indicadores fueron:

- A. Color;
- B. Contenido de sólidos solubles;
- C. pH;
- D. Firmeza;
- E. Forma;
- F. Tamaño;
- G. Masa seca;
- H. Acidez titulable;
- I. Conductividad eléctrica;
- J. Contenido de vitamina C.

De estos factores, la forma fue descartada para propósitos del estudio en virtud de que su cuantificación requiere de una gran cantidad de parámetros (tales como la altura, el diámetro mayor, el diámetro menor y la excentricidad con respecto a cada uno de los correspondientes planos coordenados) que describían la forma de una manera poco precisa y cuya medición exacta era muy elaborada para ser considerados una medida instantánea. Ha habido estudios con respecto al tamaño de la fruta del tomate y su relación con las propiedades internas de la misma que no han sido concluyentes. Por otro lado el cálculo de la masa seca involucra mediciones destructivas que interfieren con las mediciones futuras del mismo espécimen como es requerido para cumplir con los objetivos del presente estudio. En lo que refiere a medición de la acidez titulable este se realiza tradicionalmente por los métodos imprecisos de aproximación manual, siendo la determinación subjetiva ya que

depende de la habilidad y experiencia de la persona que realiza la prueba, además de ser poco viable para ser utilizada en campo. Tanto la conductividad eléctrica como el contenido de vitamina C no son representativos al determinar los atributos apreciados por los consumidores, tales como, sabor, textura, color, etc.

Así pues, los factores seleccionados como básicos para presente estudio son cuatro:

- A. Color;
- B. Contenido de sólidos solubles(SST);
- C. pH;
- D. Firmeza;
- E. Rugosidad.

Dichos factores coinciden con los aspectos del tomate más relevantes para el consumidor al momento de medir su calidad, que son el color, sabor y firmeza. Como se mencionó en el capítulo anterior el sabor esta principalmente correlacionado con el pH y la dulzura. Este último atributo depende del contenido de sólidos solubles.

### **3.1 Ubicación geográfica y clima del área experimental**

El experimento se realizó con las muestras de tomate obtenidas del Centro de Producción Hortícola ubicado en las instalaciones del la Universidad Autónoma de Querétaro, campus Amazcala, el cual tiene una extensión de 5,400 m<sup>2</sup> y se encuentra en la comunidad del mismo nombre del municipio de El Marqués, Querétaro. El clima de Amazcala es semiseco y sus coordenadas geográficas son: latitud norte 20° 42', longitud oeste de 100° 16' y altitud de 1920 m.



Figura 3.1 Ubicación del Campus Amazcala de la DEPEFI, Facultad de Ingeniería, UAQ (Imagen tomado de GoogleEarth, 2004).

### 3.2 Selección de las muestras

Para cuantificar los atributos de interés (color, SST, pH, rugosidad y firmeza) del fruto del tomate se trazó un transecto a partir del punto de referencia tomado al azar dentro del invernadero con única condición que no pertenezca a los primeros 5 m de su perímetro. Esto debido a que según la literatura existen las diferencias climáticas en las fronteras del invernadero (Castañeda, 2005). A partir de ese punto cada cinco metros se definió un punto de muestreo, en el cual se eligió una muestra (planta) de referencia con los frutos de tomate representativos de diferentes estados de madurez, de acuerdo a la clasificación de USDA (USDA, 2003). Se llegó a formar una muestra compuesta de diez tomates por planta.

Las plantas seleccionadas fueron etiquetadas y numeradas progresivamente del 1 al 10 mediante etiquetas, visibles para los cosechadores lo cual asegura la

conservación de las plantas de referencia hasta la última fecha del muestreo. Sobre cada planta se seleccionaron cinco frutos los cuales también fueron etiquetados del 1 al 5 de acuerdo a su estado de madurez, utilizando el número 1 para el tomate menos maduro y 5 para el de mayor madurez.



Figura 3.2. Planta número dos seleccionada y etiquetada para fines experimentales.

Antes de comenzar las mediciones se capturó la imagen de toda la planta así como de cada fruto etiquetado. Las imágenes a color fueron tomadas mediante una cámara FireWire modelo DBK 31BF03. La imagen que se captura de cada espécimen, se tomó de la parte frontal, donde incidían los rayos del sol. Como fondo se utilizó una manta azul. Se cuidó que las imágenes se tomaran a la misma hora, para mantener la iluminación al mismo nivel.





Figura 3.2.1. Captura de imagen a color del fruto.

### 3.3 Determinación no invasiva de color

Los valores del color se midieron en la parte media del fruto de tomate, al lado que refleja la luz del sol, utilizando un colorímetro CR-310, con un procesador de datos Minolta DP-301. Este equipo mide el color reflejado de las superficies mediante los cinco atributos básicos del color. el equipo fue calibrado antes de ser utilizado con un plato estándar blanco ( $Y = 93.9$ ,  $x = 0.313$ ,  $y = 0.321$ ) (Anon, 1995). En este estudio se utilizó el espacio de color del sistema CIELAB, que incluye los atributos  $a^*$ ,  $b^*$  y luminosidad ( $L^*$ ).  $L^*$  indica que tan claro u oscuro es el color;  $a^*$ , mide la presencia del verde ( $-a^*$ ); y  $b^*$ , cuantifica la tendencia del azul ( $-b^*$ ) al amarillo ( $+b^*$ ).

Para determinar el desarrollo del color rojo en los tomates se calculó la relación  $a^*/b^*$ , a partir de esta relación se obtuvo el estado de madurez del tomate de una forma precisa, basándose en el trabajo de Batu (2004), quien utiliza la tabla patrón de color de la USDA. Esta última clasifica el desarrollo de color, en 6 estados de madurez.



Figura 3.3. Medición de color *in situ*.

### 3.4 Medición no invasiva de la firmeza

Para medir la firmeza del fruto se utilizó un durómetro digital no invasivo HPE-II-Fff, con un identador de cilindro  $0.25 \text{ cm}^2$  especial para tomate. El identador no penetra la piel del fruto, los valores medidos son coeficientes, que dependiendo del identador utilizado, determinan la firmeza. El tiempo de medición es seleccionado con base en las necesidades del usuario, y el valor de firmeza se calibra, haciendo una medición a los 0 segundos, a los 3 segundos y a cualquier lapso de tiempo seleccionado por el usuario y medido en segundos que puede variar entre 0 y 99 segundos, con única condición que el lapso de tiempo seleccionado sea igual en todas las mediciones.

El durómetro se colocó sobre el fruto de forma vertical, la lectura parpadeante sobre la pantalla indica ópticamente la medición en curso. Al final de la medición suena una señal acústica. El rango de medición es de 0 -100. La precisión de la lectura es de  $\pm 5 \text{ Fff}$ .



Figura 3.4. Medición de firmeza con durómetro digital HPE-II-Fff.

### **3.5 Medición de sólidos solubles totales**

La determinación de los sólidos solubles de las muestras de tomate se realizó aplicando la técnica de refractometría descrita por la Norma Mexicana NMX-F-103-1965. La muestra se tomó de la parte central del fruto de tomate del modo menos invasivo posible utilizando una jeringa. El refractómetro portátil digital PR-201 $\alpha$  marca Atago, tiene un rango de medición de 0 a 60 %, con una exactitud de 0.1% (10 a 40 °C), y compensación automática de temperatura. Rango de temperatura de medición va de 10 a 40 °C. El instrumento fue calibrado con agua destilada.

Después de extraer la muestra (Fig. 3.6a) .el orificio creado por la aguja se cubrió con la cera miel (Fig. 3.6b), esto con el fin de que el fruto no se oxide. La lectura se obtuvo directamente colocando una gota de la muestra extraída en el refractómetro (Fig. 3.6 c). Para obtener la cantidad de SST representativa de cada clase, se calculó el promedio de los SST por clase expresados en °Brix.

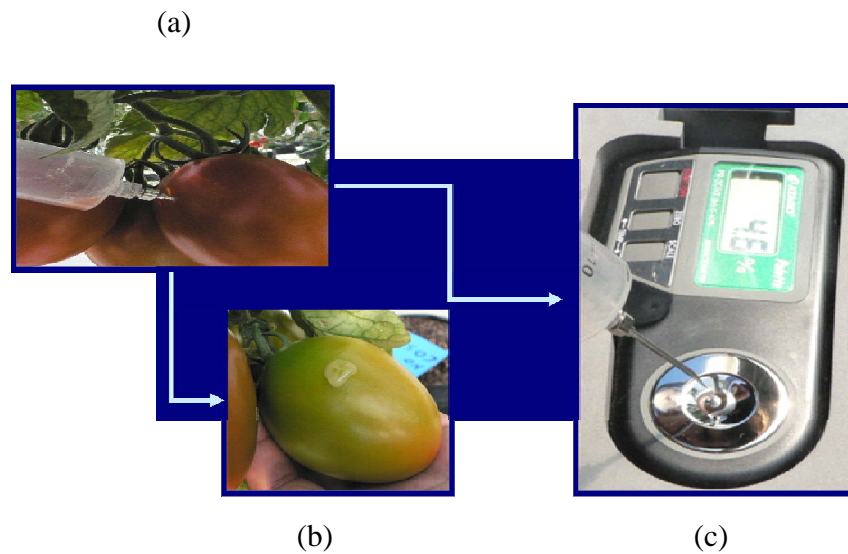


Figura 3.5. Medición de SST.

### 3.6 Medición del pH

Para medir la acidez de las muestras se utilizó el mismo extracto que fue extraído para medir el contenido de los SST. Se utilizó un pH-metro Twin pH B-212, marca Oriba, con un rango de medición desde pH 2 a 14, y una exactitud de  $\pm 0.1$  pH. Rango de temperatura de medición abarca desde 5 hasta 35 °C. El instrumento de medición fue calibrado previamente con una solución buffer (pH=7 y pH=4). La lectura se obtuvo directamente colocando una gota de la muestra extraída en el pH-metro.

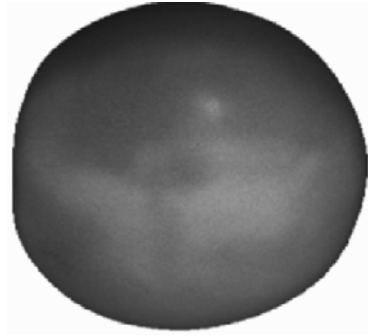


Figura 3.6. pH- metro digital Twin pH B-212.

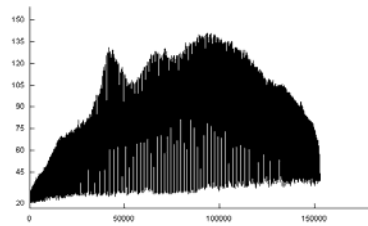
### 3.7 Tratamiento de las imágenes

Ya con las muestras obtenidas, se realizó el procesamiento de las imágenes a color. El proceso se inició convirtiendo la imagen original a escala de grises (Fig. 3.7a) de 8 bits mediante el software *Paint Shop Pro* (versión 7.04). A continuación, con el mismo software la muestra se segmentó para obtener la sección de interés del tomate, aplicándole una máscara para eliminar los píxeles con valor cero que intervienen en el cálculo de la función de distribución de probabilidades.

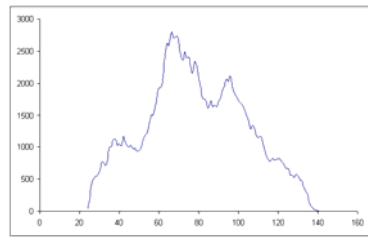
A continuación mediante el algoritmo Histo\_Gene (Parrot, 2003) la imagen se convirtió en una serie de tiempo (Fig. 3.7b) y a partir de este archivo utilizando el programa Freq\_Hist, escrito por Parrot (2003), se obtuvo la función de distribución de probabilidades (pdf) de la intensidad de grises (Fig. 3.2c) Este último archivo se utilizó para el análisis R/S realizado por el paquete de cómputo comercial Benoit versión 1.3 (Torres *et al.*, 2007).



(a)



(b)



(c)

Fig.3.7 Procesamiento de las imágenes; (a) Imagen en escala de grises; (b) Series de Tiempo de intensidades de gris; (c) Función de distribución de probabilidades (PDF) extraídas a partir de la imagen.

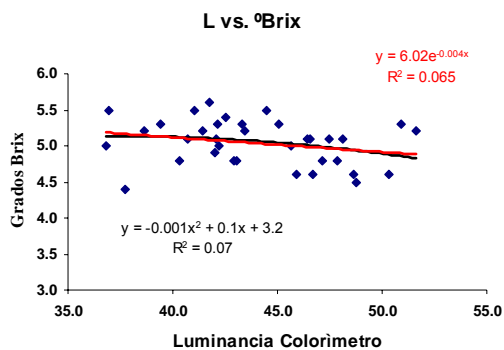
## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### ***4.1 Relación entre los atributos de color del tomate y los parámetros internos de calidad***

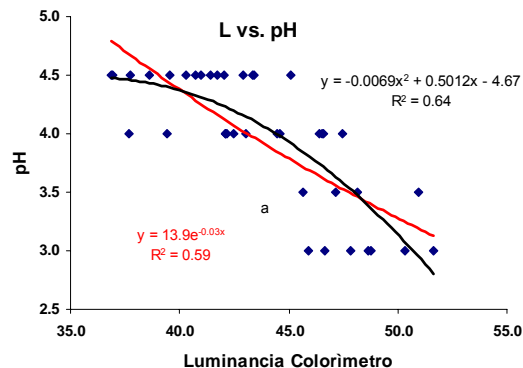
El análisis de los datos capturados mediante el Colorímetro Triestímulo en el espacio de color CIE Lab para el banco de datos nos permitió observar que las normas de clasificación con base a la tonalidad utilizadas actualmente por las compañías empaquetadoras y pequeños productores no permiten establecer una correlación estadísticamente significativa entre el color y las características internas de los tomates.

En la Fig. 4.1.1 se presentan los resultados del análisis de correlación entre la componente de luminancia del color y los atributos químicos internos del fruto SST y pH. La distribución de las variables se ajustó mejor al modelo de regresión lineal del tipo exponencial y polinomio de segundo orden. Sin embargo, los resultados obtenidos no muestran una relación significativa entre los valores de luminancia y el contenido de SST. Más aún, los coeficientes de correlación calculados son inferiores a 0.5 sin existir una diferencia significativa entre los modelos lineal y polinomial de segundo orden.

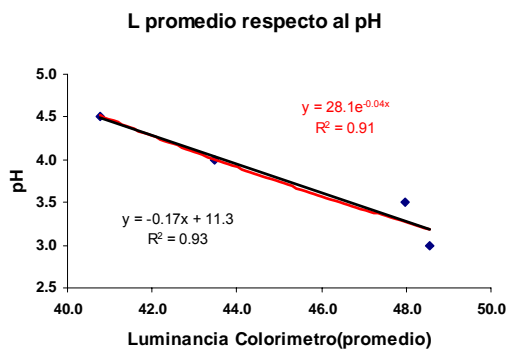
En la Fig. 4.1.1 (b) mostramos el análisis de correlación entre el valor de luminancia de las muestras obtenidas y pH. Se observa una tendencia clara a la alta dispersión de los datos de luminancia y un ajuste no significativo exponencial con  $R^2 = 0.59$ . El modelo polinomial de segundo orden tuvo un ajuste mejor con el coeficiente de determinación igual a  $R^2 = 0.64$  mejorando también de manera sustancial el grado de ajuste en comparación con los resultados obtenidos para los SST. Se observa una tendencia inversamente proporcional entre los valores de luminancia y pH, lo cual permite inferir, es una primera aproximación, que la componente de luminancia de las muestras obtenidas puede ser un indicador no invasivo del grado de acidez o alcalinidad del fruto.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.1.1 Relación entre la luminancia y SST(a), pH (b), así como entre la luminancia promedio respecto al pH (c).

Después de observar la tendencia presentada entre la componente de color luminancia y el pH, se analizó el valor de la luminancia promedio respecto al valor de pH. En la Fig. 4.1.1 (c) mostramos los resultados del análisis de correlación entre el valor de luminancia promedio respecto al pH. Al analizar la relación entre ambos parámetros se obtuvo un alto grado de ajuste, observándose una tendencia directamente proporcional y un coeficiente de determinación igual a  $R^2 = 0.91$ . Estos datos reafirman nuestra primera conjetura, de la componente de luminancia de cómo indicador no invasivo del pH.



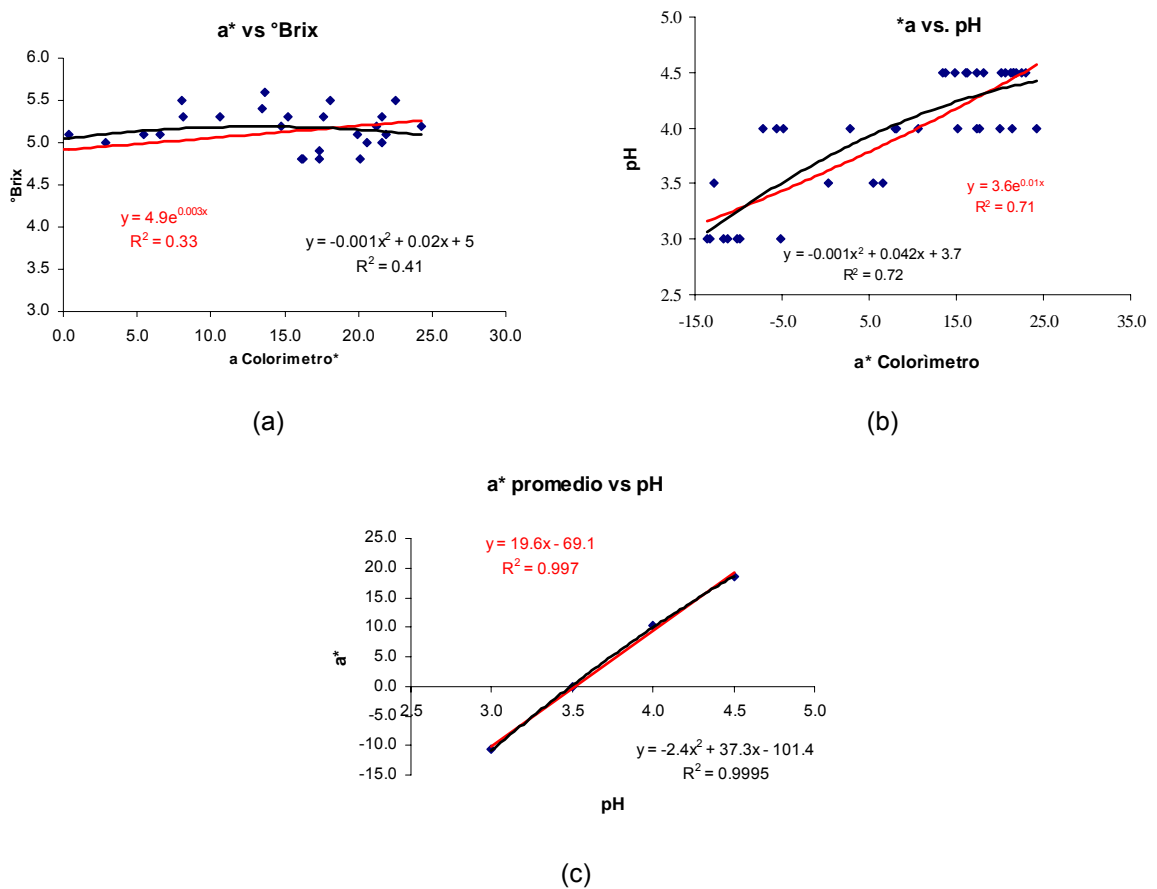


Figura 4.1.2 Relación de la componente de color verde-magenta  $a^*$  con SST (a) y pH (b),  $a^*$  promedio respecto al pH (c).

Durante la presente investigación se esperaba que, acorde a las prácticas tradicionales, el aumento en el valor de la componente de color  $a^*$  (indicador del mayor grado de madurez) conduciría a una relación directamente proporcional entre el contenido de SST y color. Sin embargo, como se puede observar en la Fig. 4.1.2(a) dicha relación dista en gran medida de ser una expresión lineal. Mediante el uso de ajuste exponencial polinomial de obtuvieron coeficientes de correlación del orden de  $R^2 = 0.33$  y  $R^2=0.41$ , respectivamente. Lo cual nos indica que es necesario utilizar más información que simplemente la proporcionada por el desarrollo de coloración del fruto para el caso del tomate. En la Fig. 4.1.2 (b) mostramos la correlación entre el componente  $a^*$  y la concentración de iones de hidrógeno,

observándose una tendencia estadísticamente significativa con un coeficiente de determinación igual a 0.72. Se documentó que al aumentarse el valor del componente de color  $a^*$  decrece la concentración de iones de hidrógeno incrementándose así la concentración de los iones de hidroxilo. Cabe mencionar que la dispersión de los datos no permitió llegar a una correlación mejor.

En la Fig. 4.1.3 (b) se observó un patrón de evolución de verde a magenta directamente proporcional al desarrollo a la concentración de los iones hidroxilo. Se obtuvo el valor promedio de la componente colorimétrica  $a^*$  respecto a el pH, siendo similar su evolución a la ya analizada, y obteniendo una alta relación. Se llegó a un ajuste significativo exponencial con  $R^2 = 0.997$ . El modelo polinomial de segundo orden tuvo un ajuste similar, mejorando la correlación con un coeficiente de determinación igual a  $R^2 = 0.9995$ . Estos datos comprueban que el componente colorimétrico  $a^*$  está altamente correlacionado con el desarrollo de acidez en el fruto de tomate.

El segundo componente de color ( $b^*$ ), que corresponde al rango entre azul-amarillo, no fue un indicador representativo de la concentración de sólidos solubles totales para la clasificación de los tomates de acuerdo a los resultados que se presenta en el Fig. 4.1.3(a). Se observa una alta dispersión de datos obteniéndose bajos coeficientes de correlación de  $R^2=0.23$ , para los ajustes de modelos polinomiales de segundo orden y exponencial. No se observa tendencia alguna dentro de la nube de puntos, por lo que dicho parámetro no es indicativo para el análisis del contenido de SST. En la Fig. 4.1.3 (b) al analizar la relación entre el componente  $b^*$  e índice de alcalinidad/acidez, se observa una tendencia directamente proporcional entre el valor de  $b^*$  y la concentración de los iones hidrógeno  $H^+$ . El mejor ajuste presentó el modelo polinomial de segundo orden y exponencial con coeficiente  $R^2=0.72$  y  $R^2=0.66$  respectivamente, lo cual comprueba la tendencia observada visualmente.

De acuerdo con los resultados obtenidos (Fig. 4.1.3 (b)) se puede observar que existe una correlación significativa entre el componente colorimétrico  $b^*$  y la acidez o basicidad del fruto de tomate. Dicha correlación es afectada por la dispersión de los datos, observando en la Fig. 4.1.3 (c) una mejora en el ajuste que presentó el modelo polinomial con un coeficiente  $R^2=0.984$  y exponencial con coeficiente  $R^2=0.986$ . De este modo se ratificó la hipótesis original de que el componente colorimétrico  $b^*$  es un indicador directo del pH de tomate.

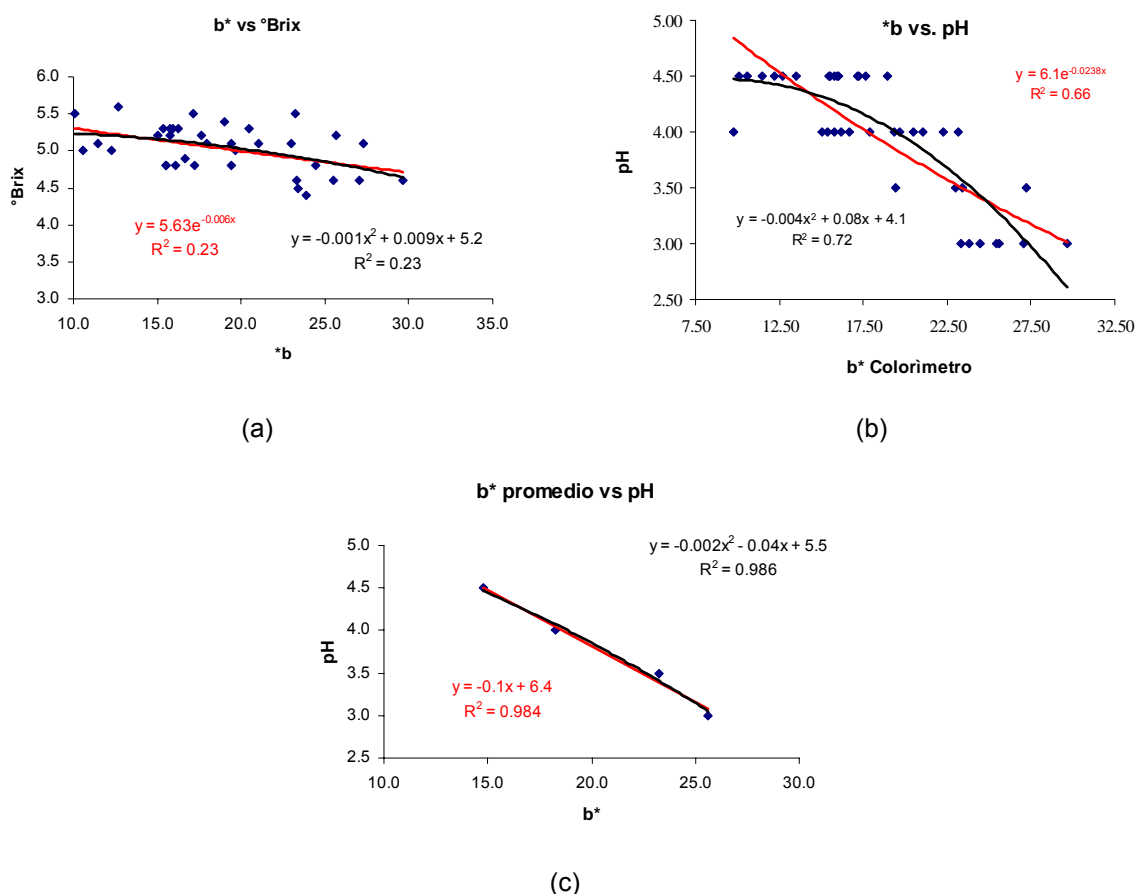


Figura 4.1.3 Relación de la componente de color azul-amarillo  $b^*$  con SST (a),  $b^*$  con pH (b),  $b^*$  promedio con pH (c).

En el trabajo de Batu (2004) se propuso clasificar los tomates de acuerdo al índice de madurez con base en la relación  $a^*/b^*$  conforme al estándar propuesto por la USDA. En la Fig. 4.1.4 se establece la correlación entre el índice de color

propuesto y los atributos químicos internos (SST y pH). Para el caso de los sólidos solubles totales, en la Fig. 4.1.4(a), se observa una dispersión de puntos que nos permite inferir una agrupación de las muestras respecto a las clases propuestas por la USDA. Sin embargo, el ajuste logrado mediante las técnicas de aproximación sigue siendo bajo  $R^2=0.267$  para el caso del modelo polinomial y  $R^2=0.35$  para el exponencial. En la Fig. 4.1.4 (b) se observó que el pH va al aumento al crecer el valor de la razón  $a^*/b^*$ , por lo cual se concluyó que la acidez del fruto disminuye conforme el índice de madurez propuesto por Batu (2004) se incrementa.

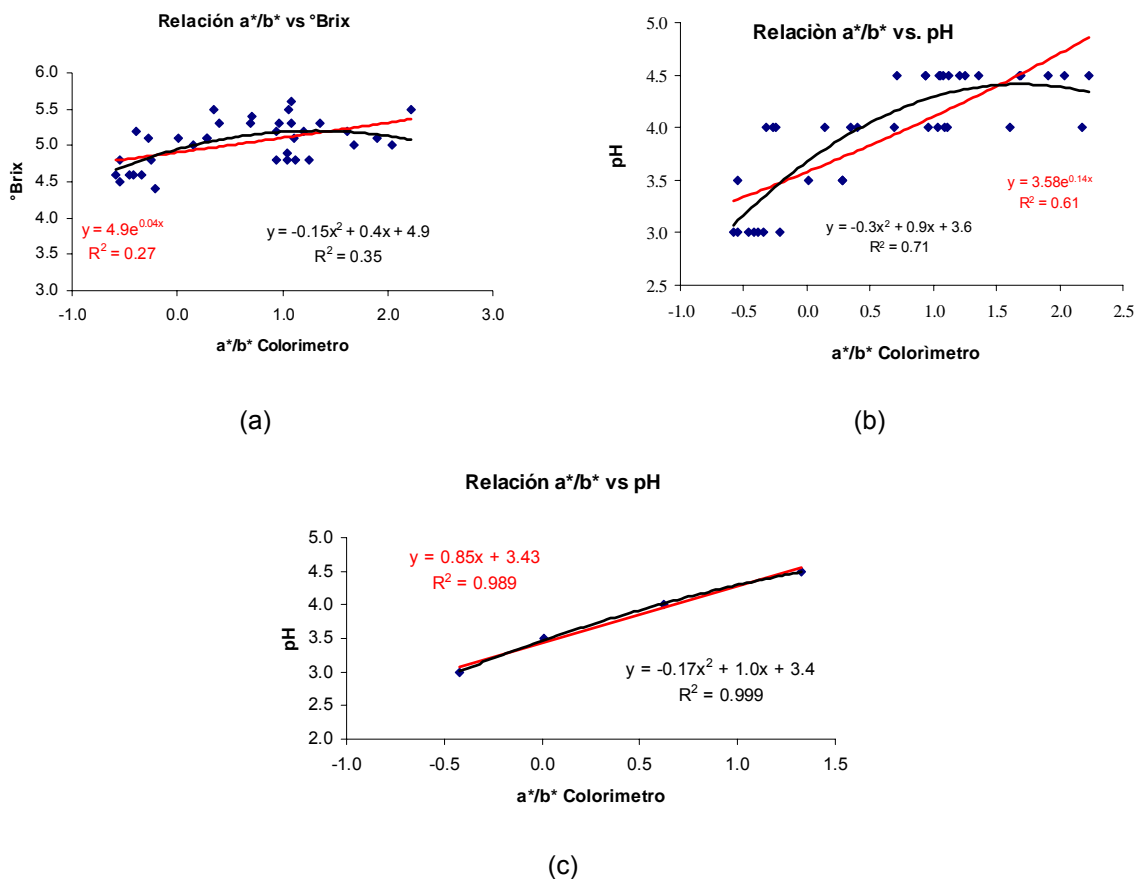


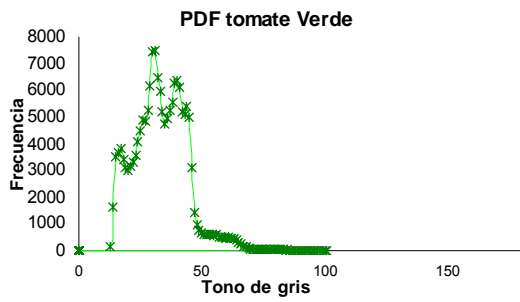
Figura 4.1.4 Correlación entre el índice  $a^*/b^*$  y SST (a); pH (b);  $a^*/b^*$  promedio respecto al pH (c).

Los datos presentados en la Fig. 4.1.4 (c) evidencian una correlación significativa entre el pH y la relación  $a^*/b^*$ . El modelo lineal presentó un buen ajuste

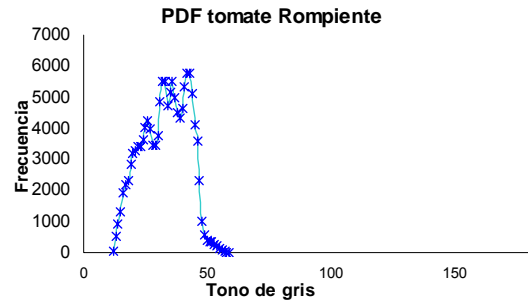
de  $R^2=0.989$ , mientras que el modelo polinomial de segundo orden tuvo  $R^2=0.999$ . Así se comprobó que la relación  $a^*/b^*$ , es un indicador del pH de fruto.

#### ***4.2 Relación entre los atributos internos del tomate y la función de distribución de probabilidades de los tonos de gris (PDF) de sus imágenes***

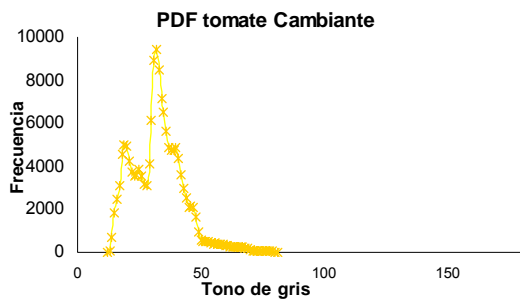
En la Fig. 4.2.1 se observan las diferencias significativas entre las distribuciones de intensidad de gris sobre las imágenes de gris diferentes clases de tomate establecidas por la USDA según su grado de madurez, definidos de acuerdo a la clasificación colorimétrica propuesta por Batu (2004). A través del análisis visual propuesto por nosotros y basado en la función de distribución de probabilidades o frecuencias de obtener los diferentes tonos de gris en imágenes, estas diferencias se hacen evidentes. Con base en la demostración matemática de Korvin y Oleschko (2008) se establece que la rugosidad de los PDF's extraídas de las imágenes es representativa de la rugosidad global de la superficie analizada. Para nuestro caso particular, es posible inferir las diferencias significativas entre los distintos estados de madurez del fruto mediante una simple inspección visual del PDF de sus imágenes tomadas de la superficie de los frutos de tomate. En las Figs. 4.2.1(a)-(c) se observa una distribución de tonos de gris similar, sin embargo, las frecuencias asociadas a las modas locales dentro del histograma varían significativamente entre las 6 clases comparadas. En las Figs. 4.2.1 (d)-(f) la distribución de los tonos de gris comienza a ser homogénea dentro del rango grises entre 30 y 120, observándose una clara tendencia hacia la difusión de los tonos de gris conforme se incrementa el grado de madurez del fruto que se vuelve más evidente pasando de la clase Rosa a Rojo.



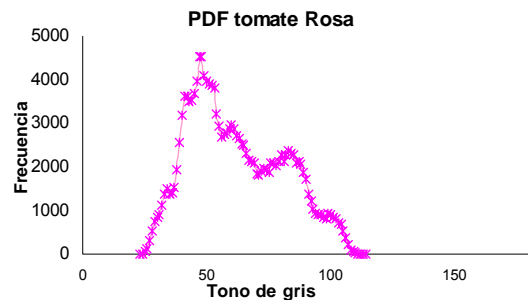
(a)



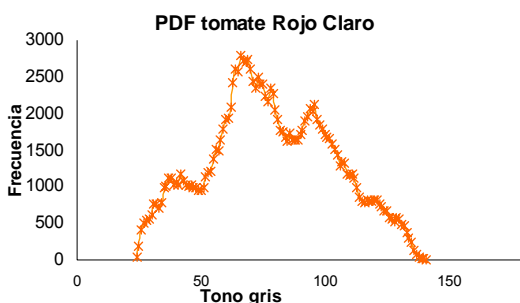
(b)



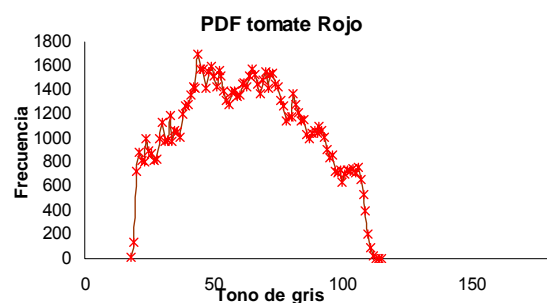
(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 4.2.1 PDFs representativas del estado de madurez.

Las diferencias entre los PDF's son significativas estadísticamente para las clases Verde, Rompiente, Cambiante, Rosa, Rojo Claro y Rojo, según el análisis de 2-Pearson.

En la Fig. 4.2.2 se observó que no existe una tendencia significativa de correlación entre las nubes de datos del exponente de Hurst extraído a partir de las

imágenes obtenidas de la superficie de los tomates analizados y cantidad de sólidos solubles totales estimados mediante el grado Brix. Por lo tanto, se decidió agrupar las muestras de tomate según sus características colorimétricas. Los resultados obtenidos se discuten en la siguiente sección. Una tendencia similar y diferencias no significativas estadísticamente se observaron entre  $H_{R/S}$  de los PDF's y concentración de los iones de hidrogeno (pH, Fig. 4.2.3).

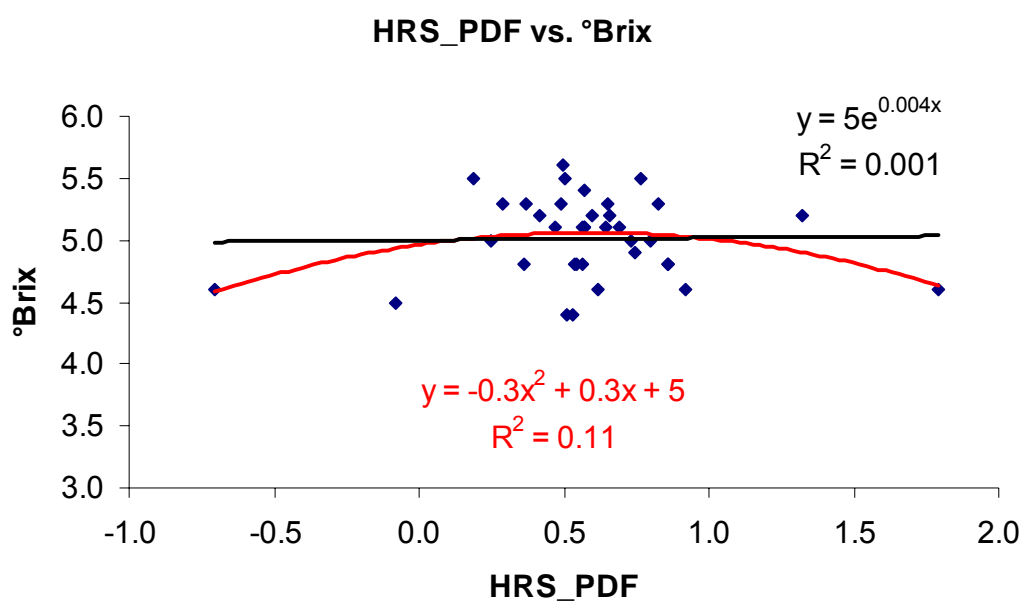


Fig. 4.2.2 Correlación entre el exponente de Hurst obtenido mediante el método R/S aplicado a los PDF's de las imágenes de tomate y la concentración de sólidos solubles totales estimados mediante los grados Brix.

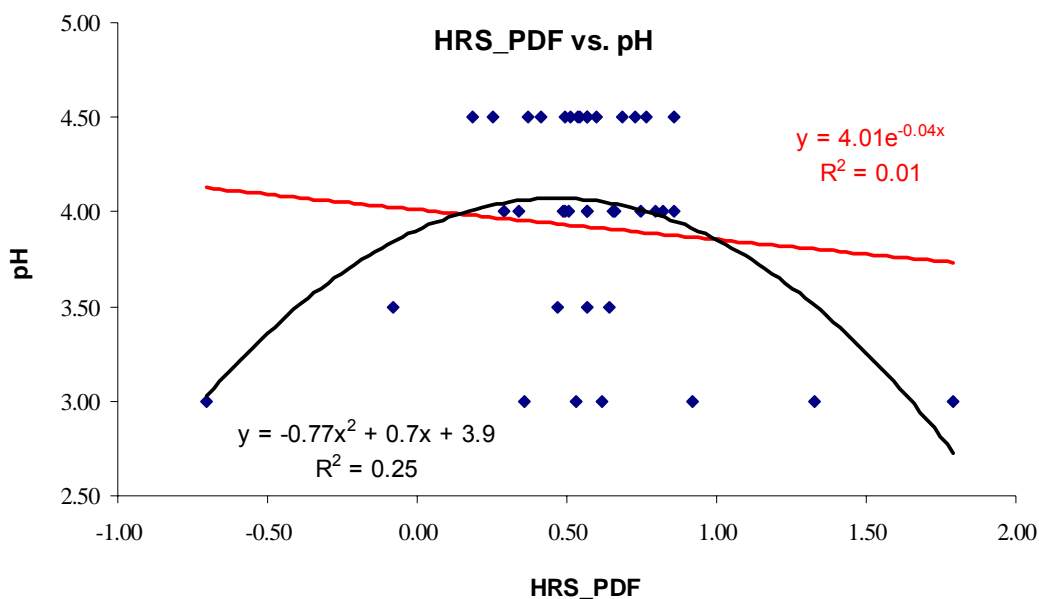


Fig. 4.2.3 Correlación entre el exponente de Hurst obtenido mediante el método R/S aplicado a los PDF's de las imágenes de tomate y la concentración de iones hidrógeno (pH).

#### **4.3 Análisis de la calidad del tomate según su estado de madurez**

Con base en los resultados obtenidos al correlacionar de manera aislada las propiedades químicas del tomate y los atributos de su color con las propiedades morfométricas de las imágenes digitales se analizó el sabor del fruto a nivel de clase. Al inicio se extrajo la función de probabilidades de frecuencia de las imágenes divididas por clases realizando un análisis visual de PDF's cuyo ejemplo se muestra en la Fig. 4.3.1, donde se muestra un resultado del cálculo de PDF promedio por cada clase, el cual se propone como indicador visual del grado de madurez del tomate por cada re-escalado. Para cuantificar las diferencias en rugosidad de los PDF's se utilizaron los datos del análisis de rango, obteniéndose el exponente de Hurst para cada una de las seis clases, y correlacionando con los atributos químicos promedio, SST y pH, de las muestras pertenecientes a la misma clase. Los resultados de dicho análisis se concentran en la Tabla 4.3.1, donde se puede observar que las tendencias de la dinámica de los valores promedio por clase (H, SST, pH) son similares.



Cuadro 4.3.1 Análisis comparativo de las funciones de distribución de probabilidades de intensidad de grises promedio por clase de tomate.

	GREEN	BREAKER	TURNING	PINK	LIGHTRED	RED
HRS_PDF	0.439	1.012	0.642	0.920	0.854	0.999
SDRS_PDF	0.117	0.021	0.004	0.006	0.004	0.003
°brix	4.633	4.600	4.850	5.200	5.175	5.189
pH	3.167	3.200	3.625	3.800	4.375	4.333

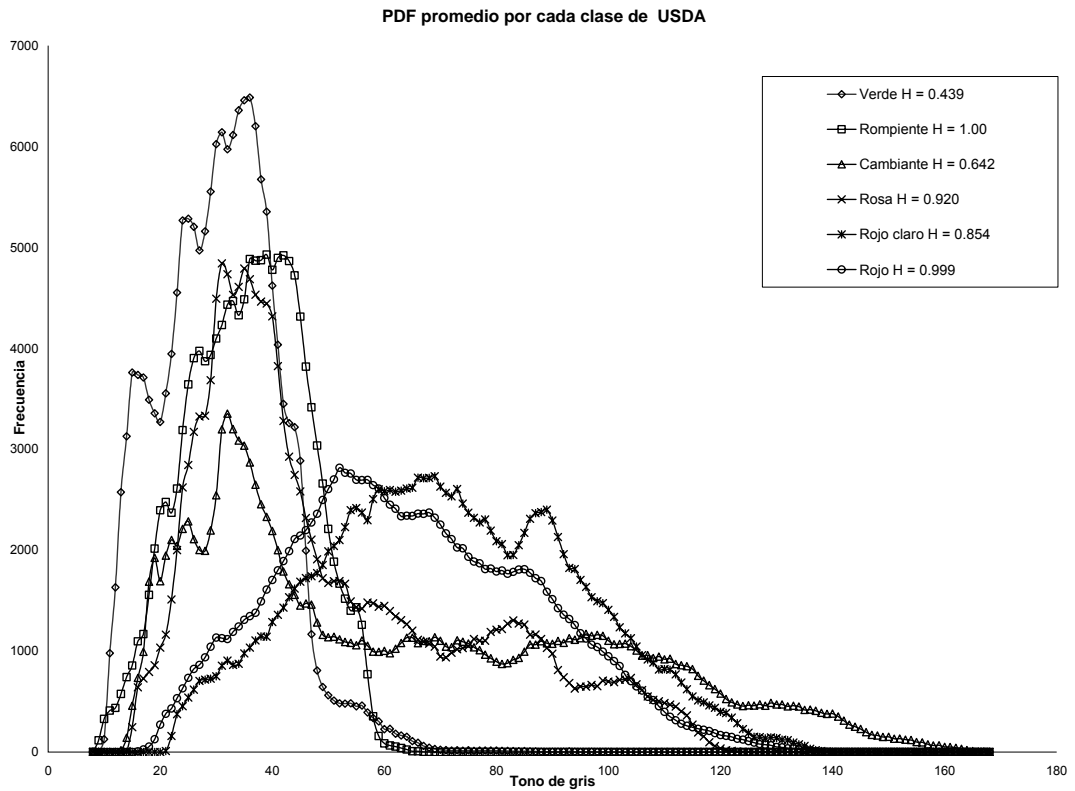


Fig. 4.3.1 Análisis comparativo de las funciones de distribución de probabilidades de grises promedio extraídas a partir de las imágenes del tomate de seis clases comparadas.

En la Fig. 4.3.2 se muestra la primera aproximación entre la clasificación establecida por la USDA acorde con el trabajo de Batu (2004) y la concentración de SST, mostrándose una tendencia clara de dispersión de los valores. Sin embargo, la clase Rompiente presenta un comportamiento excepcional, alejándose de la tendencia establecida por las demás clases.

Al realizar el análisis de regresión excluyendo la clase Rompiente se encontró que la correlación entre los valores del exponente de Hurst obtenidos a través de los PDF's promedio y la concentración de SST en frutos de tomate es altamente significativa estadísticamente (Fig. 4.3.3). Los modelos de regresión lineal, exponencial y polinomial no presentaron diferencias significativas entre si con  $R^2 = 0.955$ ,  $R^2 = 0.967$  y  $R^2 = 0.970$  mostrando un buen ajuste.

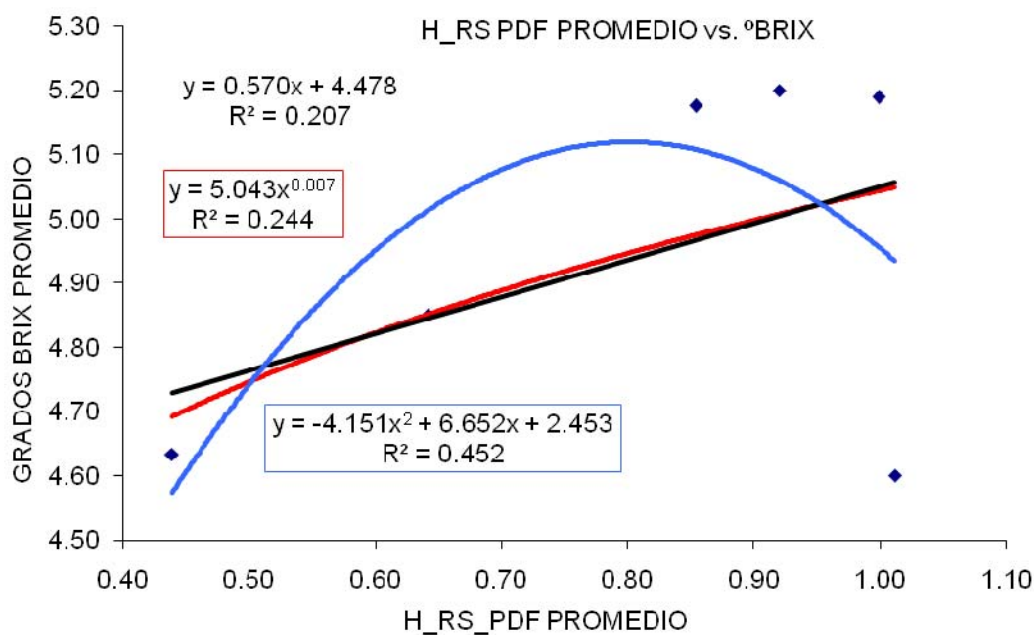


Fig. 4.3.2 Análisis de la concentración de SST por clase de tomate. Se observa una clara tendencia de la clase Rompiente a desviarse del comportamiento general de los valores de grado Brix que fue excluido del análisis.

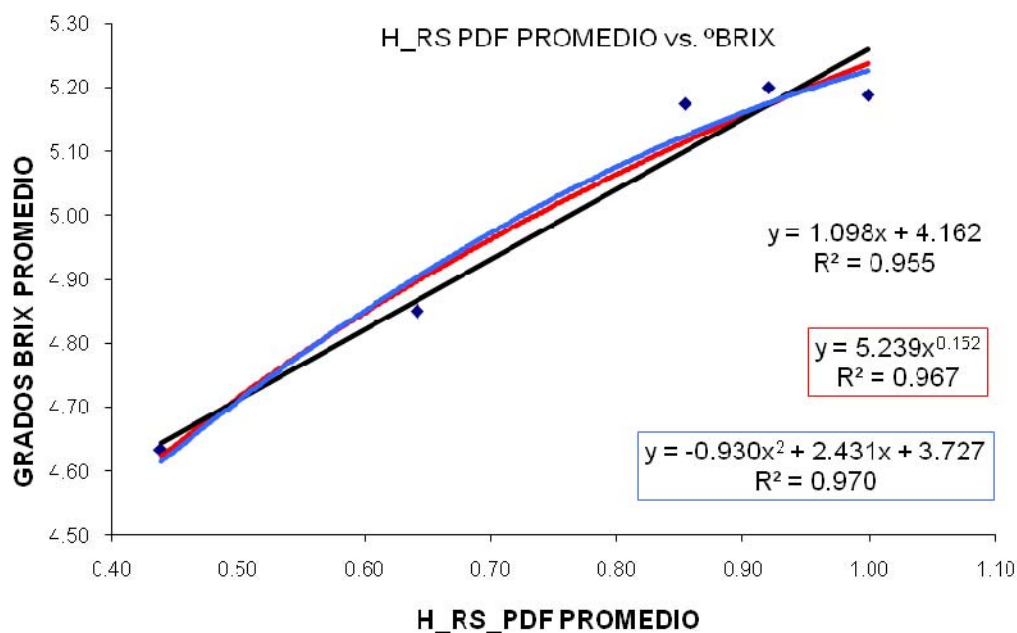


Fig. 4.3.3 Correlación entre  $H_{RS}$  y grado Brix por cinco clases de tomate, sin considerar la clase Rompiente.

El análisis de correlación entre el exponente de Hurst (por clase de tomate) y el pH demostró que existe una tendencia similar a la observada para la concentración de sólidos solubles, como se puede apreciar en la Fig. 4.3.4. El coeficiente de correlación entre esta variable química y la rugosidad del PDF extraída mediante el análisis morfométrico, resultó ser ligeramente inferior ( $R^2 = 0.801$ ) para el modelo exponencial al eliminar la media que corresponde al color Rompiente (compara las Figuras 4.3.4 y 4.3.5). El comportamiento atípico de la clase Rompiente como indicativo de la separación artificial de esta clase de madurez del tomate. El hecho de que tanto para el análisis de SST como de pH el comportamiento de la clase Rompiente haya sido diferente a la tendencia genérica observada para las 5 clases restantes comprueba el hecho de artificio de separar esta clase. Para poder identificar más claramente las causas de este comportamiento es necesario realizar el análisis de un mayor número de muestras. Respecto a las clases Rojo y Rojo Claro, éstas muestran comportamiento estadístico similar en cuanto se trata de la rugosidad de las imágenes, por lo tanto se concluyó que estas clases pueden ser

unidos dentro de una sola clase para simplificar el análisis de referencia de la madurez del tomate cuando este abarca grandes volúmenes de muestras.

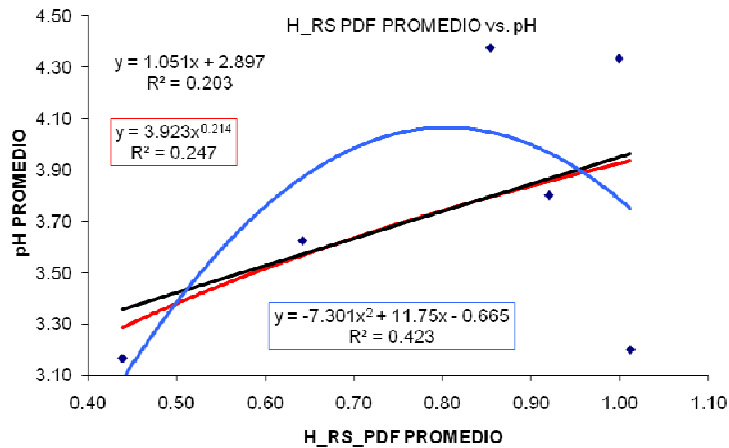


Fig. 4.3.4 Análisis por clase de relación entre la concentración de iones hidrógeno y exponente de Hurst extraído a partir del PDF de las imágenes digitales. Se observa una clara tendencia de separarse la clase Rompiente de la tendencia general lo cual es indicativo de la separación artificial de esta clase de madurez.

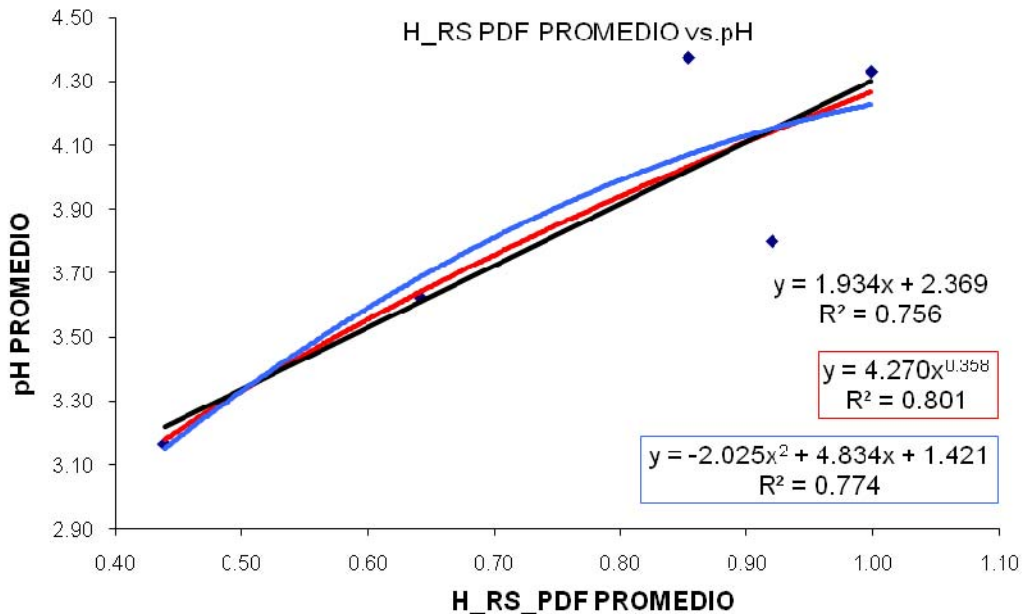


Fig. 4.3.5 Análisis de correlación entre  $H_{R/S}$  del PDF promedio según clase de tomate y la concentración de iones hidrógeno, excluyendo del análisis a la clase Rompiente.

#### 4.4 Firmagrama

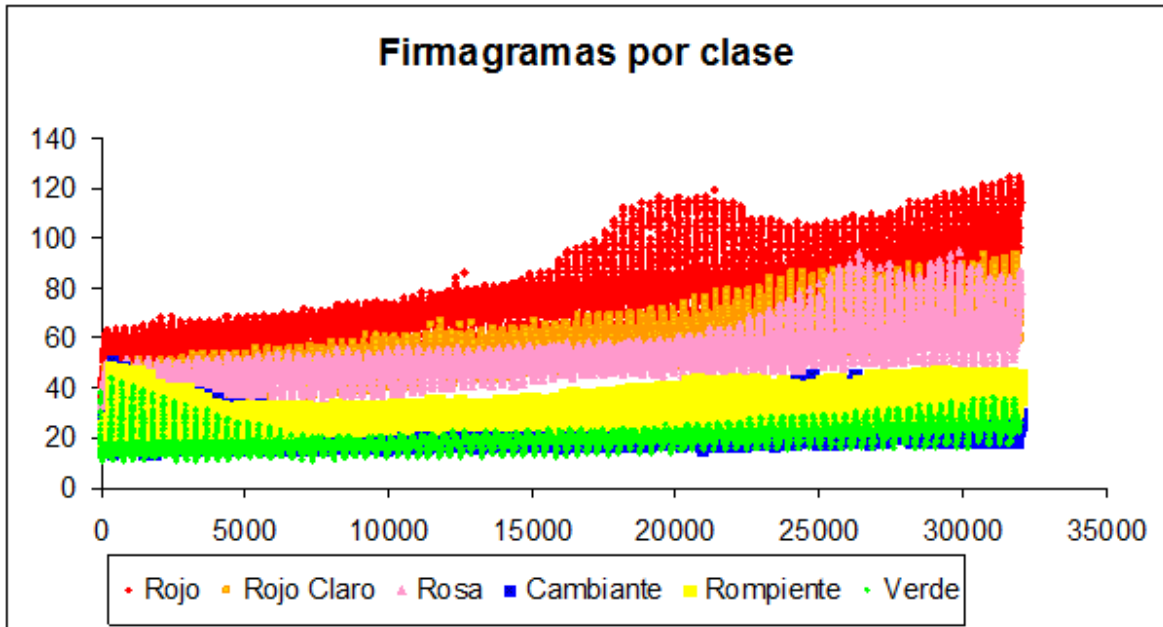


Fig. 4.4.1 La comparación de los firmagramas extraídas de las imágenes de seis clases de tomates, muestra una clara diferencia en la densidad de puntos.

#### 4.5 Singularidad visual

La función de distribución de probabilidades de intensidad de grises extraída a partir de las imágenes digitales de fruto de tomate mediante la técnica del Rango Re-escalado extrae los atributos a partir de las propiedades químicas del tomate de un modo indirecto. De igual forma, la información contenida en el PDF del fruto fue de utilidad para establecer los patrones de calidad del tomate lo cual asegura la eficiencia de los procesos de control y clasificación de los productos agrícolas. Dos muestras de tomate pueden ser comparadas a nivel tanto cuantitativo como cualitativo por medio del análisis de correlación entre funciones de distribución de probabilidades de grises introduciendo el concepto de Singularidad Visual (Oleschko, 2008). Como se puede observar en la Fig. 4.2.1, las diferencias visuales

significativas entre las distintas clases de tomates pueden ser cuantificadas mediante el análisis de regresión. El coeficiente de ajuste del modelo de regresión ( $R^2$ ) es interpretado como un indicador cuantitativo del grado de similitud entre los PDF's de clase del tomate comparados. Singularidad Visual se define del modo cualitativo. Para dos clases del tomate con propiedades similares dicho coeficiente de determinación debe ser estadísticamente significativo, mientras que para dos clases con PDF's contrastantes, cuya comparación de PDF's lleva a detectar una Singularidad Visual, el  $R^2$  tiende al cero.

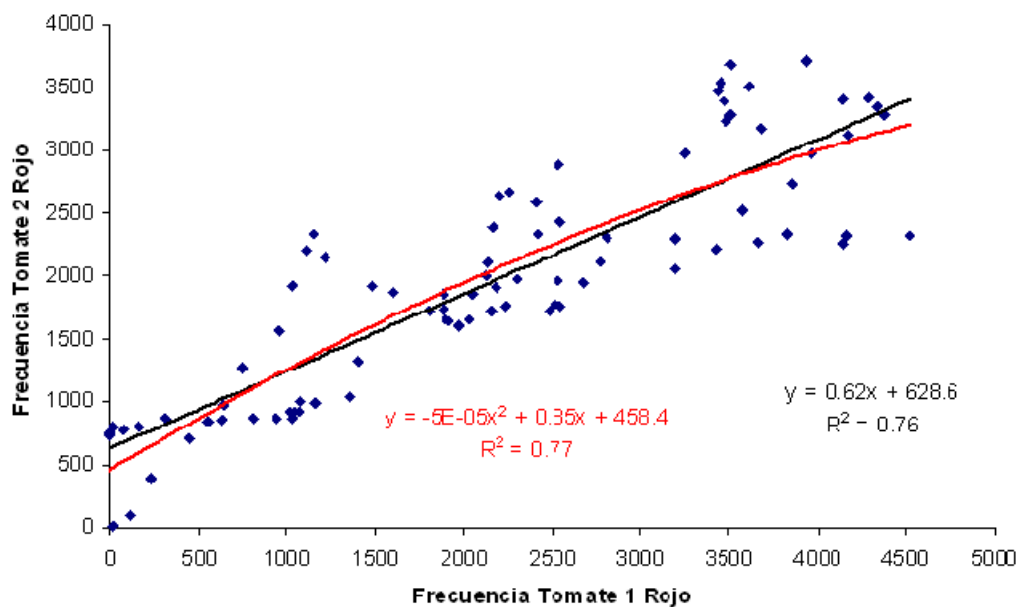


Fig. 4.5.1 La singularidad visual establecida al comparar dos clases de maduras de tomate se expresa como la similitud entre los elementos que conforman los dos PDF's de las muestras.

A manera de ejemplo, en la Fig. 4.4.1, se comprueba la ausencia de Singularidad Visual entre dos imágenes de la misma clase según clasificación de la USDA: Clase Rojo donde  $R^2$  tiene un valor de 0.76, mientras que la comparación de entre las clases Rojo y Cambiante documenta la presencia de una Singularidad Visual y por ende un  $R^2$  de 0.007 (Fig. 4.4.2). Este último valor es indicativo de que no existe una similitud entre las clases comparadas, y por lo tanto sus diferencias sí

son significativas estadísticamente, lo cual puede ser detectado a nivel visual mediante la Singularidad Visual y comprobando a nivel analítico una vez analizados el pH y SST. Lo anterior puede ser recomendado como un punto de partida para futuras clasificaciones de frutos que prometan ser menos sesgadas.

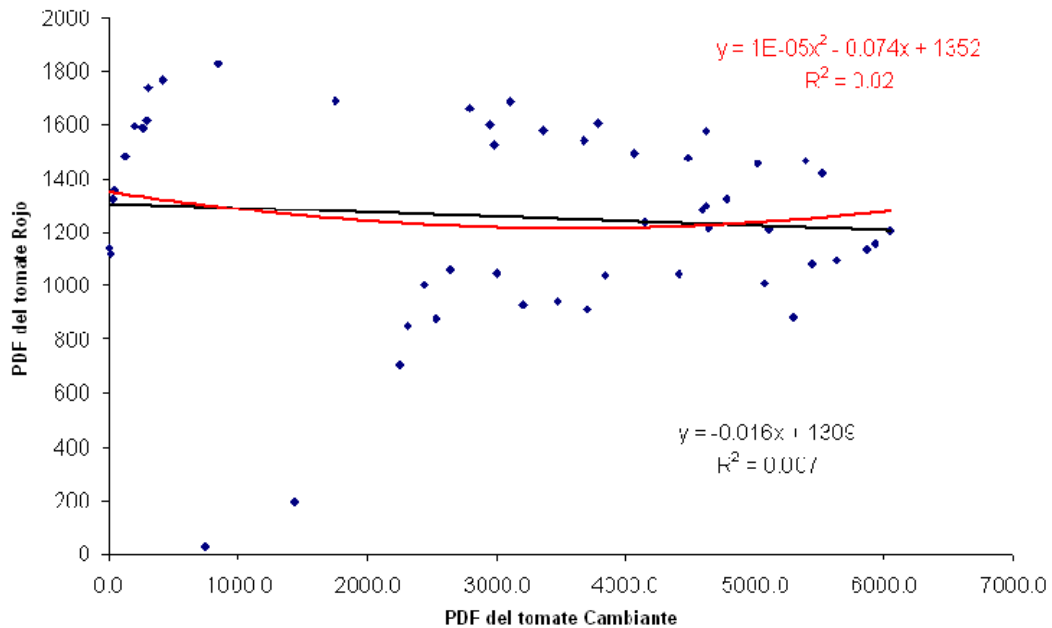


Fig. 4.5.2 Las diferencias visuales entre los elementos que conforman el PDF de las muestras pertenecientes a diferentes clases de clasificación de tomates según su madurez. El simple análisis visual permite establecer las diferencias mediante el concepto de la Singularidad Visual.

#### 4.6 Coeficiente r-Pearson de correlación lineal

El análisis de correlación lineal Pearson entre los analizados, los sedimentos, se ha realizado con el objetivo de establecer el grado de asociación entre ellos. Para este análisis se consideraron los valores promedio por clase de cada uno de los atributos de interés (cuadro 4.6.1): la rugosidad medida mediante el coeficiente de Hurst y PDF a partir de los firmagramas; ( $H_{R/s}$ ). Desviación estándar (PDF y firmagrama); firmeza; contenido de azúcares estimado mediante el contenido de

sólidos solubles totales (°Brix); acidez medida mediante el potencial de iones hidrogeno (pH) y las componentes colorimétricas ( L, a\* y b\*).

Cuadro 4.6.1 Matriz de correlación entre los atributos analizados en el fruto de tomate.

	HRS_PDF	SDRS_PDF	HRS_FRG	SDRS_FRS	Firmeza	°Brix	pH	L	a*	b*
HRS_PDF	1	-0.754 0.083	0.205 0.696	-0.168 0.75	-0.132 0.802	0.455 0.364	0.451 0.369	-0.324 0.531	0.567 0.24	-0.346 0.502
SDRS_PDF	-0.754 0.083	1	-0.637 0.174	-0.383 0.453	0.121 0.82	-0.629 0.18	-0.636 0.175	0.348 0.499	-0.651 0.162	0.425 0.401
HRS_FRG	0.205 0.696	-0.637 0.174	1	0.87 0.024	0.045 0.932	0.606 0.202	0.781 0.067	-0.497 0.316	0.639 0.172	-0.602 0.206
SDRS_FRS	-0.168 0.75	-0.383 0.453	0.87 0.024	1	0.385 0.451	0.442 0.38	0.503 0.31	-0.158 0.764	0.322 0.533	-0.3 0.563
Firmeza	-0.132 0.802	0.121 0.82	0.045 0.932	0.385 0.451	1	0.109 0.838	-0.126 0.812	0.419 0.408	-0.173 0.743	0.27 0.604
°Brix	0.455 0.364	-0.629 0.18	0.606 0.202	0.442 0.38	0.109 0.838	1	0.912 0.011	-0.757 0.081	0.933 0.007	-0.848 0.033
pH	0.451 0.369	-0.636 0.175	0.781 0.067	0.503 0.31	-0.126 0.812	0.912 0.011	1	-0.888 0.018	0.975 0.001	-0.95 0.004
L	-0.324 0.531	0.348 0.499	-0.497 0.316	-0.158 0.764	0.419 0.408	-0.757 0.081	-0.888 0.018	1	-0.906 0.013	0.983 0
a*	0.567 0.24	-0.651 0.162	0.639 0.172	0.322 0.533	-0.173 0.743	0.933 0.007	0.975 0.001	-0.906 0.013	1	-0.952 0.003
b*	-0.346 0.502	0.425 0.401	-0.602 0.206	-0.3 0.563	0.27 0.604	-0.848 0.033	-0.95 0.004	0.983 0	-0.952 0.003	1

Analizando la primera columna de la matriz correlación se observa que H<sub>R/S</sub>\_PDF se correlaciona de manera lineal negativa únicamente con la desviación estándar del mismo método (SDRS\_ PDF =-0.754), lo cual demuestra que existe cierta relación inversa entre estas dos variables. En la tercera columna vertical se observa una correlación directa entre la rugosidad de PDF con la de firmagrama, H<sub>R/S</sub>\_PDF con H<sub>R/S</sub>\_FRG= 0.87 y así como entre H<sub>R/S</sub>\_PDF pH=0.781, siendo todas las otras asociaciones no significativas estadísticamente.

Al analizar la sexta columna vertical visualizamos que el contenido de los sólidos solubles totales medido en °Brix, tiene una relación significativa con R<sup>2</sup>=.912 y con el pH, así como R<sup>2</sup>= 0.933 con el componente colorimétrico a\*( verde-magenta), lo cual nos dice que existen evidencias de una fuerte relación entre °Brix y



las dos atributos mencionados. El es  $a^*$  un atributo colorimétrico que se correlaciona de un modo significativo con el contenido de, su estimación se realizó con técnicas de monitoreo no destructivas. Respecto al pH, comprobamos la afirmación hecha por Peet (1997) que existe una estrecha relación entre este atributo y los °Brix. En lo referente a las componentes colorimétricas L y  $b^*$  se encontró una relación inversa, con coeficientes de correlación lineal de -0.757, -0.848 respectivamente.

En la séptima columna vertical del cuadro 4.6.1 se presentan datos del pH que se seleccionó como una medida objetiva de la acidez del fruto. Este atributo mostró ser significativamente correlacionado, con los tres atributos colorimétricos del tomate medidos en el sistema Cie Lab, elegido para esta investigación. Se documentó una asociación directa con la componente  $a^*$  con un coeficiente de correlación lineal de 0.975, y un ajuste inverso con las componentes L y  $b^*$ , los cuales mostraron una asociación con  $R^2 = -0.888$  y  $-0.95$  respectivamente. Estos resultados evidencian la posibilidad de determinar de un modo no invasivo la concentración de los ácidos responsables del sabor del tomate que se correlaciona de un modo significativo con el color de su superficie.

En las columnas verticales ocho y nueve podemos observar una fuerte relación existente entre los tres atributos colorimétricos ( $a^*$ ,  $b^*$  y L), encontrando una relación directamente proporcional entre la componente L y  $b^*$ , con un ajuste de 0.983. Mientras que la componente  $a^*$  es inversamente proporcional a las componentes L y  $b^*$ , lo cual muestra en los coeficientes de correlación lineal de -0.901 y -0.952, respectivamente.

En el cuadro 4.6.2 se presenta la matriz de correlación entre los atributos de tomate, excluyendo la clase 2 de madurez. Al comparar los valores del coeficiente r-Pearson presentados en los cuadros 4.6.1 y 4.6.2, se observa una mejor correlación entre todos los pares de atributos discutidos arriba. Se destaca una asociación significativa entre la rugosidad de la función de distribución de probabilidades de intensidades de gris, extraídas de las imágenes del tomate, y el contenido de los

sólidos solubles, expresado en los grados de Brix ( $r=0.977$ ), pH( $r=0.87$ ), así como los tres componentes del color ( $R^2= -0.728, 0.947$  y  $-0.812$ , para L,  $a^*$  y  $b^*$ , respectivamente). La rugosidad de los firmagramas  $H_{R/S\_FRG}$  se asoció significativamente solo con el pH ( $r=0.744$ ), al igual que en el análisis donde la clase 2 si se tomó en cuenta.

Cuadro 4.6.2 Matriz de correlación entre los atributos analizados en el fruto de tomate, excluyendo la clase 2.

	HRS_PDF	SDRS_PDF	HRS_FRG	SDRS_FRS	Firmeza	°Brix	pH	L	a*	b*
<b>HRS_PDF</b>	1	-0.814 0.094	0.431 0.469	0.059 0.925	-0.109 0.861	0.977 0.004	0.87 0.055	-0.728 0.163	0.947 0.015	-0.812 0.095
<b>SDRS_PDF</b>	-0.814 0.094	1	-0.704 0.184	-0.471 0.423	0.117 0.851	-0.818 0.09	-0.771 0.127	0.444 0.453	-0.755 0.14	0.558 0.328
<b>HRS_FRG</b>	0.431 0.469	-0.704 0.184	1	0.853 0.066	0.018 0.977	0.522 0.367	0.744 0.149	-0.387 0.52	0.573 0.313	-0.518 0.372
<b>SDRS_FRS</b>	0.059 0.925	-0.471 0.423	0.853 0.066	1	0.399 0.506	0.216 0.727	0.335 0.581	0.14 0.822	0.13 0.835	-0.022 0.972
<b>Firmeza</b>	-0.109 0.861	0.117 0.851	0.018 0.977	0.399 0.506	1	0.077 0.902	-0.194 0.755	0.546 0.341	-0.234 0.705	0.388 0.518
<b>°Brix</b>	0.977 0.004	-0.818 0.09	0.522 0.367	0.216 0.727	0.077 0.902	1	0.879 0.05	-0.648 0.237	0.926 0.024	-0.77 0.128
<b>pH</b>	0.87 0.055	-0.771 0.127	0.744 0.149	0.335 0.581	-0.194 0.755	0.879 0.05	1	-0.846 0.071	0.971 0.006	-0.934 0.02
<b>L</b>	-0.728 0.163	0.444 0.453	-0.387 0.52	0.14 0.822	0.546 0.341	-0.648 0.237	-0.846 0.071	1	-0.881 0.048	0.977 0.004
<b>a*</b>	0.947 0.015	-0.755 0.14	0.573 0.313	0.13 0.835	-0.234 0.705	0.926 0.024	0.971 0.006	-0.881 0.048	1	-0.95 0.01
<b>b*</b>	-0.812 0.095	0.558 0.328	-0.518 0.372	-0.022 0.972	0.388 0.518	-0.77 0.128	-0.934 0.02	0.977 0.004	-0.95 0.01	1

Los resultados del análisis de Pearson realizado solo para los atributos físicos y químicos del tomate, se presenta en el Cuadro 4.6.3. Una máxima asociación se documentó entre el pH y los tres componentes del color de fruto con  $r= 0.957, -0.789$  y  $0.953$  para L,  $a^*$  y  $b^*$ , respectivamente. La firmeza del tomate se correlaciono estadísticamente con la luminosidad (L) y el factor  $b^*$ , con  $r=0.777$  y  $0.872$ , respectivamente. El contenido de los sólidos solubles ( $^{\circ}$ Brix) se correlaciono significativamente con los tres atributos de color ( $r=-0.858, 0.888$  y  $-0.758$ , para L,  $a^*$  y  $b^*$ , respectivamente así como con el pH( $r=-0.862$ ))

Cuadro 4.6.3 Matriz de correlación entre las medias de los atributos analizados en el fruto de tomate.

	<b>L</b>	<b>a*</b>	<b>b*</b>	<b>Firmeza</b>	<b>°Brix</b>	<b>pH</b>
<b>L</b>	1	-0.708 0.115	0.912 0.011	0.777 0.069	-0.86 0.028	0.957 0.003
<b>a*</b>	-0.708 0.115	1	-0.609 0.199	-0.216 0.681	0.886 0.019	-0.789 0.062
<b>b*</b>	0.912 0.011	-0.609 0.199	1	0.872 0.023	-0.79 0.062	0.953 0.003
<b>Firmeza</b>	0.777 0.069	-0.216 0.681	0.872 0.023	1	-0.576 0.231	0.718 0.108
<b>°Brix</b>	-0.86 0.028	0.886 0.019	-0.79 0.062	-0.576 0.231	1	-0.867 0.025
<b>pH</b>	0.957 0.003	-0.789 0.062	0.953 0.003	0.718 0.108	-0.867 0.025	1

## 5 CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos en la presente investigación se llegó a las siguientes conclusiones:

1.-El uso de técnicas colorimétricas para definir la calidad del fruto de tomate no es suficiente, dado que está depende tanto de los atributos internos como externos. Sin embargo, se documentó que el pH puede ser extraído a partir de las componentes colorimétricas de un modo significativo estadísticamente. La relación inversamente proporcional que fue encontrada entre el pH el valor de las componentes L y \*b, mientras que un comportamiento directamente proporcional entre el pH y la componente \*a, lo cual indica que dichas componentes colorimétricas proporcionan una información precisa sobre la acidez del fruto de tomate de la variedad estudiada.

2.-Se comprobó que la relación  $a^*/b^*$  es un indicador indirecto del pH de fruto. Se observó que esta última variable va al aumento al crecer el valor de la razón  $a^*/b^*$ , por lo cual se concluyó que la acidez del fruto disminuye conforme el índice de madurez propuesto por Batu (2004) se incrementa.

3.- Las diferencias entre las funciones de distribución de probabilidades (PDF) de las imágenes de tomate son representativas del estado de madurez del fruto representando de un modo cuantitativo la clasificación propuesto por Batu (2004). Las diferencias entre 5 clases de madurez del tomate son significativas estadísticamente según el análisis de r-Pearson. Para el caso particular de la presente investigación, fue posible inferir las diferencias significativas entre los distintos estados de madurez del fruto mediante una simple inspección visual de la gráfica de función de distribución de intensidades de gris de imágenes tomadas de la superficie de los frutos de tomate.

4.- Con base en la demostración matemática de Korvin y Oleschko (2008) se estableció que la rugosidad de los PDF's extraídas de las imágenes es representativa de la rugosidad global de la superficie del fruto. La rugosidad de la superficie extraída a partir de las imágenes digitales y medida en términos del exponente de Hurst demostró ser una herramienta apta para el monitoreo no invasivo de las propiedades físicas, químicas y mecánicas del tomate de la variedad analizada.

5.- El análisis realizado demostró que la función de distribución de probabilidades es una función estadística apropiada para estimar la rugosidad de las imágenes de frutos de tomate. Se estableció una relación lineal entre la rugosidad promedio de las imágenes medida en términos del exponente de Hurst de las clasificaciones propuestas por la USDA y las propiedades químicas, físicas y mecánicas del fruto. Igualmente, observamos que los PDF's variaron de manera estadísticamente significativa en función de los cambios en madurez del fruto.

6.- Con base en los datos obtenidos sobre la diferencia en la tendencia del comportamiento de la rugosidad respecto al contenido de sólidos solubles medidos en términos del °Brix y pH promedios se concluyó que la clase Rompiente fue separada de manera artificial del resto de las clases de madurez del tomate, por lo que se recomendó excluirla de la clasificación general.

7.-Lo anterior confirma la necesidad de un cambio en la clasificación del índice de madurez del fruto de tomate propuesto por la USDA. El monitoreo de la calidad del tomate con las nuevas técnicas no destructivas que nosotros calibramos para el análisis tanto de los atributos externos como internos, puede ser realizado con sólo 4 clases de estados de madurez a diferencia de los 6 que son manejados por la USDA, debido a que para el productor y el consumidor del fruto es casi imposible distinguir entre un tomate Rompiente y uno Cambiante, así como entre un tomate Rosa y uno Rojo Claro.

8.-El uso de métodos de análisis de la calibración del tomate sin contacto permiten un monitoreo continuo del cultivo. A través del conocimiento de la dinámica de producción de SST y pH es posible determinar el momento adecuado para la cosecha del producto. Con base en el uso final que se dará al fruto (consumo en fresco o alimentos procesados) se define la fecha óptima del corte reduciendo de un modo significativo el gasto del la agua para alcanzar su uso eficiente así como reducir los costos de solución nutritiva y por ende los gastos de producción. La caja de herramientas de la Geometría Fractal es fue para el diseño propuesto.

9.-Actualmente la normativa de la calidad del tomate en México, está basada únicamente en los atributos externos del fruto los cuales como se demostró en el presente estudio no son suficientes para evaluar la calidad interna del tomate. El método de muestreo propuesto y calibrado en el presente trabajo es una opción viable para asegurar y controlar de un modo automatizado la calidad total del tomate cultivado bajo condiciones de invernadero.

10.- El control de calidad de los frutos de tomate debe basarse en los requerimientos del consumidor final proporcionándole un correcto balance entre apariencia física y sabor. El sabor está determinado por la relación entre acidez y SST: un correcto balance entre estos parámetros determina la aceptación del producto por parte del consumidor y por ende la apertura de los nuevos mercados hacia la producción.

11.- El monitoreo *in situ* de los atributos internos del fruto de tomate realizado desde su desarrollo inicial, permite detectar a tiempo las concentraciones bajas de SST y pH, así como las necesidades de la planta para asegurar un buen producto, llevando el concepto de calidad del tomate hacia una mejora continua.

12.-El desarrollo de sistemas de monitoreo instantáneo de la calidad de tomate en invernadero con técnicas de exploración electromagnética es un camino factible a la Agricultura de Precisión.

## LITERATURA CITADA

- Abbott, A.G., Baird, W.V., Reighard, G.L., Sasse, K., Lu, Z.X. 1999. Development Characterization of a dominant marker linked to root-knot nematode resistance, and its application to peach rootstock breeding. USA. Volumen 99. No.1,2. pp 115-122.
- Aguilera, J. 1997. Temas de tecnología de alimentos. Volumen I. Instituto Politécnico Nacional. México.
- Alamilla, L., Chanana, J.J., Gutiérrez, G.F. 2005. Description of morphological changes of particles along spray drying. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. México. Vol. 67, Issues 1-2. pp179-184.
- Amadasun, M. y King, R. 1989. Textural features corresponding to textural properties. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 19, 1264-1274.
- Angón, J.E., Albores, M.L., Alfaro, M., Cruz, J.G. 2006. Crecimiento de alcatraz "Green Goddess". Universidad Autónoma de Chapingo. México.
- Anon. 1995. Focus on container inspection. International Bottler and Packaging. USA. 69(1): 22-31.
- Arana, J.I., Pérez, J.J., Jarén, C., Arazuri, S. 2007. Influence of mechanical harvest on the physical properties of processing tomato (*Lycopersicon esculentum*, Mill.). Department of Projects and Rural Engineering. University of Navarra. España.
- AVRDC. Green SK, Kallo, G. 1994. AVRDC and the leaf curl virus of tomato. Leaf curl and yellowing viruses of pepper and tomato: an overview. pp 36-37.

- Baldwin E, J.W. Scott, M.A. Einstein, T.M. Malundo, B.T. Car, R.L. Shewfelt , K.S. Tandon.1998. Relationship between sensory and instrumental analysis for tomato flavor. *Journal of the American Society for Horticultural Science*.123: 906-915.
- Ballard, D. A., y Brown, C.M. 1982. *Computer vision*. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall.
- Barrett, A.H., Peleg, M. 1995. Applications of fractals analysis to food structure. *Lebensmittel-Wissenschaft+Technologie*. 28(6): 553-563.
- Benítez , M.S., Baysal-Tustas, F., Camp, A., Kleinhenz, M.D., Cardina, J., Miller, S.A., Gardener, B.M. 2006. Effects of different organic field management strategies on soil quality and soil borne diseases of vegetables crops. *Phytopathology*. 96 (6), suppl.
- Bharati, M.H., Liu, J.J., y MacGregor, J.F. 2004. Image textura analysis: methods and comparisons. *Chemometrics and Intelligence Laboratory Systems*. 72, 57-71.
- Bickelman, C., Ferries, L., Eaton, R.P. 1995. Impotence related to anabolic steroid use in a body builder response to clomiphene citrate. *Western Journal of Medecine*. 162(2): 158-160.
- Bradshaw, B., and Smith, B., 1997. Subsidy removal and agroecosystem health. *Agriculture, Ecosystems and Environmental*, 64:245-260.
- Bruhn, C. M., Feldman, N., Garlitz, C., Harwood, J., Ivans, E., Marshall, M., Riley, A., Thurber, D., Williamson, E. 1991. Consumer perceptions of quality: Apricots, cantaloupes, peaches, pears, strawberries and tomatoes. *Journal of food quality* 14(3):187-195.



- Cantwell, M. 2004. Fresh market. Tomato-Statewide Uniform Variety Trial Report Field and Post-harvest Evaluations. South Joaquin Valley. UCCE.
- Castañeda, R. 2005. Sistemas de control climático inteligente para invernaderos. PhD Tesis. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Carr, J.R.,1997. Statical self-affinity, fractal dimension, and geological interpretation, engineering Geology, 48:269-282.
- Causse M, V. Saliba-Colombani, L. Lecomte, P. Duffé, P. Rousselle, M. Buret. 2002. QTL analysis of fruit quality in fresh market tomato: a few chromosome regions control the variation of sensory and instrumental traits. Journal of Experimental Botany. 53:2089–2098.
- Chang, R., Chapra, S. 2007. Química General 4<sup>a</sup> edición. Ed. McGraw-Hill.
- Chaoxin, Z., Da-Wen, S., Zheng, L. 2006. Recent applications of image texture for evaluation of food qualities - a review, Trends in Food Science & Technology, v 17.
- Charley, H. 1987. Tecnología de alimentos. Procesos químicos y físicos en la preparación de alimentos. Editorial Limusa. México. 744 p.
- Cox, C.H., Peeters, J.M., Benschop, J., Vreeburg, A.M. 2002. Journal of experimental botany. University Utrecht, Sorbonnelaan. Alemania. Vol 53, No. 368. pp 391-398.
- Czegledy, N., y Czegledy,A.,2000. Digitized bodies, virtual spectacles. Future, 32: 103-120.

- Davies, J.N. y Hobson, G.E. 1981. The tomato. In: Hulme, A.C. The biochemistry of fruit and their products. Academia Press. London and New Cork. pp 437-482.
- De Baerdemaeker, J., Hertog, M., Nicolaï, B., De Ketelaere, B., 2006. Innovative measurements and models for predicting shelf life of fresh foods during postharvest. *Int. J. Postharvest Technology and Innovation*. Vol I, No. 1. 32:47.
- Decoene, C. 1995. Tomates, qu'en pensent les consommateurs. *Infos-Ctifl*. 112: 8-11.
- Devaux, M., Barakat, A., Robert, P., Bouchet, B., Guillon, F., Navez, B. 2005. Mechanical breakdown and cell wall structure of mealy tomato pericarp tissue. *Postharvest Biology and Technology*. 37, 209-221.
- Diezma, B. 2003. Propiedades acústicas aplicadas a la determinación de los parámetros de calidad interna de productos hortofrutícolas. *Revista Acústica*. 35: 20-25.
- Dris R., Barry-Ryan, C., Yahia, E.M., 2004. Treatments and Techniques to minimize the Postharvest Losses of Perishable food Crops. *Production Practices and Quality Assessment of Food Crops*. 4:95-133.
- Du, C.-J., y Sun, D.-W. 2004. Recent development in the applications of image processing techniques for food quality evaluation. *Trends in Food Science & Technology*, 15, 230-249.
- Du, C.-J., y Sun, D.-W. 2005. Correlating shrinkage with yield, water content and texture of tomato by computer vision. *Journal of Food Processing Engineering*, 28, 219-232.

- Duckworth, R.B. 1975. Fruits and Vegetables. 1a ed., Ed. Pergamon Press Ltd., Great Britain. pp. 148-151.
- Dull, G.G., Salunkhe, D.K., Reddy, N.R., Srisangnam, C. 1980. Quality of Cabbage (*Brassica Oleracea*). *Journal of Food Quality*. 3 (4), 251-259.
- Dziuba, J., Minkiewicz, P., Natecz, D. 1999. Biologically active peptides from plant and animal proteins. *Polytechnic J food Nutritional*. pp 3-16.
- Eghball, B., y Power, J. F., 1995. Fractal description of temporal yield variability of 10 crops in the United States. *Argon. J.*, 87: 152-156.
- El Masry, G., N. Wang, A. El Sayed, M. Ngadi.2006. Hyperspectral imaging for nondestructive determination of some quality attributes for strawberry. *Journal of Food Engineering*.87:98-107.
- Fernández, L., Castillero, C. y Aguilera, J.M. 2005. An application of image analysis to dehydration of Apple discs. *Journal of Food engineering*. 67:537-543.
- Flores, R. 2007. Procesamiento de imágenes digitales. *Semana de Informática 2007*. Facultad de Ciencias de la Computación, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.
- Forbus, W.R., S.D. Senter, y R.L. Wilson.1985. Measurement of tomato maturity by delayed light emission. *J. Food Sci*. 50:750–753.
- Gamal, E., Wang, N. ElSayed, A. Ngadi, M. 2006. Hyperspectrale imaging for nondestructive determination of some quality attributes for strawberry. *ELSEVIER*. 98:107.

- Gao, X, y Tan, J.1996a. analysis of expanded-food texture by image processing. Part I: geometric proprieties. Journal of Food Processing Engineering.19:425-444.
- Gao, X, y Tan, J.1996b. analysis of expanded-food texture by image processing. Part II: mechanical properties. Journal of Food Processing Engineering, 19: 445-456.
- Gaviola, S. 1996. Factores de manejo que inciden sobre la calidad de las hortalizas. Avances en Horticultura. Edición on-line.
- González, R, y Wintz, P. 1977. Digital Image Processing. Adisson-Wesley.
- González, A.M., M.C. Salas, y M. Urrestarazu.2000. Producción y calidad en el cultivo de tomate Cherry. Editorial Mundiprensa.1:546-596.
- Gonzales R. and Richard E. 2006, Digital Image Processing, Addison Wesley Publishing Company.
- Hagiwara, K., Omura, T., Kohguch, T., Mayashi, H., Hocino, S., Matsuura, S. 2002. Effects of latent infection of stock plants and abundante of thrips on the ocurrente of tomato spotted kilt virus in chrysanthemum fields. J.Gen. Plant Pathol. pp 99-102.
- Hall, C.B. 1964. Cellulase Activity in Tomato Fruits According to Portion and Maturity. Botanical Gazette. The University of Chicago. Press. Vol. 125, No. 3. pp 156-157.
- Haralick, R.M., Shanmugam, R., DInstein, I. 1973. Textural features for image classification. IEEE Transactions on System, Man, and
- Herppich, W., Linke, M., Geyer, M. 2003. An integrated Approach to Indicate freshness of Horticultural Produce. 604: 539-543.

- Ho, L.C., e. Zamsky y A.A. Schaffer.1996. Tomato photoassimilate distribution in plants and crops. Marcel Dekker.1:709-728.
- Hoyos, P., Puebla, J., Usano, M.C., Duque, A., Molina, S., Clemente, J.M.1997. Estudios de las características cualitativas de diferentes cultivares de tomate según estado de madurez marcado por la escala holandesa "Kleur –Stadia tomaten". Actas de horticultura. 16:200-205.
- Ito, H. 2004.Rapid quality evaluation techniques of horticultural crops. Produccion Practices and Quality Assessment of Food Crops.1:295-305.
- Janse, J., Schols, M. 1995. Une preference pour un gout sucré et non farineux. Groenten + fruit. pp 26: 16-17.
- Jaren, C., S. Arazuri, M.J.García, P. Arnal, y J.I. Arana. 2005. White asparagus: harvest date discrimination using NIRS technology. International Journal of Infrared and Millimeter Waves.
- Jarquín, L. 2005.Efecto del híbrido, de la temperatura y del flujo de aire, sobre propiedades físico-químicas de tomate deshidratado. Tesis. Instituto Tecnológico Agropecuario de Oaxaca.
- Jones, B.2007.Tomato plant culture: in the field, greenhouse, and home garden. 2da edición. Editorial Reviews. 1:404.
- Kader, A. A. y Morris, L. L. 1977. Prompt handling reduces processing-tomato losses. Calif. Agric 32(5): 21-22.
- Kader, A. A. y Seung, K. S. 2002. Preharvest and postharvest factors influencing vitamin C content of horticultural crops. ELSEVIER. 1:14.

- Kaizer, H. 1955. A quantification of texture on aerial photographs. Boston University Research Laboratory. Boston, Massachusetts. Note 21, AD 69484.
- Kartikeyan, H.(1955). A quantification of texture on aerial photographs. Boston, Massachusetts: Boston University Research Laboratory. Technology Note 121, AD 69484.
- Kavdir, I., y Guyer, D.E. 2002. Apple sorting using artificial neural network and spectral imaging. Transactions of the ASAE, 45:1995-2005.
- Kei, H., Inoue, S., Ryotaro, M., Yoshinori, M. 2004. Three-dimensional Micro Machina of SU-8 by Gray-scale Mask & Holding. Paper of Technical Meeting on Micromachine and sensor System. Japón. 16(34): 51-55.
- Kondo, N., Ahmad, U., Monta, M., y Murase,H. 2000. Machine vision base quality evaluation of lyokan orange fruit using neural network. Computers and Electronics in Agriculture, 29: 135-147.
- Korvin, G., Oleschko, K., Arizabalo, R.D., Castrejón, R., Ronquillo, G. 2006. Lacunarity of Gophysical well logs in the cantarell oil field, gulf of Mexico. Geofísica Internacional. 45(2): 99-113.
- Koskitalo, L.H. y Omrod, D.P. 1972. Effects of subóptimal ripening temperatures on the colour quality and pigment composition of tomato fruit. Journal of the science. 37:56-59.
- Kubík, M., Pys, P., Cuhra, P., Kvasnicka, F.,Voldrich, M. 2003. Authenticity of 100% orange juice in the Czech market. Institute of Chemical Technology. Czech Republic. Vol 20. No.2. pp 83-88.
- La CIE. 2007. Espacio de color. Francia.

- Langenakens, J. 2003. Influence of global shape and internal structure of tomatoes on the resonant frequency. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 66:41-49.
- Lenneräs, H., Fager, G., 1997. Pharmacodynamics and pharmacokinetics of the HMG-CoA reductase inhibitors. Similarities and differences. *NCBI*. 32(5): 403-425.
- Létal, J. Jiráková, D., Suderlová, L., y Hajek, M. 2003. MRI 'texture' analysis of MR images of apples during ripening and storage. *Lebensmittel-Wissenschaft Und-Technologie*. 36:719-727.
- Martínez, A. 2001. *Imagen Digital. Servicio de Proceso de Imágenes*. Universidad de Oviedo.
- Mandelbrot, B. 1983. *The fractal geometry of nature*. New York: W.H. Freeman. 1:468.
- Mandelbrot, B.B. 2002. *Gaussian Self-Affinity and Fractals*. Springer-Verlag, 654p.
- Monnot, P. 1990. International quality as marketing. *Acta Horticulturae*. 259: 25-30.
- Montgomery-Runger. 1999. "Probabilidad y Estadística Aplicadas a la Ingeniería" McGraw-Hill.
- Niesen, A.; Grafiadellis, M., Jiménez, R., La Malfa, G., Martínez, P., Monteiro, A., Verloot, H., Vilele, O., Zabeltitz, C.H., Denis, I.U., y Baudoin, W.O. 1990. Protected cultivation in the Mediterranean climate. FAO. Plant Production and Protection Paper No. 90. Rome Italy.

- Nistal, A. 1995. Introducción al Proceso Digital de Imágenes. Técnicas de Fluorescencia en Microscopía y Citometría. Universidad de Oviedo. Servicio de Publicaciones.
- Ocaña, R.C. 2004. Ventajas competitivas y comparativas. El tomate en México y Estados Unidos. En: Cultivo de Tomate. Productores de hortalizas. 8:45-48.
- Oleschko, K., Figueroa, B., Korvin, G., Martínez, M. 2004, Agroecometría: una caja de herramientas para el diseño de una agricultura virtual. Agricultura, Sociedad y Desarrollo, 1: 53-71.
- Oleschko, K., Miranda, M.E., Francois, J., Castrejón, F., Taud, H., Brambila, F. 2006. Porosidad de los yacimientos naturalmente fracturados: Una clasificación fractal. Revista mexicana de ciencias geológicas. 23(2): 199-214.
- Oleschko, K., Torres, V., Gaona, C., Tarquis A.M. 2008. Fractal Metrology: A toolbox for qualitative and quantitative data analyses in Herat science. Geophysical Research Abstracts. Vol.10.
- Olmo, M., Abarca, P., Hernández, F. 2000. Computing geostatistical image texture for remotely sensed data classification. ELSEVIER. 26(4): 373-383.
- Papadopoulos A., Pararajasingham, S. 1996. The influence of plant spacing on light interception and use in greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum*, Mill.): A review. ELSEVIER. Vol 69. 1-2: (1-29).
- Parrot, J. F. 2003. LAFSINA, México, D.F: Universidad Autónoma de México.



- Pecher, S. y Van Oppen, M. 2000. Consumer preferences and breeding goals in R Shewfeld and B.Brückner (eds.), Fruit and vegetable quality: An integrated view. Technomic Publishig INC. USA. pp 43-64.
- Peet, M.M., Willits, D.H., Gardner, R. 1997. Response of ovule development and post-poleen production processes in male-sterile tomatoes to chronic, sub-acute high temperature stress. Journal of experimental botany. 48(1): 101-111.
- Peiris ,K., G. Dull, R. Leffler, S. Kays.1998. Near infrared spectrometric technique for nondestructive determination of soluble solids content in processing tomatoes. Journal of the American Society for Horticultural Sciences. 123:1088-1093.
- Pérez, F., Balibrea, A., Bolarín, M., Icuartero, J. 1997. Efecto de la salinidad sobre el rendimiento y la calidad del fruto en *Lycopersicon esculentum*, *L. Pimpinellifolium* y en sus híbridos interespecíficos. Actas de horticultura. 16: 243-248.
- Primo, E.1997. Química de los alimentos. Editorial Síntesis. Madrid.
- Quevedo, R., Carlos L.G., Aguilera, J.M., Cadoche, L. 2002. Description of food surfaces and microstructural changes using fractal images textures analysis. Journal of Food Engineering. 53: 361-371.
- Rahman, S., Saingu, U.M., Singh, B.P., Reddy, V.R. 1997. Tomato root growth is influenced by tillage, cover cropping and nitrogen fertilization. Hot Science. 35(1): 78-82.
- Ratanachinakorn, B., Klieber, A., Simons, D.H. 1997. Effect of short-term controlled atmospheres and maturity on ripening and eating quality of tomatoes. Post-harvest Biology and Technoligy. ELSEIVER. 11(3): 149-154.

- Reid, D.F, Schaad, N.W. 2002. Real-time PCR and its application for rapid plant disease diagnostics. *Can J Plant Pathol.* 24: 250-258.
- Renfu, L. 2004. Proyección de imagen hyperspectral para el gravamen no destructivo de la calidad de fruta. USDA.
- Riquelme, F. 1995. Postcosecha del tomate para consumo fresco. In: Nuez, F. El cultivo de tomate. Editorial Mundiprensa. España. pp. 589-623.
- Rosenfeld A. 1979. Some experiments on variable thresholding. *Pattern Recognition.* 11: 191.
- Russ, J.C. 1999. Image processing handbook. 3ª edición. USA: CRC Press & IEEE Press.
- Ryer, A. 1998. Light measurement handbook. Citeseer.
- SAGARPA. 2002. Análisis agropecuario del tomate. México
- Santiago, J., Mendoza, M., Borrego, F. 1998. Evaluación de Tomate (*Lycopersicon esculentum, Mill*) en Invernadero: Criterios Fenológicos y Fisiológicos. *Agronomía Mesoamericana.* 9(1): 59-65
- Serra J. 1988. Image Analysis and Mathematical Morphology, Vol. 1 & 2. Academic Press. London.
- Shewfelt, R.L, S.E. Prussia, A. Resurreccion, W.C. Hurst, D.T. Campbell. 1987. Quality changes of vine-ripened tomatoes within the postharvest handling system. *J Food Sci* 52:661-4.
- SIAP, 2001. El ingreso rural y la producción agropecuaria en México. México

- Smith, J.F., Wood, D.A., Thurston, C.F. 1996. Growth measurement of *Agaricus* mycelium in composted substrates as an indicator of compost selectivity and mushroom productivity. *Mushroom Sci.* 14, 293-301.
- Smith, N.P. Mulquiney, P.J., Nash, M.P., Bradley, C.P., Nickerson, D.P., and hunter, P.J. 2002. Mathematical modeling of the heart: cell to organ. *Chaos, Solitons and Fractals*, 13:1613-1621.
- Stevens, M.A. y Rick, C.M. 1996. Genetics and breeding In: Atherton, J. y Rudich, J. *The tomato crop*. Editorial Chapman & Hall. pp. 273-311.
- Thakur, B., Singh, R. y Nelson, P.E. 1996. Quality attributes of processed tomato products. *Food Reviews International*. 12:275-401
- Thybo, A.K., Szczypinski, P. M., KARLSSON, A.H., Donstrup, S., Stodkilde-Jorgensen, H.S., y Andersen, H.J., 2004. Prediction of sensory texture quality attributes of cooked potatoes by NMR-imaging (MRI) of raw potatoes in combination whit different imaging analysis methods. *Journal of Food Engineering*, 61: 91-100.
- Tobarra. 2003. Penetrómetro para fruta. PCE Group.
- Tollner, E.N., Brecha, J.K., Upchurch, B.L. 1993. Nondestructive evaluation: Detection of external and internal attributes frequently associates with quality or damage. USA. pp 225-255.
- Torres-Argüelles, V., Ventura-Ramos, E., Olescko, K., R., Parrot, J-F. y Vásquez-Méndez, R., 2007. *Ingeniería Hidráulica en México XXII* 107-123

- Tu, K., P. Jacsok, B. Nicolaï y Baerdemaeker D.J. 2000. Use of laser-scattering to study tomato-fruit quality in relation to acoustic and compression measurements. *International Journal of Food Science and Technology*. 35:503-510.
- Turner, M.J., Blackledge., and Andrews, P.R., 1998, *Fractal geometry in digital imaging*, academic Press, Cambridge, Great Britain, 328 p.
- Turvey C.G.2007, *Physica*. 377:155-165.
- USDA. 2003. *Situation fresh and processed tomatoes. USA*.
- Velázquez, G., P. Vázquez, M. Vázquez y J.A. Torres. 2005. Avances en el procesado de alimentaria por alta presión. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*.4:353-367.
- Valdéz, R.D., y Olivares, E., 1998. Fractal analysis of Mexico's annual mean yields of maize, bean, wheat and rice. *Field Crops Research*, 59:53-62.
- Wagner, A., Jamiolkowska, A. 2005. Fungal Communities from the Rhizosphere of tomato cultivated conventionally and with rye as cover crop. Department of Plant Protection and Quarantine. Agricultural University in Lublin. Poland.
- Watkins, R.W., Grey, C. B., Cowan, D.P., Steve, D.L. Systemic Application of L-Phenylalanine Increase Plant Resistance to Vertebrate Herbivory. *Journal of Chemical Ecology*. 23(5).
- Weisstein,E.W. Hurst Exponent. From Math World. A Wolfram Web Resource[en linea]. <http://mathworld.wolfram.com/HurstExponent.html>, 2005.
- Westland, S., Connah, D., Thomson, M.G.A. 2001. Recovering spectral information using digital camera systems. University of Derby. UK. 117(6): 309-312.

Wilson, T.C, Paul, E.A., and Hardwood, R.R., 2001. Biologically active soil organic matter fraction in sustainable cropping systems. *Applied Soil Ecology*, 16:63-76.

Wolfram. 2007. Research, INC.

Worthington, C.R., Blaurock, A.E. 1969. *Biochim. Biophys. Acta* 173:427.

Zheng, C., Sun, D.-W., & Zheng, L. 2006. Recent development of image texture for evaluation of food qualities – a review. *Trends in Food Science & Technology*, 17:113-128.