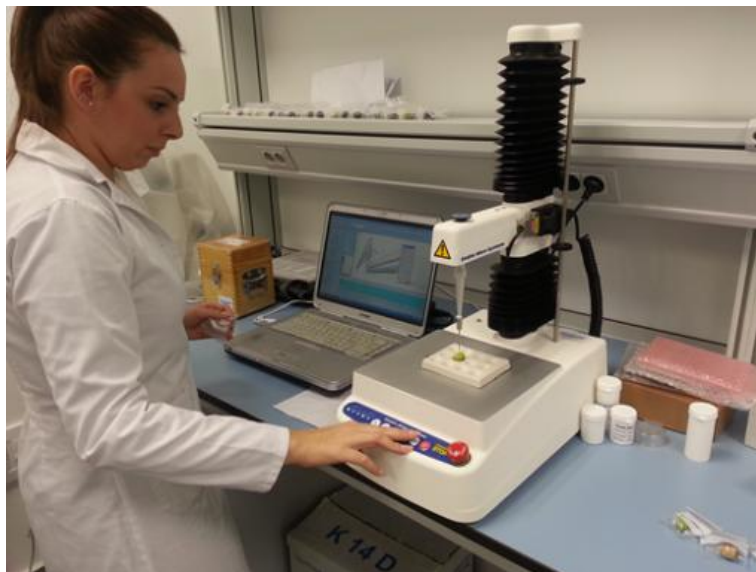




**APLICACIÓN DE TÉCNICAS ÓPTICAS  
PARA LA EVALUACIÓN DE PROPIEDADES  
TEXTUROMÉTRICAS DE FRUTOS COMESTIBLES**



**ROCÍO GARCÍA CABELLO  
FACULTAD DE FARMACIA  
UNIVERSIDAD DE SEVILLA**



**UNIVERSIDAD DE SEVILLA**

**FACULTAD DE FARMACIA**

**GRADO EN FARMACIA**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**APLICACIÓN DE TÉCNICAS ÓPTICAS PARA LA  
EVALUACIÓN DE PROPIEDADES TEXTUROMÉTRICAS DE  
FRUTOS COMESTIBLES**

**ROCÍO GARCÍA CABELLO**

DEPARTAMENTO DE NUTRICIÓN Y BROMATOLOGÍA,

TOXICOLOGÍA Y MEDICINA LEGAL

TUTOR: Dra. MARÍA LOURDES GONZÁLEZ-MIRET MARTÍN

TRABAJO EXPERIMENTAL

SEVILLA, 20 DE SEPTIEMBRE DE 2016

# ÍNDICE

RESUMEN.....	5
1. INTRODUCCIÓN .....	6
1.1. La aceituna .....	6
1.1.1. Variedades.....	6
1.1.2. Proceso de maduración .....	8
1.1.3. Características de la aceituna para su recolección .....	10
1.2. El color .....	11
1.2.1. Análisis digital del color .....	13
1.3. El análisis hiperespectral.....	13
1.4. La texturometría .....	15
2. OBJETIVOS .....	18
3. METODOLOGÍA.....	19
3.1. Muestras .....	19
3.1.1. Toma de muestras.....	19
3.1.2. Clasificación y codificación de las muestras .....	19
3.2. Color y Análisis de Imagen .....	20
3.2.1. Adquisición de imágenes digitales .....	20
3.2.2. Adquisición de imágenes hiperespectrales.....	22
3.3. Medida de la textura.....	23
3.3.1. Ensayo de punción .....	25
3.3.2. Ensayo de compresión .....	26
3.4. Tratamiento de datos .....	27
3.4.1. Estadística descriptiva .....	27

3.4.2. Análisis de la varianza (ANOVA) .....	27
3.4.3. Regresión múltiple .....	27
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	29
4.1. Evaluación visual .....	29
4.2. Técnicas ópticas .....	29
4.2.1. Análisis de la imagen y estudio colorimétrico .....	29
4.2.2. Técnicas hiperespectrales.....	33
4.3. Análisis de la textura .....	34
4.4. Estudio estadístico multivariante .....	35
5. CONCLUSIONES.....	37
6. BIBLIOGRAFÍA .....	38

## RESUMEN

La variedad de aceituna Verdial, cultivada fundamentalmente en Andalucía y Extremadura, se recoge desde final de noviembre hasta final de año, y se caracteriza por un envero medio-tardío con predominio del color verde en el momento de la cosecha. En este trabajo se han estudiado las características ópticas y texturométricas de esta variedad mediante el análisis de 396 aceitunas (cada una constituyó una muestra), tomadas aleatoriamente en diferentes estados de maduración, con el objetivo de encontrar correlaciones entre estas características y sus propiedades para la obtención de aceite.

Para ello, se ha determinado el color de las muestras mediante análisis de imagen digital pudiendo apreciar la variación de color en cada momento de la maduración, y confirmar las diferencias establecidas para cada nivel de madurez. También se ha estudiado el espectro infrarrojo (NIR) de las aceitunas a través de la toma de imágenes hiperespectrales, cuyos resultados se relacionan con la composición de las muestras en cada momento. Posteriormente, a cada una de las muestras se les realizó dos ensayos de textura, uno de punción y otro de compresión, en los que pudimos observar la disminución de la resistencia a la punción y a la deformación, tanto de la piel como de la pulpa de la aceituna, conforme avanza el estado de maduración.

Finalmente, se diseñó un modelo predictivo que confirmara la hipótesis de la supuesta relación entre las propiedades ópticas y las propiedades texturométricas de los frutos. Mediante técnicas estadísticas multivariantes de regresión ha sido posible establecer relaciones entre el color y la textura de las aceitunas. Estas técnicas pueden ser útiles en la predicción de la textura de manera más rápida y sin destruir la muestra. De esta manera podremos predecir si aceitunas que, basadas en su apariencia, no se consideran con un índice de madurez elevado poseen, sin embargo, propiedades mecánicas adecuadas para la extracción del aceite.

PALABRAS CLAVES: aceitunas, textura, color, imagen.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. La aceituna

Se denomina *aceituna* al fruto de variedades determinadas del olivo (*Olea europea sativa*) cultivado, sano, cogido en el estado de madurez adecuado y de calidad tal que, sometido a un determinado proceso de elaboración, proporcione un producto listo para el consumo y de buena conservación (ASEMESA, 2016).

Una subespecie de olivo concreta va a producir frutos con características específicas de dicha especie. El aceite extraído de estos frutos va a conservar dichas características, siempre y cuando se haya extraído mediante procedimientos mecánicos o físicos que no alteren el producto.

### 1.1.1. Variedades

En España se han catalogado más de 250 variedades cultivables de olivo desde el inicio de su cultivo en la Península Ibérica. Según la zona geográfica se cultivan distintas variedades de aceitunas. Algunas de ellas tienen doble aptitud, es decir, pueden ser destinadas al consumo directo como encurtido o bien a la producción de aceite (MARM, 2016) (Figura 1).

<b>ALMAZARA</b>	Picual	<b>MESA</b>	Gordal
	Arbequina		Manzanilla
	Empeltre	<b>DOBLE APTITUD</b>	Hojiblanca
	Cornicabra		Verdial de Badajoz
	Picudo		Cacereña
	Lechin Sevillana		
	Farga		
	Royal		

Figura 1. Principales variedades de aceitunas y sus principales destinos de consumo.

Algunas de las variedades más conocidas y utilizadas en España son (MARM, 2016; Uceda y cols., 2016):

- *Arbequina*: Fruto pequeño, ovalado y casi simétrico. Produce aceites verdosos con reflejos amarillos, afrutados, con aromas a manzana y almendra. Representativa de Cataluña.

- *Cornicabra*: El fruto es largo, curvo y asimétrico. Sus aceites van desde color amarillo-verdoso a oro, con aromas frescos y sabor con toques dulce, amargo y picante. Domina la zona central de la Península.
- *Empeltre*: Fruto asimétrico y alargado. Aceites de color entre amarillo paja y oro viejo, tiene aromas de frutas, sobre todo manzana. Típica del bajo Aragón.
- *Hojiblanca*: Fruto grande y oblongo. Aceites de color verde intenso con aroma de frutas maduras, sabor agradable algo amargo y picante. Principalmente, en Málaga y Córdoba.
- *Picual*: Fruto elipsoidal. Aceite afrutado con intenso amargor y claros tonos picantes. Variedad predominante en Jaén.
- *Picuda*: También conocida como Carrasqueña de Córdoba. Aceites con aromas a frutas exóticas, manzana y almendras. Muy difundida en Córdoba, Granada, Málaga y Jaén.
- *Farga*: Frutos de tamaño pequeño a mediano con largo pedúnculo. Maduración muy temprana y elevado rendimiento graso, produce aceites de muy buena calidad. Originaria del sur de Tarragona, norte de Castellón y Teruel.
- *Blanqueta*: Fruto ovalado y ligeramente asimétrico. Produce aceites de tonalidad verde hoja y aromas afrutados con notas de tomate verde. Se cultiva en Alicante y sur de Valencia.
- *Cacereña*: Fruto esférico, aunque algo asimétrico. Es una variedad de doble aptitud, muy apreciada para aderezo. Gran difusión en la provincia de Cáceres.
- *Verdial de Badajoz*: Fruto de gran tamaño, es de doble aptitud. Produce aceites con aromas a aceituna verde y almendra. Está presente en las vegas del Guadiana.
- *Lechín de Sevilla*: Fruto elipsoidal, algo abombado por el dorso. Aceite relativamente inestable, con aroma medio y equilibrado y un sabor amargo. Se distribuye por las provincias de Sevilla y Córdoba, principalmente.
- *Manzanilla*: Fruto ovalado. Se emplea fundamentalmente como aceituna para aderezo. Se cultiva en la provincia de Sevilla.

- *Gordal*: Fruto de gran tamaño, acorazonado y algo asimétrico. Su aptitud es para aderezo. Tanto su origen como su cultivo están vinculados a la provincia de Sevilla.

### 1.1.2. Proceso de maduración

El fruto del olivo madura a finales de verano y su recolección se produce en otoño-invierno. Durante el envero, la aceituna cambia de color y pasa del verde inicial al morado oscuro, es aquí donde se produce lo que se conoce como “lipogénesis” o aparición del aceite en la pulpa de la aceituna.

La maduración integra diferentes fenómenos asociados que dan lugar a una serie de cambios en las aceitunas, relativos a los siguientes conceptos (AGRUM, 2016):

1. *Contenido en azúcares y otros compuestos orgánicos*: los principales azúcares en la pulpa son la glucosa, fructosa y sacarosa. Desde el comienzo de la lipogénesis hay una relación directa entre el aumento de la cantidad de aceite y la disminución del contenido de azúcares.
2. *Compacidad*: coincidiendo con el principio de la lipogénesis comienza el ablandamiento de la pulpa, a causa de la disminución del contenido en protopectinas.
3. *Color del epicarpio y mesocarpio*: la coloración del fruto está muy ligada a la maduración. El inicio de la maduración es el momento en que comienza a disminuir la clorofila en el fruto, justo antes de la acumulación de antocianinas. La variación o presencia de estos pigmentos influyen en la coloración de la aceituna, que adquiere un tono verde dorado. Las antocianinas son las responsables del color púrpura y azul. Comienzan a sintetizarse por ambos extremos del epicarpio, para extenderse luego a su totalidad, y posteriormente al mesocarpio. Finalmente, el color negro se debe a la oxidación de los compuestos fenólicos, incluida la oleuropeína, compuesto responsable del amargor de las aceitunas y los aceites.
4. *Contenido en aceite*: el contenido de los frutos en aceite aumenta a medida que avanza la maduración, alcanzando su máximo en el momento en el que



desaparecen los frutos verdes en el árbol. A partir de este momento el aceite permanece prácticamente constante.

5. *Abscisión y resistencia al desprendimiento*: La caída natural de frutos (abscisión) depende fundamentalmente de la variedad, aunque también se puede modificar por las condiciones climáticas o el estado sanitario. En general, durante el período de maduración la caída natural es pequeña.

La resistencia al desprendimiento se mide por la fuerza necesaria para separar el fruto del pedúnculo, y varía enormemente a lo largo de la maduración. En los frutos aún verdes, alcanza valores próximos a los 800-1000 gramos, bajando de manera acusada durante el período de maduración para, a partir de ahí, disminuir muy lentamente.

Es estado de maduración se establece en función del color de la piel y la pulpa de la aceituna. Para clasificarlas, se toma una muestra de 2 kg de aceitunas, recogidas a la altura del operador y en las cuatro orientaciones del árbol, se homogeniza y se sacan 100 frutos al azar y se clasifican en las siguientes categorías (Frías Ruiz y cols., 1999)

(Figura 2):

- Clase 0: Piel verde intenso
- Clase 1: Piel verde amarillento
- Clase 2: Piel con manchas rojizas
- Clase 3: Piel rojiza o morada en más de la mitad del fruto. Final de envero
- Clase 4: Piel negra y pulpa blanca
- Clase 5: Piel negra y pulpa morada sin llegar a la mitad de la pulpa
- Clase 6: Piel negra y pulpa morada sin llegar al hueso
- Clase 7: Piel negra y pulpa morada totalmente hasta el hueso

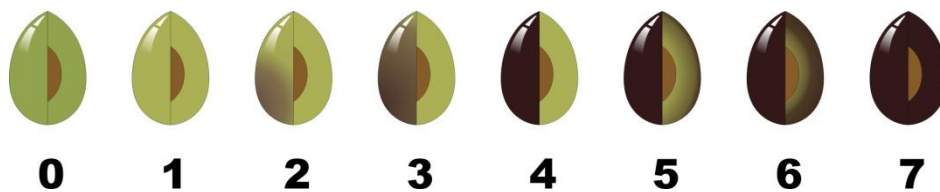


Figura 2. Escala visual de maduración

A partir de estos resultados, se obtiene el *índice de madurez* (IM) por la siguiente fórmula:

$$IM = Ax0 + Bx1 + Cx2 + Dx3 + Ex4 + Fx5 + Gx6 + Hx7 / 100$$

siendo A, B, C, D, E, F, G y H, el número de frutos de las clases 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, y 7, respectivamente (AGRUM, 2016).

### 1.1.3. Características de la aceituna para su recolección

En la elección del momento de la recolección se debe buscar conseguir la mayor cantidad de aceite, compaginándolo con la obtención de un producto de calidad. Por otro lado, la recolección en fechas tempranas asegura mayores producciones en la siguiente campaña.

La cantidad de polifenoles y de compuestos volátiles, causantes del sabor, el aroma y la estabilidad, va aumentando a lo largo del ciclo y presentan máximos en el momento en que el árbol ofrece la mayor cantidad de aceitunas en enero.

La cantidad de aceite contenido en los frutos es uno de los principales valores a tener en cuenta. El seguimiento se hace midiendo el rendimiento de las aceitunas, entendiendo como tal el porcentaje de aceite total respecto al peso en húmedo de los frutos. Como el peso de los frutos va descendiendo desde el momento del ennegrecimiento, a consecuencia de las deshidrataciones, se puede llegar a pensar que un rendimiento mayor significa mayor cantidad de aceite cuando no es así. Por tanto, es más recomendable emplear la relación Aceite Total/Materia Seca (%). En la variedad Verdial el contenido graso es del 72.7 %.

Desde el punto de vista de la elaboración de aceite, la composición del fruto en el momento de la recolección debe ser la siguiente:

- Agua de vegetación: 40 a 55%
- Aceite: 18 a 32%
- Hueso: 14 a 22%
- Almendra o semilla: 1 a 3%
- Epicarpio y resto de pulpa: 8 a 10%

Según el índice de madurez, el momento óptimo de la recolección es cuando éste alcanza valores próximos a 3.5 (AGRUM, 2016).

## 1.2. El color

El color es una respuesta mental al estímulo que produce una radiación luminosa visible en la retina (Aznar, 2016). Se considera un concepto psicofísico debido a la contribución del fenómeno físico y de la sensación que provoca. Así, depende de tres factores: la luz, la interacción de ésta con la materia y el observador. La interacción de la radiación depende de las características químicas del objeto. Así, el color de los frutos está relacionado con su composición, y por lo tanto, define en parte la calidad de un producto.

Tal como postuló Newton, el color es una magnitud tridimensional, y necesitamos tres atributos para definirlo. Éstos son:

- a) Matiz o tono: Es el atributo fundamental y se define tradicionalmente como el que hace clasificar los colores en rojizos, verdosos, etc. Está relacionado con las diferencias de absorbancia de la energía radiante a diferentes longitudes de onda ( $\lambda$ ) en el espectro visible. Es el atributo cualitativo del color.
- b) Brillo o luminosidad: Es la característica por la cual un color puede clasificarse como más claro o más oscuro. Este atributo cuantitativo no es más que una medida relativa de la cantidad total de luz reflejada o transmitida frente a la cantidad de luz incidente.
- c) Saturación o pureza: Es también un atributo cuantitativo, y determina para cada tono su grado de diferencia respecto al color gris de la misma luminosidad.

La aplicación de la teoría tricromática al estudio del color de los alimentos proporciona una caracterización cromática segura mediante la metodología recomendada por organizaciones tales como la Comisión Internacional de Iluminación (*Commission Internationale de l'Eclairage*) (CIE). Una adecuada integración de los espectros de absorción, de acuerdo con las condiciones de referencia seleccionadas (iluminante y observador) permite obtener los valores triestímulo con los cuales la CIE define los diferentes sistemas colorimétricos: los espacios de color y sus correspondientes diagramas cromáticos asociados, así como los parámetros psicofísicos (claridad, tono y saturación) (Gil, 2014).

En el espacio de color CIE 1976-L\*a\*b\* (CIELAB), estos tres atributos se representan con las variables claridad (L\*), croma (C\*<sub>ab</sub>) y tono (h<sub>ab</sub>) (Figura 3). De esos tres atributos, contribuyen a la cromaticidad el tono de manera cualitativa, y la saturación, de manera cuantitativa.

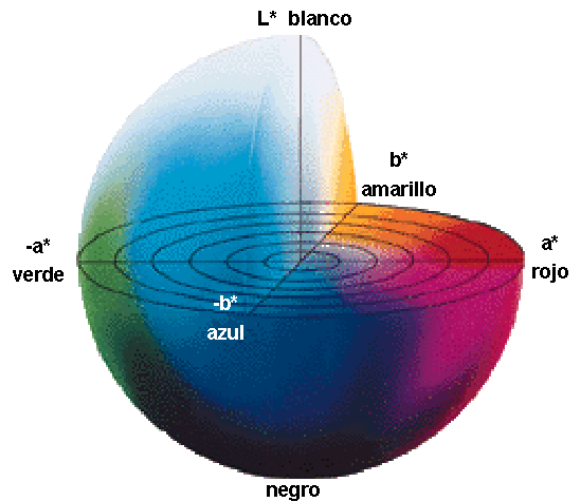


Figura 3. Espacio CIELAB

El espacio de color CIELAB es un sistema coordenado cartesiano definido por tres coordenadas colorimétricas L\*, a\*, b\* magnitudes adimensionales (unidades CIELAB).

La coordenada L\* recibe el nombre de claridad y puede tomar valores entre 0, correspondiente al negro, y 100, para el blanco. Las coordenadas colorimétricas a\* y b\* forman un plano perpendicular a la claridad. La coordenada a\* define la desviación del punto acromático correspondiente a la claridad, hacia el rojo si a\* > 0, hacia el verde si a\* < 0. Análogamente la coordenada b\* define la desviación hacia el amarillo si b\* > 0, y hacia el azul si b\* < 0.

El conjunto a\*, b\* junto con la claridad L\* definen el color de un estímulo. A partir de ellas se definen dos magnitudes colorimétricas nuevas mediante las expresiones siguientes:

$$C^*_{ab} = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$$

$$h_{ab} = \arctg\left(\frac{b^*}{a^*}\right)$$

El croma, C\*<sub>ab</sub>, es el atributo de la percepción visual conforme al que un área parece saturada respecto a un determinado color o tonalidad. Tiene valor 0 para estímulos

acromáticos y, por lo general, no pasa de 150 aunque puede superar ese valor para estímulos monocromáticos. El tono,  $h_{ab}$ , es el color básico de un objeto (azul, amarillo,...) definido por su posición angular en un espacio de color cilíndrico. Los valores, por tanto, varían entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$ , y para estímulos acromáticos ( $a^* = 0$ ,  $b^* = 0$ ) es una magnitud no definida. Ambos términos también definen la cromaticidad del color del estímulo, y junto con la claridad determinan las coordenadas cilíndricas o angulares.

### 1.2.1. Análisis digital del color

Las medidas instrumentales del color se realizan mediante la evaluación de su espectro y posterior cálculo de los valores triestímulo siguiendo las directrices de la CIE. No obstante, es posible medir el color instrumentalmente mediante el uso de cámaras digitales RGB si se adquieren bajo condiciones establecidas, con el posterior tratamiento de imagen. Una cámara digital recibe las imágenes en un dispositivo CCD (en inglés *charge-coupled device*), circuito que contiene un número de condensadores que son estimulados por la radiación y registran gradaciones de luz en tres colores básicos: rojo, verde y azul (RGB en inglés). Cada píxel de la imagen contiene un valor para cada uno de los canales RGB. El espacio de color RGB no es continuo, cada canal toma un valor entero entre 0 y 255, lo que hace un total de más de 16 millones de colores. Para la obtención del color, es necesario realizar la transformación desde el espacio de color RGB a los espacios recomendados por la CIE (CIEXYZ, CIELUV, CIELAB). Esta transformación no es directa y se necesita una calibración que depende, entre otros factores, de la iluminación al capturar las imágenes (León y cols., 2006).

### 1.3. El análisis hiperespectral

Las técnicas hiperespectrales surgen de la integración de la visión artificial convencional y las técnicas espectroscópicas, determinando en un mismo análisis las propiedades espaciales y químicas de una muestra. Tiene grandes ventajas sobre la espectroscopia convencional, ya que ésta realiza la medida sobre un volumen concreto y necesita homogeneidad en la muestra para que el espacio de medida no sea limitado (Gil, 2014). También presenta ventajas sobre los sistemas de visión artificial con cámaras convencionales, que solo permiten evaluar la apariencia de las muestras.

Debido a su capacidad para proporcionar información, tanto espectral como espacial, la técnica es adecuada para su uso simultáneo en la inspección de múltiples atributos y defectos de la calidad de los frutos, tales como la firmeza, el color, el tamaño, presencia de insectos, contusiones, mohos y rugosidad (Leiva-Valenzuela y cols., 2015).

Una imagen hiperespectral ofrece diferentes bandas que corresponden a una longitud de onda determinada. Está compuesta por una batería de imágenes de la misma escena, donde cada imagen corresponde a la reflectancia de la muestra a una única longitud de onda.

La batería de imágenes que componen una imagen hiperespectral se denomina *cubo hiperespectral* o *hipercubo*. Dos dimensiones del cubo corresponden a las coordenadas espaciales  $x$  e  $y$ , la tercera corresponde a la longitud de onda ( $\lambda$ ) (Koehler y cols., 2002). La dimensión espectral aporta información de sobre compuestos químicos y en qué concentración se encuentran en la muestra (Gowen y cols., 2007). Esta técnica es muy utilizada en ciencia de los alimentos para detectar enfermedades en frutos y cultivos y para conocer la composición química y el grado de maduración (Gil, 2014).

La técnica espectroscópica más empleada en ciencia de los alimentos es la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR). El espectro incluye longitudes de onda desde 750 hasta 2600 nm, las bandas que se manifiestan en este intervalo corresponden a vibraciones de enlaces O-H, N-H, C-H y S-H, por ello la espectroscopia NIR puede aplicarse a todos los compuestos orgánicos ricos en estos enlaces, por ejemplo, para determinar la humedad, carbohidratos y grasas, en compuestos orgánicos y derivados del petróleo, en proteínas y en aminoácidos (Pasquini, 2003).

El detector de una cámara hiperespectral almacena la intensidad de cada pixel tridimensional (*voxel*), que representan la reflectancia de la muestra en un punto del espacio y a una determinada longitud de onda. Esta medida no tiene interés analítico y, por ello, se utilizan unidades de reflectancia relativa mediante la calibración de la reflectancia de las imágenes. Para este proceso se necesitan dos medidas adicionales. Una corresponde con un blanco o 100% de reflectancia. La otra medida corresponde al 0% de reflectancia y elimina el ruido de fondo de las medidas, se realiza con las lámparas apagadas y la tapa de la cámara puesta. La medida de la reflectancia relativa se realiza mediante la siguiente fórmula (Rodríguez y cols., 2014):

$$R = \frac{R_0 - B}{W - B}$$

donde  $R_0$  es la reflectancia sin corregir,  $B$  es la reflectancia de la corriente oscura y  $W$  es la reflectancia del blanco. La reflectancia en la imagen calibrada tendrá valores comprendidos entre 0 y 1.

#### 1.4. La texturometría

La *textura* se define como el conjunto de las propiedades reológicas y de estructura de un producto, perceptibles por los mecanorreceptores, receptores táctiles y, en ciertos casos, por los visuales y los auditivos (ICTAN, 2016).

La textura de los alimentos se evalúa generalmente mediante técnicas de análisis sensorial (Giacosa y cols., 2015). La variabilidad de los atributos sensoriales dentro de los grupos y la subjetividad son limitaciones importantes, las cuales deben minimizarse al máximo para obtener resultados fiables (Bavay y cols., 2013). Estas dificultades, junto con el tiempo requerido para la realización del análisis sensorial y su elevado coste, han exigido una medición objetiva y cuantitativa de la textura mediante métodos instrumentales (Chen y Opara, 2013).

Las medidas texturales y reológicas se pueden clasificar en objetivas, realizadas con instrumentos, y subjetivas, efectuadas por personas. Las pruebas subjetivas se clasifican en orales y no orales. Las pruebas objetivas se dividen en directas, que miden propiedades texturales reales de los materiales, e indirectas, que se correlacionan bien con una o más propiedades texturales. Las pruebas objetivas directas se han dividido en fundamentales, empíricas e imitativas (Bourne, 1982, 1978).

- Ensayos fundamentales: miden propiedades reológicas fundamentales, tales como viscosidad y módulo elástico. Estos métodos no se correlacionan bien con la evaluación sensorial (Rodríguez y cols., 2005).
- Ensayos empíricos: métodos fáciles de aplicar, rápidos y de bajo costo. Se correlacionan mejor con la evaluación sensorial que los anteriores. Ejemplos de ellos son los ensayos de compresión y penetrabilidad (Castro y De Hombre, 2007)

- Ensayos imitativos: imitan las condiciones a las que el material se ve sometido en la práctica. Pueden medir las propiedades de un material durante su manipulación y simular el proceso de masticado de los alimentos. Tienen buena correlación con el análisis sensorial (Castro y De Hombre, 2007).

Los equipos utilizados para medir estas propiedades se denominan texturómetros, equipos que, mediante una célula de carga similar a la que posee una balanza, son capaces de adquirir simultáneamente datos de fuerza, tiempo y distancia. Esto permite realizar el análisis del producto en tres dimensiones. El análisis de las curvas y los puntos críticos de las gráficas que da el equipo definirá el análisis de textura (Figura 4).

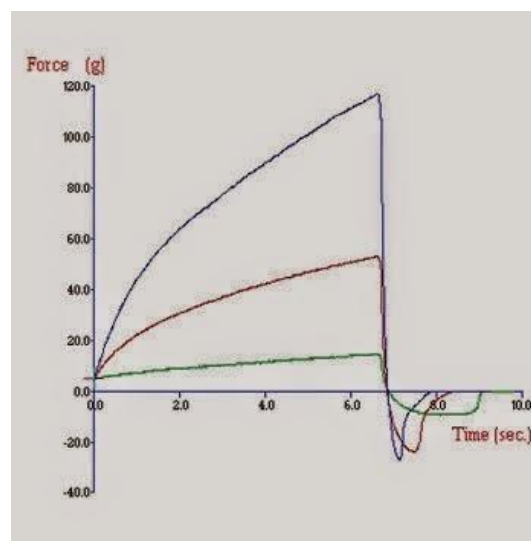


Figura 4. Análisis de textura. Curva Fuerza vs Tiempo

El análisis de textura de alimentos aporta información que puede complementar al resto análisis convencionales (espectrometría, análisis químico de la composición, análisis del color) para la determinación de las propiedades que se estén analizando.

Estos equipos utilizan diversas sondas, cada una específica para cada ensayo concreto con el que se obtiene la medición de los parámetros o propiedades deseadas. Los resultados, por tanto, son característicos para cada producto.

El texturómetro puede realizar distintos tipos de ensayos, cada uno de ellos con diversas aplicaciones (ICTAN, 2016):



- a) Compresión y perfil de textura (TPA): ofrece parámetros de textura que se relacionan con el análisis sensorial, como son la dureza, fracturabilidad, cohesividad, elasticidad, masticabilidad, gomosidad y adhesividad.
- b) Punción y penetración: causa daños irreversibles en la muestra ya que implica fuerzas de compresión y cizalla. Las sondas utilizadas pueden ser cilíndricas, cónicas y de aguja con un diámetro menor al área de contacto con la muestra.
- c) Tensión: mide la extensibilidad y resistencia a la tensión.
- d) Corte y cizalla: mide la fuerza requerida para cortar o cizallar una muestra.
- e) Fractura y flexión con 2 y 3 puntos: mide la fracturabilidad y resistencia a la rotura.
- f) Extrusión: este ensayo simula la masticación.
- g) Adhesión: mide la pegajosidad y adhesividad de un producto.

## 2. OBJETIVOS

El **objetivo principal** de este trabajo es evaluar la capacidad de técnicas ópticas en el visible e infrarrojo cercano (NIR) para estimar propiedades de textura de aceitunas destinadas a la producción de aceite.

Para alcanzarlo, se plantearon los siguientes **objetivos específicos**:

- Seleccionar una variedad de aceituna de verdeo adecuada y realizar un muestreo representativo que abarque una amplia gama de estadios de maduración, desde totalmente verde a totalmente madura, para tener una información lo más completa posible de la variabilidad de esta etapa.
- Realizar una clasificación previa de las muestras en diferentes estadios de maduración, basada en criterios visuales en función de su apariencia, para posteriormente correlacionar o comprobar esta clasificación mediante técnicas instrumentales basadas en criterios objetivos.
- Aplicar técnicas colorimétricas y espectrales avanzadas, como el análisis de imagen digital e hiperespectral NIR, para determinar las características de color y apariencia de las aceitunas.
- Realizar el análisis texturométrico de las aceitunas, mediante ensayos de punción y compresión, para determinar las características estructurales de los frutos en los diferentes estadios de maduración.
- Mediante aplicación de técnicas estadísticas multivariantes, realizar estudios de correlación entre los datos de color y la apariencia y otras las propiedades espectrales (NIR), con los cambios en la textura de las aceitunas.

Un resultado positivo daría la posibilidad de determinar si frutos que aún muestran un aspecto verde y, por tanto, se desestimarían en la recolección, poseen propiedades mecánicas adecuadas para la obtención del aceite.

## 3. METODOLOGÍA

### 3.1. Muestras

#### 3.1.1. Toma de muestras

Para este estudio se muestrearon 5 kg de aceitunas de la variedad Verdial, de un cultivo en el término municipal de Marchena, Sevilla (37°21'N–5°17'W). La recolección se realizó durante la primera quincena de enero de 2016. (Figura 5). De esta muestra bruta se tomaron aleatoriamente 396 aceitunas sanas y sin defectos.



*Figura 5. Procedencia de las muestras*

#### 3.1.2. Clasificación y codificación de las muestras

Las muestras se clasificaron de tal modo que cada aceituna fue una unidad muestral, permitiendo su identificación en las imágenes y en las medidas de textura. Cada imagen contenía 18 aceitunas colocadas ordenadamente sobre una superficie blanca de poliuretano.

Las imágenes se nombraron con una letra, de la A a la V, y a cada aceituna se le asignó un código compuesto por la letra de la imagen a la que pertenece y por un número, del 1 al 18, que la identificaba dentro de la imagen.

Tras la toma de imágenes, cada aceituna se guardó individualmente en una bolsa de plástico con cierre hermético, marcada adecuadamente con el código de la muestra que contenía (Figura 6).



Figura 6. Clasificación y codificación de las muestras

## 3.2. Color y análisis de la imagen

Se han empleado técnicas ópticas para la evaluación de las muestras, basadas en la colorimetría triestímulo, análisis de imágenes digital e hiperspectral. Estas técnicas tienen la ventaja de ser objetivas, no destructivas (permiten reutilizar la muestra tras el análisis) y de respuesta inmediata, con un tiempo de ejecución del análisis y obtención de resultados de pocos segundos, ya que se trata de la integración y posterior tratamiento matemático de los espectros de reflectancia.

### 3.2.1. Adquisición de imágenes digitales

Para la adquisición de estas imágenes se usó el sistema DigiEye® (VeriVide®) (Luo y cols., 2001). Está especialmente diseñado para la medida del color según las directrices de la CIE (Comisión Internacional de la Iluminación) y para la evaluación de otras características relacionadas con la apariencia, como son la heterogeneidad cromática o el calibre del fruto (Gil, 2014).

El equipo (Figura 7) consta de una cabina de iluminación cerrada, una cámara digital y un ordenador. La cámara digital está colocada en la parte superior de la cabina de iluminación, la cual está diseñada para proporcionar una iluminación indirecta y difusa a la muestra.

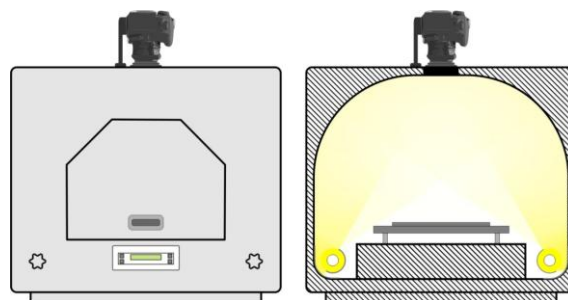


Figura 7. Esquema de la cabina de iluminación y cámara digital del sistema DigiEye®

El calibrado de la cámara se realiza transformando la señal RGB de la cámara a las especificaciones CIE mediante una carta de patrones certificada (Figura 8).



*Figura 8. Carta de calibración de la cámara*

La cabina de iluminación dispone de dos tubos fluorescentes que emulan el iluminante D65 (CIE, 2007) y ofrecen unas condiciones de iluminación estables. El habitáculo de la cabina tiene una anchura de 68 cm, una profundidad de 64 cm y una altura de 40 cm. En la parte inferior se encuentran los tubos fluorescentes, 15 cm por debajo de la bandeja donde se colocan las muestras. La cabina también presenta dos deflectores que reparten la luz de los tubos hacia las paredes y la zona superior abovedada, fabricada con material que refleja la luz en todas direcciones, lo que hace que a la muestra le llegue luz difusa. Esto evita la aparición de brillos y sombras que interferirían en la toma de la imagen.

Para la adquisición de imágenes se utilizó una cámara digital Nikon® D80 de 10.2 megapíxeles y un objetivo Nikkor® 35 mm f/2D, conectada mediante un puerto USB a un ordenador. Para obtener las imágenes las aceitunas se colocaron sobre una superficie de poliuretano blanca que facilitó la posterior identificación de las muestras en cada imagen.

Posteriormente, de cada imagen se midió el valor medio y la desviación estándar de las variables colorimétricas  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C^*_{ab}$  y  $h_{ab}$ . También se determinó la media de diferencias de color respecto al color medio (MCDM), una variable que cuantifica en términos de unidades CIELAB la heterogeneidad cromática de una muestra.

Por otro lado, como en la segmentación queda definido el perímetro del fruto, se midió también el calibre de cada aceituna de manera automática a partir de las

imágenes digitales. Este procedimiento considera el diámetro medio obtenido a lo largo de todas las direcciones del fruto, que es alargado, y mejora así la medida con un calibre manual.

Todo el tratamiento de imágenes y la extracción de la información analítica se realizó con el software MATLAB r2015a.

### 3.2.2. Adquisición de imágenes hiperespectrales

La adquisición de imágenes hiperespectrales se realizó con un equipo formado por una cámara, un espectrógrafo, un sistema de barrido, un sistema de iluminación y una bandeja para la colocación de muestra (Figura 9).



*Figura 9. Equipo de imágenes hiperespectrales.*

La cámara utilizada es modelo Xeva 1.7-320, fabricada por Xenics® (Lovaina, Bélgica). Tiene un detector de tipo InGaAs con refrigeración termoeléctrica y con un intervalo espectral útil de 900 a 1700 nm, compuesto por una matriz de 320x256 píxeles. La cámara tiene una fuente de alimentación propia de 12 V y se comunica con el ordenador mediante un puerto USB 2.0.

El espectrógrafo InspectorN17E de Specim® (Oulu, Finlandia) es el elemento dispersivo de la luz. Su óptica permite dispersar cada punto de una línea de luz (monodimensional) en longitudes de onda que van de 900 a 1700 nm, y de formar una imagen bidimensional de 14.2x7.6 mm (espacial x espectral). De este modo, la imagen en su dimensión espacial queda registrada en el eje de 320 píxeles de la cámara y la dimensión espectral de 7.6 mm queda registrada en el eje de la cámara de 256 píxeles.

La resolución espectral del equipo es de 3.23 nm, resultado de repartir el intervalo útil de espectrógrafo en los 256 píxeles de la cámara.

El sistema de barrido consigue la dimensión espacial restante. El dispositivo usado fue MirrorScanner, Specim® (Oulu, Finlandia). Está diseñado para ser acoplado al espectrógrafo y su óptica es útil en el mismo intervalo del espectro electromagnético. Dispone de un espejo móvil que barre la superficie de la muestra y al sincronizarse con el ordenador permite construir el *hipercubo*. Tiene una fuente de alimentación propia de 24 V y se comunica con el ordenador mediante un puerto USB 2.0.

A la altura de la cámara, separadas 50 cm y dirigidas a 45° respecto a la superficie de la muestra, se colocaron dos lámparas halógenas de 70 W tipo cuarzo iodo Prilux® (Barberá del Vallés, Barcelona).

Al igual que para el análisis digital colorimétrico, las imágenes se adquirieron colocando las muestras sobre una bandeja blanca de polietileno, cuyo espectro característico fue útil en los procesos de segmentación de las imágenes hiperespectrales.

Para normalizar los valores de reflectancia se utilizó una cerámica certificada de 300×25×10 mm Spectralon® (Labsphere Inc., North Sutton, USA).

El control de la cámara y del sistema de barrido, la sincronía entre ambos dispositivos y el almacenamiento de las imágenes, se realizó desde el software SpectralDAQ 3.62, Specim® (Oulu, Finlandia). Según las condiciones de iluminación y la potencia del ordenador, se fijó un tiempo de integración de las imágenes de 9 milisegundos y una tasa de muestreo (imágenes por segundo) de 50 Hz.

De cada aceituna se obtuvo el espectro medio de absorción en el intervalo de longitudes de onda 900-1700 nm.

### 3.3. Medida de la textura

La textura se midió mediante un analizador TA.XTplus (Stable Micro Systems®) (Figura 10a). El texturómetro es un equipo que mediante una célula de carga similar a la que posee una balanza, es capaz de adquirir simultáneamente datos de fuerza, distancia y

tiempo. El análisis de las curvas y los puntos críticos de las gráficas que da el equipo definirá el análisis de textura. Como cualquier balanza, tiene un límite de carga que afecta también a la sensibilidad del equipo. En nuestro caso la célula de carga no debe sobrepasar los 30 Kg de fuerza.

El aparato consta de un cuadro de mandos básico que permite el movimiento manual de la célula de carga así como los controles para la detención de emergencia del equipo. En la célula de carga se encuentra el orificio donde se acoplan a rosca los diferentes tipos de sondas (Figura 10b).

El calibrado del equipo se realiza colocando una pesa de 5 kg sobre el chasis, donde va colocada la célula de carga, después de haber retirado la sonda (Figura 10c). Finalmente, se colocará en primer lugar el portasondas y seguidamente la sonda deseada.

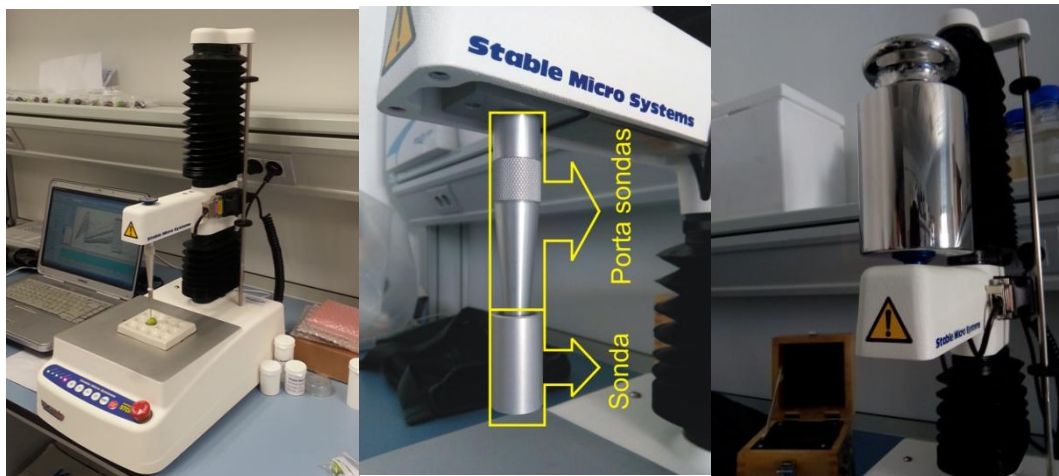


Figura 10. a) Analizador de textura. b) Sonda y portasonda fijadas a la célula de carga. c) Pesa de 5000 g para el calibrado del texturómetro

Para la adquisición de medidas se ha utilizado el programa *Exponent*. El equipo permite crear métodos con las condiciones operatorias fijas, llamados “proyectos” y cuyos archivos tienen extensión “.prj”. Además, para mayor facilidad, el equipo tiene preconfigurados muchos proyectos para alimentos, en los que indica qué sonda hay que utilizar y cómo hay que realizar las medidas. Una vez fijado el proyecto se ejecuta el ensayo.



### 3.3.1. Ensayo de punción

Para ejecutar el ensayo de punción se insertó en el equipo una sonda de aguja, tal como se muestra en la Figura 11.

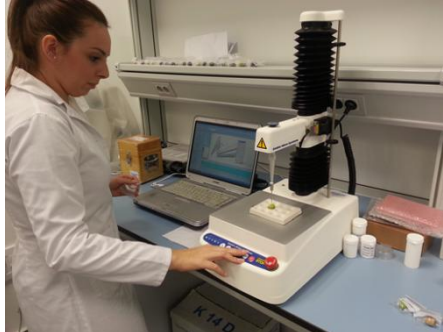


Figura 11. Ensayo de punción

Se realizó el ensayo a cada una de las 396 aceitunas individualmente obteniendo valores de diferentes parámetros (Figura 12):

- Fuerza de rotura
- Distancia de rotura
- Energía de rotura
- Módulo de elasticidad

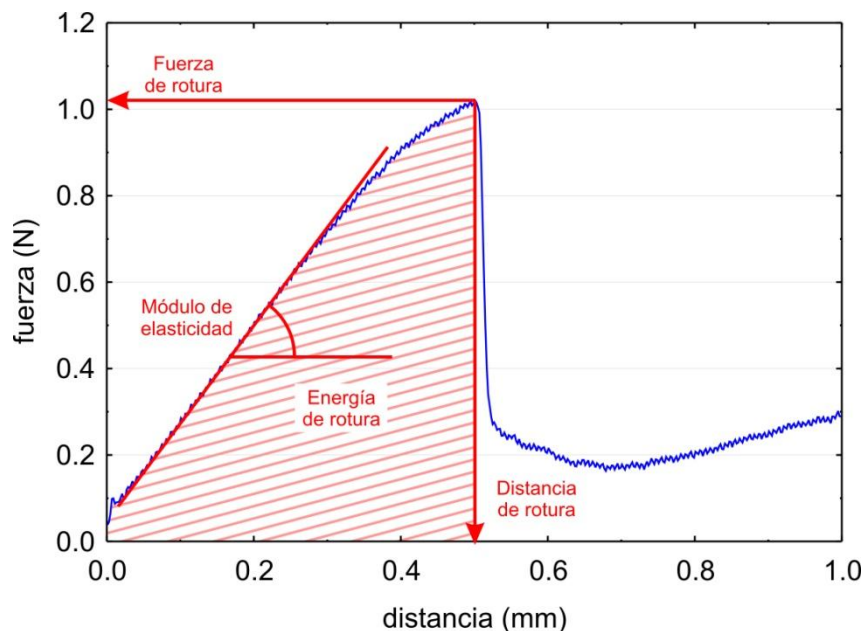


Figura 12. Curva Fuerza vs Distancia, en el ensayo de punción

La *fuerza de rotura* es la fuerza necesaria para perforar la piel de la aceituna, expresada en Newton (N). La *distancia de rotura* es el recorrido que hace la aguja hasta

perforar la piel, expresada en milímetros (mm). La *energía de rotura* es la fuerza que ha sido aplicada para recorrer la distancia de rotura, expresada en miliJulios (mJ). El *módulo de elasticidad* se puede definir como la fuerza que ha sido necesaria aplicar por cada milímetro recorrido por la aguja, expresado en Newton por milímetro (N/mm).

La velocidad de punción de la aguja se fijó en 1 mm/s y la duración del ensayo con cada aceituna se fijó en 3.5 segundos. Pasado ese tiempo la sonda dejó de punzar, lo que equivale a una penetración de la sonda en la muestra de 3.5 mm para evitar que la sonda penetrase hasta el hueso, cosa que podría haber causado daños en la aguja.

### 3.3.2. Ensayo de compresión

Este ensayo se realizó en último lugar ya que es un ensayo destructivo, y las muestras quedaron inutilizables. Se usó una sonda de compresión de 20 mm de diámetro y, tras varios ensayos de pruebas y puesta a punto del método, la compresión de la muestra fue fijada en un 30%. Se comprobó que era la mejor opción pues con una compresión mayor la aceituna quedaba demasiado deformada y la sonda llegaba al hueso.

Como resultado se obtuvieron valores del *módulo de elasticidad* (Figura 13), que relaciona la fuerza aplicada con la deformación de la muestra, expresado en Newton por milímetro (N/mm).

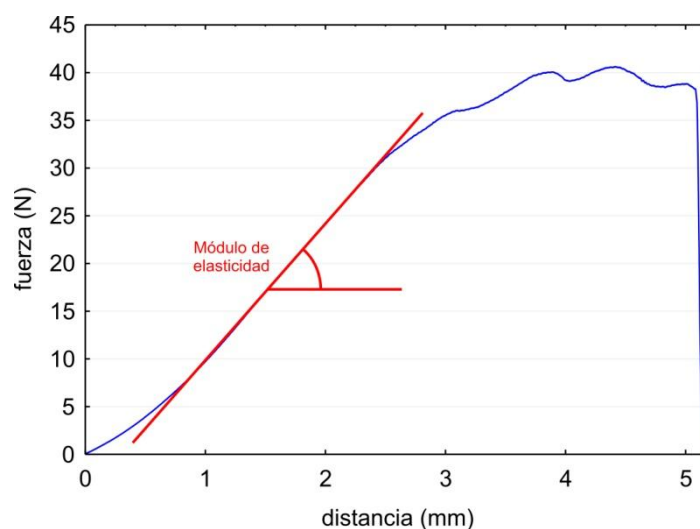


Figura 13. Curva Fuerza vs Distancia en el ensayo de compresión

## 3.4. Tratamiento de datos

### 3.4.1. Estadística descriptiva

La estadística descriptiva se refiere a la recolección, presentación, descripción, análisis e interpretación de una colección de datos, esencialmente consiste en resumir éstos con uno o dos elementos de información (medidas descriptivas) que caracterizan la totalidad de los mismos.

Los elementos utilizados para el análisis descriptivo de los datos en este trabajo son la *media aritmética* y *desviación estándar*, además de representaciones graficas para relacionar dos variables y gráficos de dispersión.

### 3.4.2. Análisis de la varianza (ANOVA)

ANOVA es una técnica utilizada con el fin de determinar si existen diferencias significativas entre las medias de dos grupos formados (Norman y cols., 1996). Es un analisis estadístico de modelos lineales, en los que la variable dependiente es numérica y las variables independientes, llamadas factores, son cualitativas. Los factores actuan como criterio de clasificación de los datos, formandose así los grupos que se desean compara (Martín, 2001).

El valor del nivel de significacion estadística representa la probabilidad de error que implica aceptar como válido un resultado representativo de la población.

### 3.4.3. Regresión múltiple

La regresión múltiple permite valorar la relación entre una variable dependiente y otras variables independientes. Su propósito es estudiar la dependencia de una variable cuantitativa respecto a un conjunto de variables predictivas o explicativas, valoradas también cuantitativamente. Permite la predicción de valores para la variable dependiente en cada muestra, a partir de la combinacion lineal de variables seleccionadas. El resultado de la aplicación de estas técnicas es una ecuación que representa la mejor recta de ajuste entre las variables estudiadas, de la siguiente forma general:

$$Y = B_1V_1 + B_2V_2 + \dots + B_nV_n + \varepsilon$$

Siendo:

$Y$ = valor predictivo de la variable dependiente

$B$ = coeficientes de regresión de cada una de las variables independientes

$V$ = variables independientes

$\varepsilon$ = constante que presenta la predicción cuando las variables independientes son cero.

Los análisis estadísticos multivariantes se realizaron mediante Matlab y Statistica 8.0 (Statsoft®).

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Evaluación visual

El estado de maduración se evaluó mediante el análisis visual de 100 frutos, asignando a cada uno un valor de 0 a 7 en una escala descriptiva definida en bibliografía, tal como se ha descrito en la Introducción de esta Memoria, piel verde intenso (0); piel verde amarillento (1); piel verde con manchas rojizas en menos de la mitad del fruto (2); piel rojiza o morada en más de la mitad del fruto (3); piel negra y pulpa blanca (4); piel negra y pulpa morada sin llegar a la mitad de la pulpa (5); piel negra y pulpa morada sin llegar al hueso (6); y piel negra y pulpa morada totalmente hasta el hueso (7).

En este caso, la aceitunas se clasificaron en los niveles de 0 a 4 de la escala descriptiva, dado que solo se consideró el aspecto externo del fruto, sin tener en cuenta el color de la pulpa (Figura 14).

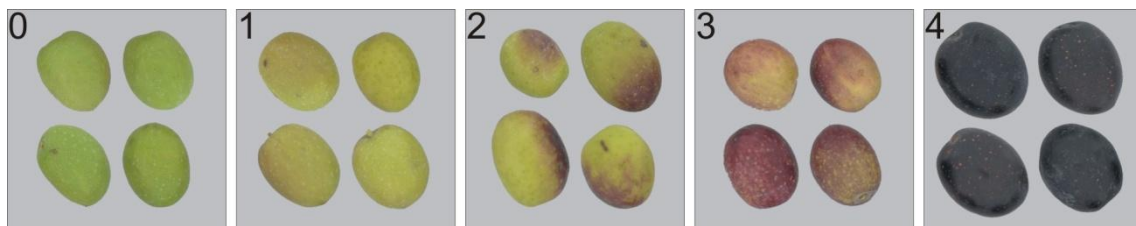


Figura 14. Imágenes de aceitunas clasificadas visualmente según su índice de madurez

### 4.2. Técnicas ópticas

#### 4.2.1. Análisis de la imagen y estudio colorimétrico

Se adquirieron imágenes digitales con el sistema DigiEye. Sobre esas imágenes, se utilizó un software desarrollado en el departamento que permite identificar cada una de las muestras que componen las imágenes y obtener de cada una sus características colorimétricas.

En la Figura 15 se observan los resultados de color de las aceitunas, categorizadas por índice de madurez. Como se puede observar, conforme avanza la maduración, se produce un descenso de los tres atributos (claridad, croma y tono), ya que la aceituna

va adquiriendo un color cada vez más oscuro. Estos resultados estuvieron en concordancia con los publicados en otros estudios (Gómez, 2011).

Se observó una alta dispersión de las muestras pertenecientes al índice 3, debido a que en este grupo coexistían aceitunas con la piel totalmente roja y aceitunas que todavía tenían manchas amarillentas cuyos colores medios difieren provocando esta dispersión.

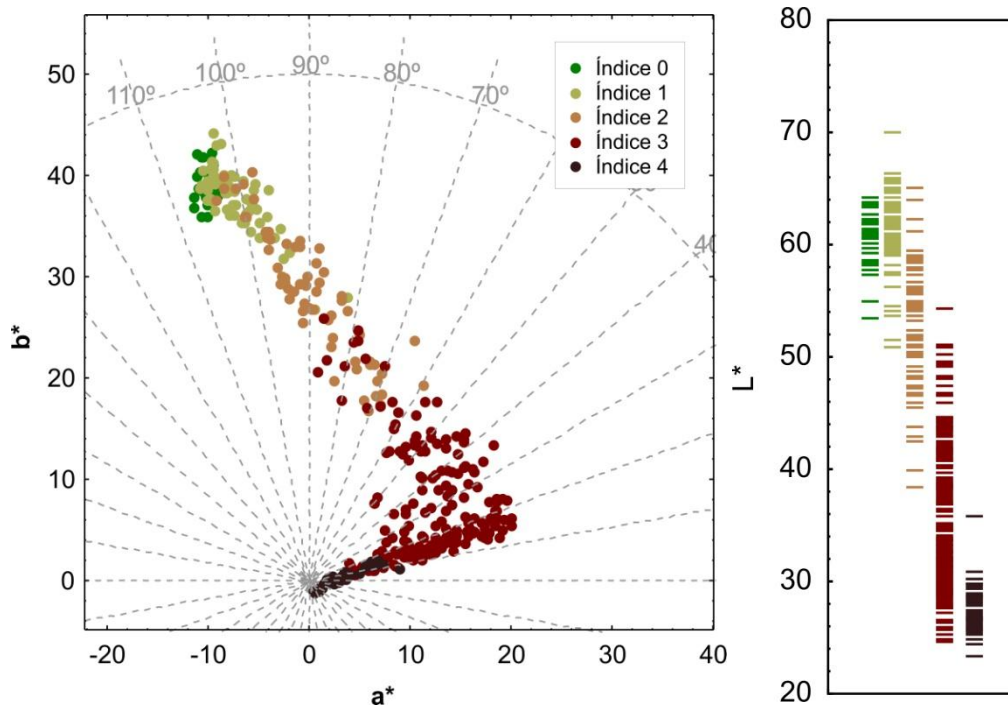


Figura 15. Color de las muestras de aceituna categorizadas por índice de madurez

Algo similar se observó al cuantificar la heterogeneidad cromática mediante la media de las diferencias de color de cada píxel respecto el color medio de la aceituna (MCDM). Este valor osciló entre 4 y 7 unidades CIELAB en aceitunas de índices 0 y 4, y se alcanzó un máximo de hasta 16 unidades CIELAB en aceitunas de índice 2. Como era esperable, los índices de maduración 0 y 4 contenían las aceitunas con color más homogéneo, las totalmente verdes y las totalmente negras, mientras que en el índice 2 las aceitunas poseen varios colores en la piel que van desde el amarillo verdoso hasta el rojizo.

La evolución de la claridad ( $L^*$ ) se muestra en la Figura 16. El valor máximo se observa cuando las muestras tienen un aspecto amarillento, y el descenso más acentuado se produce entre los índices dos y tres.

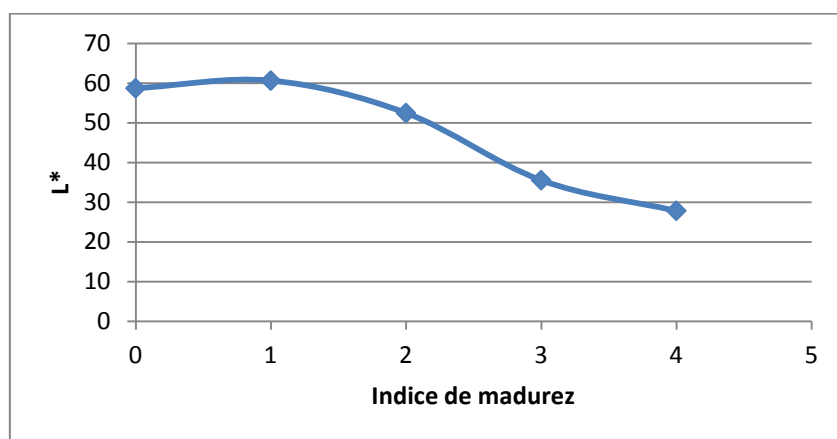


Figura 16. Evolución de la claridad en el proceso de maduración

Análogamente, en la Figura 17 se muestra la evolución del croma ( $C^*_{ab}$ ). Éste se mantiene constante en los estados 0 y 1, y sufre a continuación un descenso uniforme hasta el final de la maduración, donde todas las muestras se encuentran junto al origen de coordenadas (cromas cercanos a cero) en el diagrama  $a^*b^*$ .

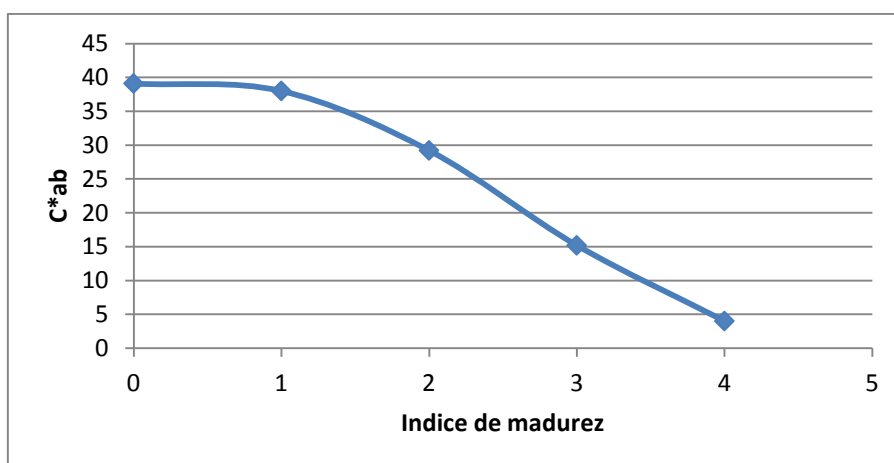


Figura 17. Evolución del croma ( $C^*_{ab}$ ) en el proceso de maduración

En cuanto al tono ( $h_{ab}$ ) (Figura 18), experimentó un descenso lento en los primeros estadios de maduración desde valores de  $100^\circ$  hasta los  $80^\circ$ . A partir del índice 2, la disminución se hace más pronunciada hasta alcanzar tonos rojizos en el estadio 4. No obstante, este cambio cualitativo del color al final de la maduración no se observa con

claridad debido a los bajos valores de croma y claridad que tienen las muestras en estos estados.

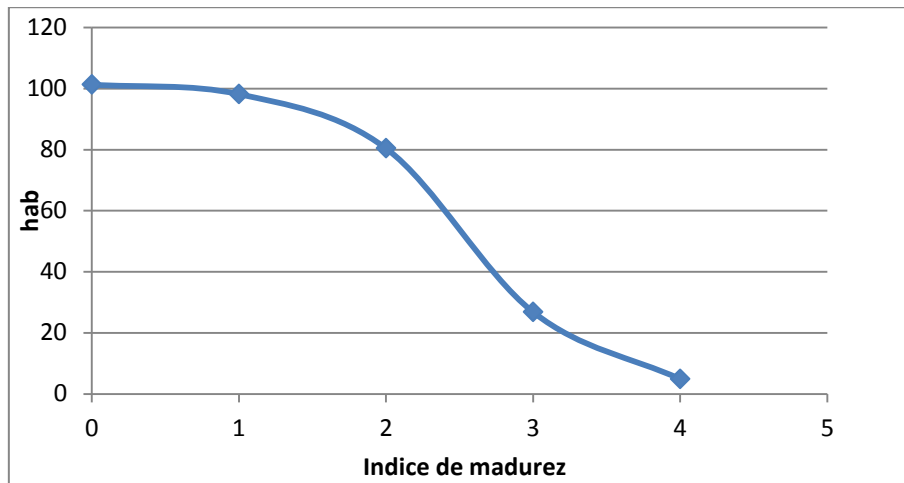


Figura 18. Evolución del tono ( $h_{ab}$ ) en el proceso de maduración

Se observa una disminución de los tres atributos del color (claridad, tono y croma) conforme avanza la maduración. Esto se debe al viraje de color de la piel de la aceituna, que pasa de ser verde brillante a tener un color más negruzco atravesando varios estadios en los que presentan distintas combinaciones entre colores verdosos, amarillentos y rojizos.

El valor de MCDM se ve afectado por todas las variables colorimétricas y da información sobre la heterogeneidad del color en la muestra. En la Figura 19 observamos que la heterogeneidad cromática tiene su máximo en el índice de madurez 3, donde se encuentran mayor cantidad de muestras heterogéneas según el color de su piel. Anteriormente, se pudo evaluar de manera descriptiva la heterogeneidad cromática mediante la evaluación de la dispersión de los puntos en el diagrama  $a^*b^*$ , sin embargo, el uso del parámetro MCDM permite cuantificarla y evaluarla de una manera objetiva.



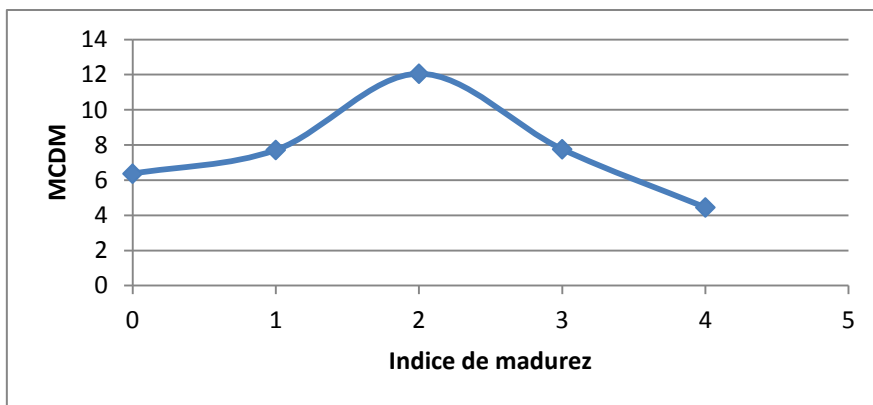


Figura 19. Heterogeneidad del color en el proceso de maduración

#### 4.2.2. Técnicas hiperespectrales

En la Figura 20 se muestra los espectros de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIR) de las muestras en función de su índice de madurez. Aunque el perfil espectral en el infrarrojo parece muy similar a lo largo de todo el espectro para todos los índices de maduración, se observa una pequeña disminución de la reflectancia conforme avanza la maduración. Además, la información latente que contiene ha resultado ser muy útil cuando se han aplicado técnicas de regresión multivariante para la obtención de propiedades físicas a partir de esta información espectral.

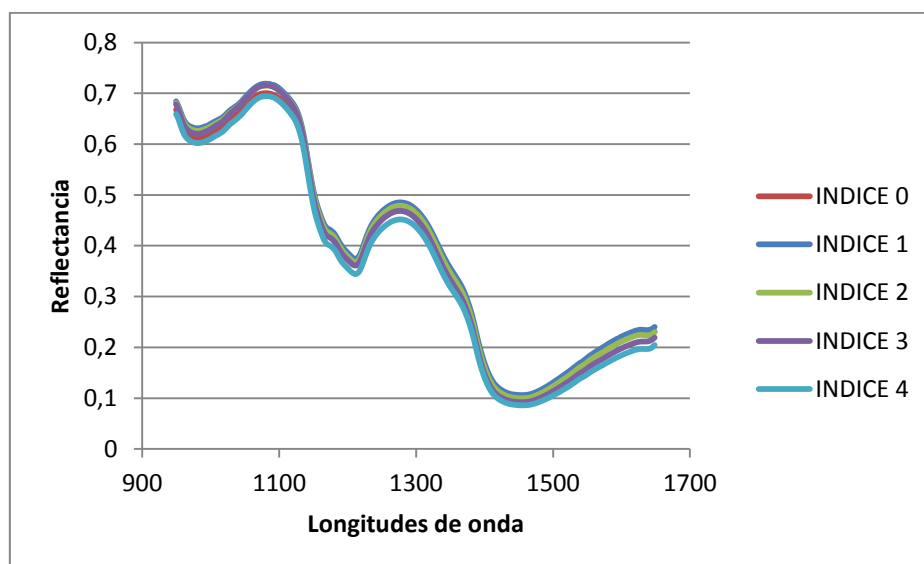


Figura 20. Espectros medios de absorción según el índice de madurez

### 4.3. Análisis de la textura

Los ensayos de textura permitieron evaluar la firmeza de la piel del fruto así como la resistencia que éste ofrece al ser comprimido.

En el ensayo de punción se observó que, conforme avanza la maduración, la piel de la aceituna opone una menor resistencia a ser deformada y perforada. La pérdida de consistencia que sufría la piel se manifestó en que la aguja debía recorrer una mayor distancia para conseguir esa penetración en la muestra. En cuanto al ensayo de compresión, este midió la relación entre la fuerza aplicada y la deformación de la muestra, siendo el resultado más alto cuando más dura es la muestra, es decir, cuando se encuentra en estados de maduración más bajos.

En la Tabla 1 se muestran los resultados de ambos ensayos, tanto punción como compresión, según el índice de maduración en el que se encontraban las muestras.

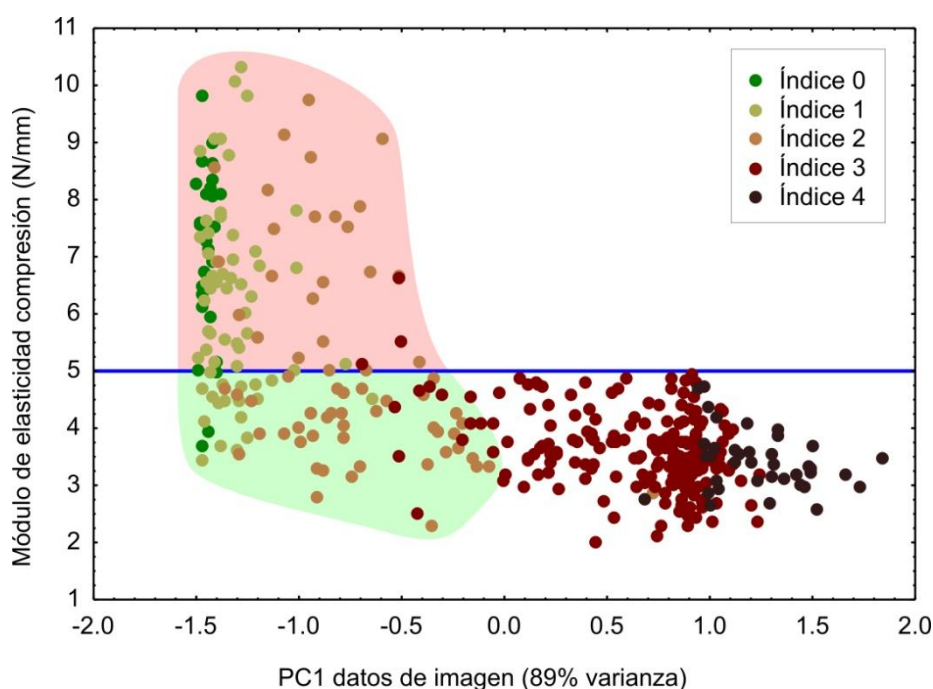
*Tabla 1. Resultados de ensayos texturométricos en aceitunas según índice de madurez (Entre columnas, superíndices con diferente letra indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ )).*

Ensayo	Magnitud	índice 0	índice 1	índice 2	índice 3	índice 4
Punción	Fuerza de rotura (N)	0.97±0.09 <sup>a</sup>	0.96±0.12 <sup>a</sup>	0.88±0.14 <sup>b</sup>	0.71±0.10 <sup>c</sup>	0.67±0.07 <sup>c</sup>
Punción	Módulo de elasticidad (N/mm)	1.70±0.34 <sup>a</sup>	1.70±0.37 <sup>a</sup>	1.48±0.46 <sup>b</sup>	1.03±0.25 <sup>c</sup>	0.91±0.18 <sup>c</sup>
Punción	Energía de rotura (mJ)	0.31±0.05 <sup>a</sup>	0.31±0.05 <sup>a</sup>	0.29±0.06 <sup>ab</sup>	0.27±0.06 <sup>b</sup>	0.26±0.06 <sup>b</sup> <sub>c</sub>
Punción	Distancia de rotura (mm)	0.58±0.10 <sup>a</sup>	0.57±0.09 <sup>a</sup>	0.60±0.10 <sup>a</sup>	0.66±0.11 <sup>b</sup>	0.69±0.13 <sup>b</sup>
Compresión	Módulo de elasticidad (N/mm)	7.02±1.48 <sup>a</sup>	6.12±1.65 <sup>b</sup>	5.06±1.79 <sup>c</sup>	3.63±0.68 <sup>d</sup>	3.42±0.52 <sup>d</sup>

Fue en el ensayo por compresión donde se encontraron diferencias más evidentes entre aceitunas de diferentes estados de maduración. Como es este fenómeno físico el que sufre la aceituna en su molienda, se consideró para los estudios estadísticos, refiriéndose al ensayo por compresión cuando se menciona simplemente el parámetro “textura”.

#### 4.4. Estudio estadístico multivariante

Para poder evaluar la relación entre la textura y la apariencia de manera integral, se aplicó un análisis de componentes principales (PCA) a todos los datos obtenidos por análisis de imagen. En la Figura 21 se muestra la relación entre la textura y el primer componente principal obtenido, que explicó el 89% de la varianza. Todas las muestras incluidas en los índices de maduración 3 y 4 tuvieron un módulo de elasticidad por debajo de 5 N/mm, valor por debajo del cual los frutos podían ser deformados ejerciendo poca presión entre los dedos. Sin embargo, las muestras pertenecientes a los índices 0-2 tuvieron valores de textura con mucha dispersión, de tal modo que, en aceitunas que aparentemente son iguales, se encuentran unas que podrían ser molidas y otras que no.



*Figura 21. Diagrama de dispersión de las puntuaciones del primer componente principal de los datos obtenidos por análisis de imagen frente el módulo de elasticidad*

Para averiguar si existía una relación numérica directa entre textura y apariencia, se diseñó un estudio estadístico basado en una regresión por mínimos cuadrados parciales (PLSR) en la que el módulo de elasticidad por compresión fue la variable dependiente y los sets de datos obtenidos por técnicas de imagen se tomaron como variables independientes.

La Tabla 2 resume los resultados de cada regresión múltiple. Cuando únicamente se consideran las coordenadas colorimétricas los resultados no fueron buenos ( $R^2 \approx 0.5$ ). Al añadir parámetros de apariencia como el calibre del fruto y la heterogeneidad cromática, los modelos mejoraron levemente, pero aún estaban lejos de ser útiles con fines predictivos. Esto en parte era predecible, pues desde un principio se observó que había aceitunas con la misma apariencia y con textura muy diferente. Tanto el coeficiente de determinación como el error medio mejoraron cuando se utilizó el espectro NIR con fines predictivos ( $R^2 > 0.7$ ). Como último modelo predictivo se utilizaron conjuntamente los dos sets de datos (NIR y el obtenido por análisis de imagen en el visible) y se observó un aumento del 17 % en el coeficiente de determinación  $R^2$  y una reducción del error medio del 26 %.

*Tabla 2. Coeficiente de determinación  $R^2$  entre los valores de textura medidos y los predichos mediante el modelo de regresión, y valor de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) cometido en cada predicción.*

Set de datos	$R^2$	RMSE (N/mm)
Color (CIELAB)	0.53	0.8377
Color (CIELAB) y apariencia	0.59	0.8255
Espectro NIR	0.76	0.7178
Espectro NIR, color y apariencia	0.89	0.5278

## 5. CONCLUSIONES

Del estudio realizado para la elaboración de este Trabajo Fin de Grado se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. El color y la textura de las aceitunas están estrechamente relacionados con su estado de maduración, y es posible determinar instrumentalmente esta relación.
2. La colorimetría triestímulo es una técnica adecuada para cuantificar modificaciones externas de los frutos relacionadas con el color, aunque, por sí sola no es capaz de detectar cambios que no se manifiestan en la apariencia de las muestras.
3. Dado que durante la maduración ocurren modificaciones de compuestos relacionados con la textura, y éstos se manifiestan en la región infrarroja del espectro, las técnicas hiperespectrales permiten evaluar con mayor precisión las modificaciones en las propiedades texturométricas producidas durante esta etapa gracias a su mayor penetrabilidad.
4. Es posible correlacionar el estado de maduración de las aceitunas con sus propiedades de visuales y de textura. Los modelos de predicción mejoran de manera sustancial cuando se incluyen las variables colorimétricas y de apariencia a la información espectral infrarroja.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Agencia del Aceite de Oliva del Ministerio de Medio Ambiente Rural y Marino (MARM). Variedades de Aceituna [en línea]. [Consultado en Julio de 2016]. Disponible en: <http://www.esenciadeolivo.es/aceite-de-oliva/tipos-de-aceite-de-oliva/variedades-de-aceituna/>
- AGRUM Gestión y Agroingeniería. La maduración de la aceituna para la elaboración de aceite [en línea]. [Consultado en Julio de 2016]. Disponible en: <http://www.agrumingenieria.es/index.php/noticias/21-la-maduracion-de-la-aceituna-para-la-elaboracion-de-aceite>
- Asociación Española de Exportadores e Industriales de Aceituna de Mesa (ASEMESA). La Aceituna: variedades, tipos y presentaciones [en línea]. [Consultado en Julio de 2016]. Disponible en: <http://www.asesesa.es/content/la-aceituna-variedad-tipo-y-presentacion>
- Aznar Casanova JA. Psicología de la percepción visual. Universidad de Barcelona [en línea]. [Consultado en Junio de 2016]. Disponible en: <http://www.ub.edu/pa1/node/53>
- Bavay C, Symoneaux R, Maître I, Kuznetsova A, Brockhoff PB, Mehinagic E. Importance of fruit variability in the assessment of apple quality by sensory evaluation. *Postharvest Biol Tec.* 2013; 77: 67–74.
- Bourne MC. *Food texture and viscosity: concept and measurement.* San Diego: Academic Press; 1982.
- Bourne MC. Texture profile analysis. *Food Technol.* 1978; 28: 467-473.
- Castro Montero E, de Hombre Morgado RA. *Parámetros mecánicos y textura de los alimentos.* Instituto de Investigaciones para la Industria Alimentaria, La Habana (Cuba), 2007.
- Chen L, Opara UL. Approaches to analysis and modeling texture in fresh and processed foods – a review. *J Food Eng.* 2013; 119: 497–507.
- CIE. Commission Internationale de l'Eclairage. *Standard Illuminants for Colorimetry.* ISO 11664- 2:2007. 2007.

- Consejo Superior de Investigaciones Científicas. ICTAN: instituto de ciencia y tecnología de alimentos y nutrición [en línea]. [Consultado en Junio de 2016]. Disponible en: <http://www.ictan.csic.es/servicios/servicios-analiticos/propiedades-fisicas/>
- Frías Ruiz L, García-Ortiz Rodríguez A, Hermoso Fernández M, Jiménez Márquez A, Llaveró del Pozo MP, Morales Bernardino J, Ruano Ayuso MT, Ojeda Uceda M, *Analista de laboratorio de almazara*. Sevilla: Junta de Andalucía. Dirección General de Investigación y Formación Agraria, (1999).
- Giacosa S, Zeppa G, Baiano A, Torchio F, Rio Segade S, Gerbi V, Rolle L. Assessment of sensory firmness and crunchiness of tablegrapes by acoustic and mechanical properties. *Aust J Grape Wine Res*. 2015; 21: 213-225.
- Gil Vicente M. Pigmentos bioactivos y propiedades ópticas de la frambuesa. Trabajo fin de máster. Universidad de Sevilla, Sevilla, 2014.
- Gómez-Robledo L. “Aportaciones colorimétricas a la caracterización y mejora de aceites de oliva virgen”, Tesis doctoral, Universidad de Granada, Granada, (2011).
- Gowen AA, O'Donnell CP, Cullen PJ, Downey G, Frias JM. Hyperspectral imaging - an emerging process analytical tool for food quality and safety control. *Trends in Food Science & Technology*. 2007; 18(12):590-8.
- Koehler IV FW, Lee E, Kidder LH, Lewis NE. Near infrared spectroscopy: the practical chemical imaging solution. *Spectroscopy Europe*. 2002; 14: 12-9.
- Leiva-Valenzuela GA, Lu R, Aguilera JM. Prediction of firmness and soluble solid content of blueberries using hyperspectral reflectance imaging. *J Food Eng*. 2015; 115: 91-98.
- León K, Mery D, Pedreschi F, León J. Color measurement in L\*a\*b\* units from RGB digital images. *Food Research International*. 2006; 39(10): 1084-91.
- Luo MR, Cui GH, Li C, inventors; British Patent entitled Apparatus and method for measuring colour (DigiEye System), Derby University Enterprises Limited.0124683.4. 2001 Oct 4.
- Martín Q. Curso de tratamiento de datos estadísticos con SPSS. Salamanca: Hespérides; 2001.

- Norman GR, De Burgh Norman JE, Streiner DL. Bioestadística. Harcourt; 1996.
- Pasquini C. Near infrared spectroscopy: Fundamentals, practical aspects and analytical applications. Journal of the Brazilian Chemical Society. 2003; 14(2):198-219.
- Rodríguez Pulido FJ, Hernández Hierro JM, Nogales Bueno J, Gordillo B, González-Miret ML, Heredia FJ. A novel method for evaluating flavanols in grape seeds by near infrared hyperspectral imaging. Tal. 2014; 122: 145-150.
- Rodríguez Sandoval E, Fernández Quintero A, Ayala Aponte A. Reología y textura de masas: aplicaciones en trigo y maíz. Ingeniería e Investigación. 2005; 57: 72-78.
- Uceda M, Aguilera MP, Jiménez A, Beltrán G. Variedades de olivo y aceituna. Tipos de Aceite [en línea]. [Consultado en Julio de 2016]. Disponible en: [http://www.economiaandaluza.es/sites/default/files/capitulo%204\\_1.pdf](http://www.economiaandaluza.es/sites/default/files/capitulo%204_1.pdf)