



**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN NO  
DESTRUCTIVO ENFOCADO A LA CLASIFICACIÓN DE  
PEPINO EN BASE A SUS PROPIEDADES ÓPTICAS Y  
MECÁNICAS**

**MASTER EN CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS ALIMENTOS**

Salvador López Villalobos

José Manuel Prats Montalbán

Pau Talens Oliag

E.T.S.I.A.M

# DESARROLLO DE UN SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN NO DESTRUCTIVO ENFOCADO A LA CLASIFICACIÓN DE PEPINO EN BASE A SUS PROPIEDADES ÓPTICAS Y MECÁNICAS.

López Villalobos, S.; Prats, J.M<sup>1</sup>.; Talens, Pau<sup>2</sup>.

## RESUMEN

El objetivo del trabajo es el desarrollo de un sistema de automatización no destructivo enfocado a la clasificación de pepino en base a sus propiedades ópticas y mecánicas. Para su estudio, los pepinos se almacenaron en condiciones de temperatura y humedad controladas y se procedió al control del peso, cambios de color y textura provocados por el tiempo de almacenamiento. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que durante el proceso de maduración del pepino, se dan una serie de cambios fisiológicos y bioquímicos que repercuten directamente en la variación de peso del fruto en función de los días de almacenamiento. Mientras que las propiedades ópticas estudiadas no permiten detectar variaciones externas aparentes en el producto hasta 33 días de almacenamiento, las propiedades mecánicas evaluadas a través del ensayo de punción sí que permiten registrar la evolución temporal de los cambios de textura que experimenta el pepino. El análisis mediante el modelo estadístico multivariante (N-PLS) de los datos de aceleración dinámica y estática obtenidos por los acelerómetros de una garra robótica, junto con los datos del texturómetro, reflejan una buena correlación entre ambos. De esta forma, se pone de manifiesto la idoneidad de la aplicación del sistema de garras robóticas para la clasificación de pepino en la industria agroalimentaria.

**PALABRAS CLAVE:** pepino, técnicas no destructivas, garras robóticas, propiedades ópticas, propiedades mecánicas.

## RESUM

L'objectiu del treball és el desenvolupament d'un sistema d'automatització no destructiu, enfocat a la classificació del cogombre basant-se en les seues propietats òptiques i mecàniques. Per tal d'estudiar-les, els cogombres s'emmagatzemaren en unes condicions de temperatura i humetat controlades, i es procedí al control del pes, als canvis de color i als de textura, provocats pel seu emmagatzematge al llarg del temps. Els resultats obtinguts posen de manifest que durant el procés de maduració del cogombre, s'adonen una sèrie de canvis fisiològics i bioquímics que repercuteixen directament en la variació de pes del fruit en funció dels dies d'emmagatzematge. Mentre que les propietats òptiques estudiades no

---

<sup>1</sup>[jopraron@upv.es](mailto:jopraron@upv.es). Departamento de Estadística e Investigación Operativa. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n, 46022 Valencia.

<sup>2</sup>[pautalens@tal.upv.es](mailto:pautalens@tal.upv.es). Departamento de Tecnología de Alimentos. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n, 46022 Valencia.

permeten detectar variacions externes aparents en el producte fins a 33 dies d'emmagatzematge, les propietats mecàniques avaluades a través de l'assaig de punció sí permeten registrar l'evolució temporal dels canvis de textura que pateix el cogombre. L'anàlisi mitjançant el model estadístic multivariant (N-PLS) de les dades d'acceleració dinàmica i estàtica obtingudes pels acceleròmetres de l'urpa robòtica junt amb les dades del texturòmetre, mostren una bona correlació entre ambdós. D'aquesta manera, es posa de manifest la idoneïtat de l'aplicació del sistema d'urpes robòtiques per a la classificació de cogombre a la indústria agroalimentària.

**PARAULES CLAU:** cogombre, tècniques no destructives, urpes robòtiques, propietats òptiques, propietats mecàniques.

### **ABSTRACT**

The aim of the work is the development of a non-destructive automated system focused on cucumber classification based in their optical and mechanical properties. For the study, cucumbers were stored under controlled temperature and relative humidity and proceeded to control the weight, changes of color and texture across the time of storage. Results show that during the ripening of cucumber, there are physiological and biochemical changes directly affected by weight change during the storage. While the optical properties studied do not allowed to detect external variations at the product until 33 days of storage, the mechanical properties evaluated through a puncture test permit to record temporal evolution of the textural changes in the fruit. Analysis using statistical N-way model (N-PLS) with dynamic and static acceleration data obtained by robotic grippers accelerometers, and texturometre data, show good correlation between them. Results evince the suitability of a gripper system for cucumber classification and the application in food industry.

**KEYWORDS:** cucumber, non-destructive techniques, robot grippers, optical properties, mechanical properties.

## INTRODUCCIÓN

El consumo de pepino en España ha ido aumentando en la última década. La superficie dedicada al cultivo de esta hortaliza ha pasado de 6.300 hectáreas del año 1999 hasta 8.000 hectáreas a principios de 2010 (MAGRAMA, 2010). El aumento de la dedicación de la superficie de cultivo del pepino, ha ido evolucionando paralelamente a un aumento de la producción del mismo. En 1999 se producían en torno a 403,8 miles de toneladas, mientras que actualmente son más de 563,6 miles de toneladas. Debido al aumento del rendimiento del cultivo y al aumento de la producción, actualmente el valor monetario total percibido es de 238.895.627,4 euros, un 32,31 % más que en el año 1999. Tan solo un 1% de la producción total española va dirigido a alimentación animal, siendo el 99% restante dedicado al consumo humano. Dentro de la producción nacional de hortalizas, el pepino ocupa el 4% del total de producción anual (MAGRAMA, 2010), encontrándose entre las quince hortalizas que más se consumen en España.

La calidad dentro del sector de las frutas y hortalizas ha de ser definida bajo el propio concepto de calidad, es decir, partiendo de su significado. Existen múltiples definiciones de calidad a lo largo de la bibliografía; una de ellas es aquella que hace referencia al conjunto de propiedades y características de un producto o servicio que le confiere una aptitud para satisfacer unas necesidades expresadas o implícitas (Juran et al., 2005). Según la Organización Internacional de Normalización (ISO) la calidad es la capacidad de un producto o servicio de satisfacer las necesidades y expectativas de los clientes a través de sus propiedades o características inherentes (ISO 9000:2000). Por otra parte, el alimento puede ser descrito mediante una serie de parámetros o variables físicas, químicas, microbiológicas, que se pueden transformar en atributos de calidad por la percepción y preferencias de un usuario (Prieto et al., 2008). Entre los diferentes tipos de calidad en alimentos se encuentran la calidad higiénica y sanitaria, la bromatológica (propiedades nutritivas y composicionales), la calidad sensorial, la tecnológica y la calidad ética o emocional. La percepción de calidad en la industria de frutas y hortalizas ha estado circunscrita durante muchos años a atributos externos como color y apariencia, relegando a otros atributos muy importantes como la percepción del sabor, textura, y defectos internos a ser evaluados durante el consumo. Actualmente, el sector hortofrutícola ha comenzado a considerar los atributos internos de cada producto junto a los externos en todas las etapas de producción como un criterio integrado del control de calidad, tratando de dar respuesta a las altas exigencias de un mercado altamente competitivo como es el de las frutas y hortalizas frescas (Bruhn, 2007). El color es un criterio externo muy importante a la hora de la elección del producto por parte del consumidor. Dicho atributo puede aportar información acerca del grado de madurez, del contenido en determinados pigmentos, del estado higiénico-sanitario del alimento e incluso puede influir en la percepción de otras características del alimento como el gusto (Francis, 1995; Piqueras-Fiszman et al., 2012). La textura, es un factor de calidad interno de los productos hortofrutícolas que, al igual que el color, puede ser identificativo

del estado de madurez de un alimento. La industria hortofrutícola requiere de sistemas efectivos de control y aseguramiento de la calidad demandada por el consumidor. Estos sistemas tradicionalmente han utilizado métodos destructivos basados en análisis fisicoquímicos y algunos métodos no destructivos sensoriales basados en análisis subjetivos empleando escalas hedónicas. La industria no puede basarse solamente en una selección por características externas, a pesar que la preferencia del consumidor se fundamente en ellas. La fidelización, condición superior de consumo, se consigue a través de la calidad de los atributos internos de frutas y hortalizas (Harker et al., 2008). Los atributos internos se determinan generalmente con métodos analíticos destructivos como la refractometría, el uso de penetrómetros y texturómetros en muestras representativas por lote, pero su efectividad puede verse limitada por la alta variabilidad en la calidad interna, entre piezas de frutas y hortalizas de una misma especie o variedad. Los métodos físicos, químicos y biológicos están en renovación continua y es aceptado el hecho de que los laboratorios son capaces de determinar cualquier constituyente de un alimento. Pero también está reconocido y aceptado que para llevar a cabo tales determinaciones se necesitan equipamientos sofisticados, un importante aporte monetario para subsanar los costes por muestra analizada y un elevado tiempo de análisis. Todo ello plantea la necesidad de disponer de métodos rápidos, precisos y económicos para la determinación analítica de las características físicas, químicas y sensoriales de los productos hortofrutícolas que además pueden ser automatizados. Hoy en día la industria está dedicando numerosos esfuerzos y recursos para llevar a cabo determinaciones no destructivas de los diferentes parámetros de calidad, evitando dañar ni rebajar la calidad del producto, de forma que este pueda ser posteriormente vendido. Existen una amplia variedad de métodos no destructivos (Espectroscopía VIS/NIRS, fluorescencia, rayos, X, etc.), que están siendo evaluados y utilizados por la industria para medir atributos de calidad de frutas y hortalizas intactas (Nicola et al., 2007). Una forma de automatizar los procesos de inspección es empleando sistemas inteligentes, como visión artificial (Blasco et al., 2009) o manipuladores basados en sensores inteligentes (Blanes et al., 2011). La visión artificial emula, e incluso supera, las habilidades sensoriales ópticas de los humanos en muchos sentidos, por lo que se considera de gran importancia para mejorar la capacidad productiva de la industria hortofrutícola (Sun, 2007). Por otra parte, el empleo de robótica para manipulaciones complejas y repetitivas es una tecnología con gran potencial en la automatización de los procesos post-cosecha hortofrutícolas, mejorando y asegurando la calidad y seguridad alimentaria al evitar la ausencia de contacto (Blanes et al., 2011).

El objetivo de esta tesina es la puesta a punto de un sistema automático no destructivo basado en manipulación robotizada inteligente enfocado a la clasificación de pepino en base a sus propiedades ópticas y mecánicas, con la finalidad de aportar a la industria hortofrutícola una alternativa de análisis en línea no-destructiva, que permita la clasificación de pepinos en diferentes categorías.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Metodología y diseño experimental**

Para la realización del presente estudio, se compraron ochenta pepinos (sp. *Cucumis sativus*) de la variedad pepino español "Almería" pertenecientes al mismo lote comercial, siguiendo un criterio de elección en base a la longitud, forma y grosor. Entre las especificaciones requeridas se exigió que tuvieran una longitud mayor de 12 cm, una forma rectilínea y un grosor mayor de 4 cm, debido a las limitaciones que presentaba el sistema de garras robóticas. Se realizó un lavado previo con una disolución jabonosa preparada con dos gotas de detergente lavavajillas por cada litro de agua, con el fin de eliminar de la superficie los restos de polvo, tierra, hojas y suciedad. Posteriormente se procedió a su secado mediante papel desechable hasta eliminar totalmente el agua de la superficie.

Cada pepino fue identificado y se le realizó un control de peso. Los pepinos se repartieron en trece lotes de seis unidades cada uno de ellos. Uno de los lotes fue dedicado exclusivamente para las determinaciones de color durante la duración del experimental y los otros doce lotes restantes para la determinación de las propiedades mecánicas. A cada lote de seis pepinos se le asignó un código alfabético de la A a la L, que establecía el orden de análisis, de forma que el lote A fue el primero en analizarse y el lote L el último. Dentro de cada lote, cada fruto fue identificado con un número del 1 al 6, quedando finalmente clasificados con un código alfanumérico de dos valores, la letra perteneciente al lote y el número designado para cada pepino. Todos los pepinos se almacenaron en un refrigerador Liebherr LKPv 1420 Medi-Line a una temperatura de 9 °C y a una humedad relativa del 95 % (Sánchez, 2004). El tiempo de almacenamiento de cada lote varió en función del orden de análisis. Los pepinos fueron almacenados durante 40 días y se realizó un análisis cada 3-4 días.

### **Determinaciones experimentales**

#### **CONTROL DE PESO**

La determinación del peso de cada lote se realizó tras 3 horas de exposición a temperatura ambiente del pepino refrigerado. Para las medidas se utilizó una balanza modelo CB Complet M-620CBC (COBOS) con una precisión de  $\pm 0,001$  g.

#### **Determinaciones ópticas**

Para la determinación de las propiedades ópticas de cada uno de los pepinos, se definieron tres zonas longitudinales de estudio en cada uno de ellos. Cada zona estuvo acotada por cada uno de los extremos de la hortaliza y fueron marcadas con un rotulador permanente resistente al agua. Dentro de cada una de ellas se designaron 3 sub-zonas repartidas a lo largo de su eje longitudinal de forma equitativa, quedando una sub-zona en el

extremo izquierdo, otra en la parte central y finalmente una en el extremo derecho. Cada uno de los pepinos, por tanto, tenía designadas 3 zonas longitudinales, con tres sub-zonas cada una de ellas, en total nueve puntos de medida. El color del pepino se determinó usando un espectrocolorímetro MINOLTA modelo CM-700d (Minolta CO. Tokyo, Japan). Se trabajó bajo las condiciones de iluminante D65 y observador 10°. La descripción física del color se realizó bajo el espectro de reflexión, puesto que la piel del pepino se comporta como un material opaco brillante. Se utilizó el espacio de color CIEL\*a\*b\*, donde la coordenada L\* es la luminosidad, la a\* se corresponde con los valores rojo-vede para valores positivos y negativos respectivamente, y la coordenada b\* con los componentes amarillo para valores positivos y azul para los negativos. Se realizaron nueve medidas en cada pepino del lote de color, siguiendo el patrón de trabajo establecido. Los espectros de reflexión obtenidos (360-740 nm) se utilizaron para obtener las coordenadas triestímulo del espacio XYZ que sirvieron para calcular los valores de las coordenadas L\*, a\* y b\*. A partir de dichas coordenadas se determinaron el tono (ecuación 1) y croma (ecuación 2). El tiempo de almacenamiento se evaluó a través de las diferencias de color total (ecuación 3) con respecto al pepino a tiempo cero.

$$h^*_{ab} = \arctg \frac{b^*}{a^*} \quad (1)$$

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

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 + (\Delta L^*)^2} \quad (3)$$

## Determinación de las propiedades mecánicas

### TEXTURÓMETRO

Las propiedades mecánicas de los pepinos se determinaron utilizando una prensa universal de ensayos mecánicos (Stable Micro Systems, TA.XT plus, Haslemere, England). A cada pepino se le realizaron 3 ensayos de textura en las zonas donde la garra robotizada realizaba el análisis, con el objetivo de poder comparar posteriormente los resultados obtenidos por ambos métodos. Las muestras se depositaron en la pletina del equipo para realizar el ensayo de punción con una sonda cilíndrica de 6 mm/10 mm. La velocidad de pre-ensayo y ensayo se fijó en 1mm/s y la deformación en la muestra del 75%. Las curvas fuerza-distancia obtenidas en el ensayo se transformaron en curvas de fuerza-deformación (Dobraszczyk y Vincent, 1999). Los parámetros analizados en el ensayo de punción fueron: la fuerza de fractura ( $F_F$ ) expresada en Newtons, la deformación relativa de fractura ( $\epsilon_F$ ) adimensional y la pendiente del tramo inicial de la curva (E) expresada en Newtons.

## GARRAS ROBÓTICAS

A cada pepino se le realizó un análisis de sus propiedades mecánicas mediante un sistema de garras robóticas diseñado expresamente para la manipulación de estos frutos. El mecanismo de funcionamiento del equipo está basado en la señal de aceleración que se registra en el alimento durante el contacto a alta velocidad que proporciona la garra robótica. Dicha señal es característica de las propiedades del producto a analizar, por tanto se puede afirmar, que la aceleración registrada durante la manipulación a alta velocidad del pepino es distinta en función de la dureza del mismo. Si el alimento es blando, la desaceleración que experimenta la señal en el producto y su energía, es menos acusada, por el contrario, si el alimento es duro estos parámetros se ven fuertemente afectados. Cada uno de los pepinos fue sometido al agarre del sistema robótico para procesos de *pick&place*. El equipo fue accionado por medio de un cilindro neumático que cerró las garras dactilares alrededor del producto, ejerciendo el contacto y la presión suficiente para su manipulación. Dicho cilindro neumático, fue controlado con una servo-válvula SMC SY3120 que controló la apertura y cierre de las garras mediante una salida cableada al robot. La velocidad de la garra fue controlada por medio de dos estranguladores regulables de caudal situados en las cámaras del cilindro neumático. La fuerza de la garra estuvo determinada por la presión de alimentación de dicho cilindro. Cada dedo de la garra disponía de un acelerómetro biaxial, ADXL 278 de 50g, dispuestos en la parte externa de la estructura a la altura del eje de contacto con el producto. Cada uno de ellos registró las aceleraciones en las direcciones X e Y en un determinado rango. Mediante este sistema se consiguieron seis señales analógicas: Ax, Ay, Bx, By, Cx y Cy, que midieron la aceleración dinámica (vibración) y la aceleración estática (gravedad). La adquisición de las señales analógicas de los acelerómetros se realizó a través de una tarjeta de entradas/salidas modelo USB NI 6009 conectada directamente al ordenador. Mediante un software desarrollado en LabVIEW se recogieron, se filtraron y se procesaron las señales analógicas. Cada acción de agarre, generó un fichero de datos que se procesó con otro software en LabVIEW, y que fue el responsable de obtener las variables significativas de agarre y de evaluar las características de la acción de agarre estimando la energía recogida por los acelerómetros.

### **Análisis estadístico**

## PROPIEDADES ÓPTICAS Y MECÁNICAS

El análisis de los datos de las propiedades ópticas y mecánicas se realizó a través de un ANOVA multifactorial, utilizando el programa Statgraphics Centurion XVI (StatPoint Technologies, Inc. Warrenton, VA). Para discernir entre las medias se utilizó el procedimiento de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD) con un nivel de confianza del 95 %.

## GARRAS ROBÓTICAS

El análisis de los datos provenientes de las garras robóticas se realizó mediante un modelo de análisis multivariante N-PLS. Dicho modelo se basa en la distribución de cualquier conjunto de datos de forma particular, mediante matrices de diferente orden, según la información disponible (Bro, 1998). Los datos pueden agruparse de forma espacial, a modo de cubo, de manera que es posible modelizar las variables significativas de agarre obtenidas a partir de los datos de los acelerómetros de la garra en las posiciones X e Y.

En el caso de los datos de este trabajo, la primera dimensión (filas) se corresponde con los seis pepinos asociados a cada lote o momento temporal. La segunda dimensión (columnas) está asociada a las variables proporcionadas por la garra; mientras que la tercera dimensión (tiempo) está asociada a los lotes o instantes de tiempo en que se realizan las pruebas a cada grupo de seis pepinos.

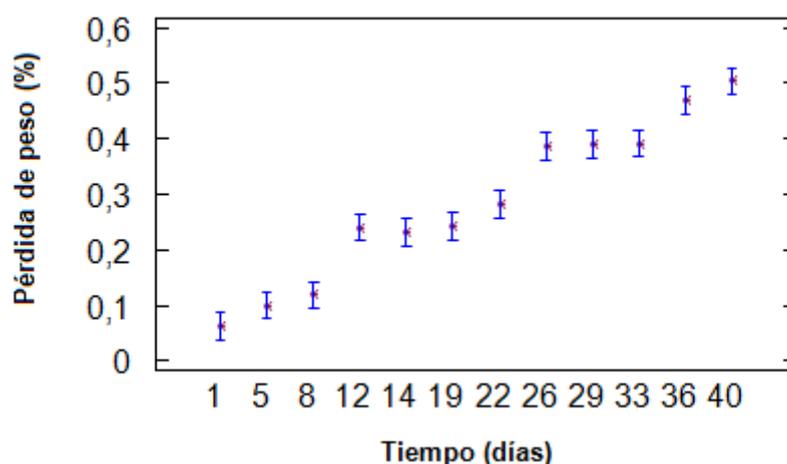
De forma particular, el modelo N-PLS, es un modelo de predicción que trata de conocer una variable respuesta a partir de unos determinados valores de las variables de entrada. En concordancia del modelo de origen PLS, el N-PLS busca maximizar la covarianza entre las variables de salida y de entrada (Smilde et al, 2004). Este hecho se consiguió mediante un ajuste simultáneo de un modelo multivariante de las variables de entrada y otro para las variables de salida, junto con un modelo de regresión que relacionó los dos modelos anteriores.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Control y evolución de peso

La Figura 1 muestra la evolución de la pérdida de peso de los pepinos almacenados durante 40 días en refrigeración a una temperatura de 9 °C y una humedad relativa del 95%. De los pesos iniciales y finales de cada uno de los pepinos, se calculó el porcentaje de peso perdido de cada uno de los frutos y se estudió su evolución. Como era de esperar, el análisis multifactorial de la varianza (ANOVA) muestra que existe un aumento significativo ( $p(0) < 0,05$ ) de la pérdida de peso de los pepinos en función del tiempo de almacenamiento de los mismos. Durante el almacenamiento de los pepinos, factores como la temperatura, la humedad relativa y la composición de la atmósfera, condicionan su vida útil (Sánchez, 2004). Resulta importante mantener el producto en su temperatura óptima, ya que temperaturas muy elevadas favorecen la respiración y contaminaciones microbianas y temperaturas excesivamente bajas pueden provocar daños por frío. Tras su recolección los pepinos continúan desarrollando los procesos metabólicos y mantienen los sistemas fisiológicos activos de igual forma a cuando estaban unidos al vegetal. Estos procesos se basan principalmente en procesos de respiración, tomando oxígeno y desprendiendo dióxido de carbono, así como transpiración, fenómeno que provoca pérdidas de agua en el producto (Wills y González, 1999). Mientras

permanecen unidas a la planta estas pérdidas están compensadas mediante el flujo de savia, pero una vez que son recolectadas, dependen exclusivamente de sí mismas. Tras la recolección, la transpiración continúa y se anula el suministro de agua a través del sistema vascular de la planta, iniciándose un proceso de deterioro y convirtiéndose en productos perecederos. A pesar de que en el pepino existen determinadas estructuras vegetales que impiden la deshidratación rápida del fruto, como las barreras estructurales que proporciona la cutícula cerosa y los controles fisiológicos ligados al cierre de los estomas o a las lenticelas (Wills y González, 1999), con el tiempo, la maduración del fruto provoca cambios estructurales y bioquímicos que afectan en definitiva a la pérdida del contenido de agua del alimento y por tanto, este descenso del contenido en agua del fruto, repercute directamente en la disminución del peso total del alimento.



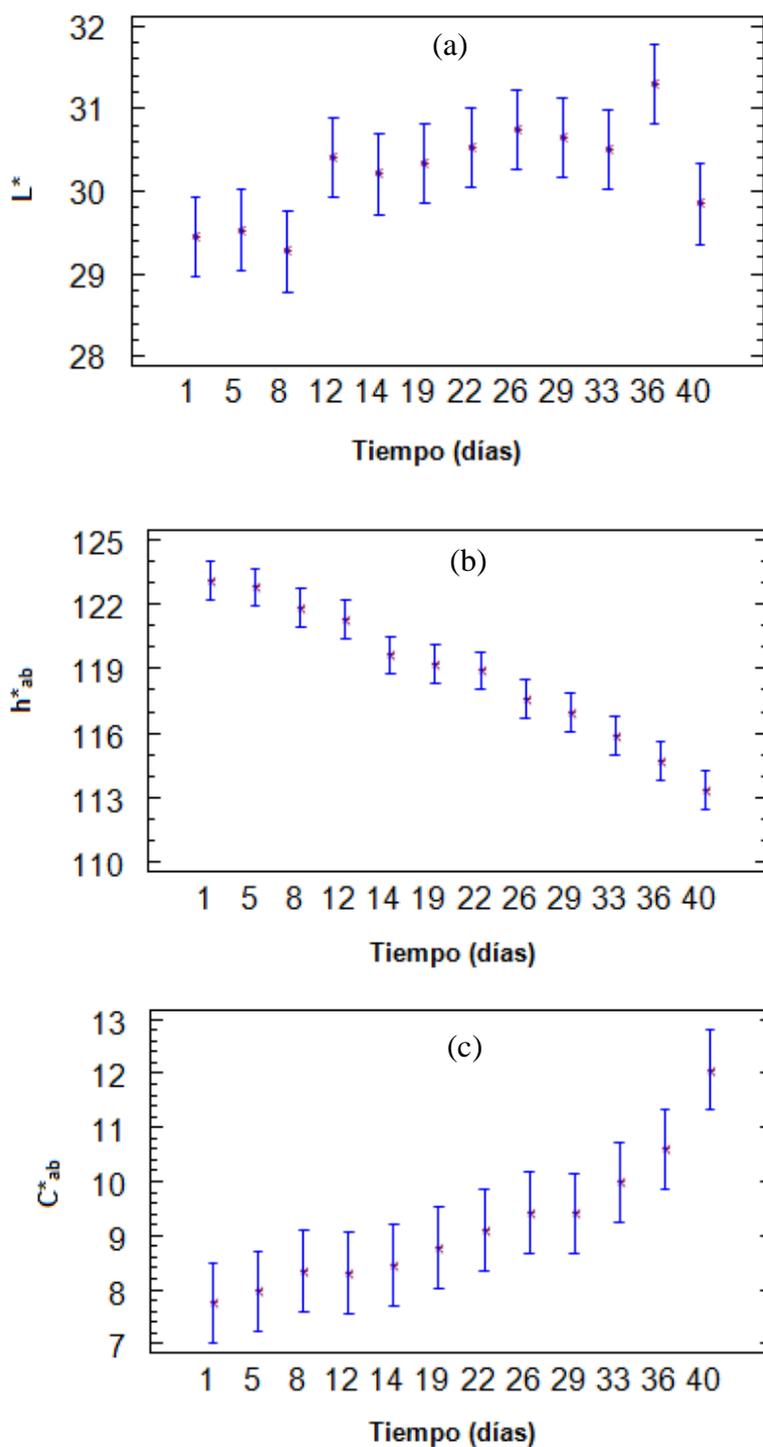
**FIGURA 1.** Evolución de la pérdida de peso de los pepinos durante su almacenamiento en refrigeración a una temperatura de 9 °C y una humedad relativa del 95%.

### Propiedades ópticas

El análisis del color es importante en los productos alimenticios ya que es uno de los parámetros de calidad que más ayuda a los consumidores a la hora de elegir un producto (Garrido et al, 2012). Puesto que la percepción del color depende del observador y de las diferentes condiciones de iluminación, para la realización de un estudio objetivo requiere el consenso y la utilización de instrumentos que cumplan las especificaciones de la CIE (*International Commission of Illumination*) (Rabia Korifi et al, 2012). En este estudio se realizaron nueve medidas de la curva de reflexión espectral de cada pepino usando el espectrofotómetro configurado con emisión de luz espectral D65 y observador estándar 10°. A partir de las nueve curvas obtenidas se calculó la curva espectral promedio y las coordenadas de color X, Y, Z (Hutchings, 2002). Partiendo de las coordenadas XYZ se determinaron las coordenadas Ciel\*a\*b\* mediante las ecuaciones estándar que se describen en Chiralt et al., 2007, y, con ellas, el tono, croma y las diferencias

de color que sufre el pepino durante su almacenamiento con respecto al pepino a tiempo cero, usando las ecuaciones 1 a 3 descritas en materiales y métodos del presente trabajo.

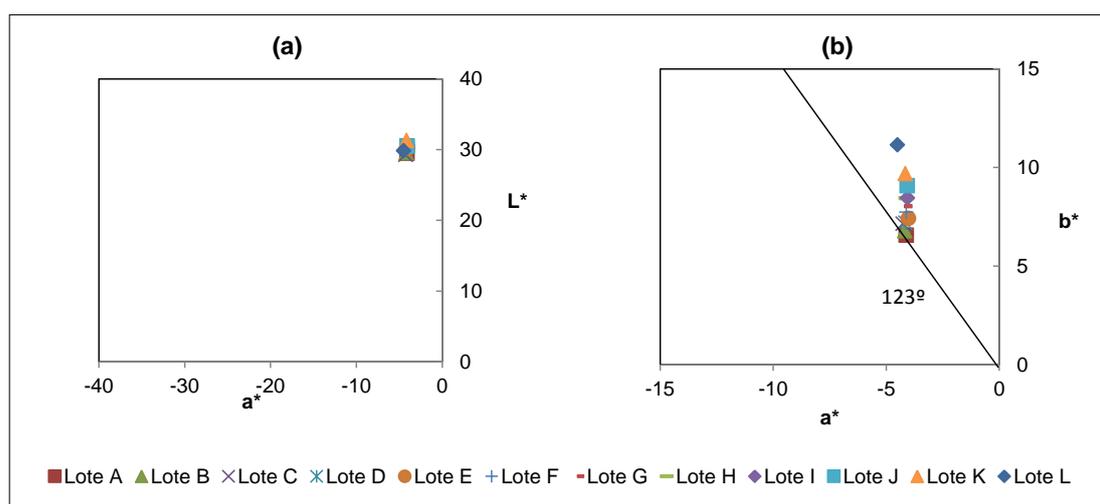
La Figura 2 muestra la evolución en el tiempo de los parámetros  $L^*$  (a), tono (b) y croma (c) para los lotes analizados.



**FIGURA 2.** Evolución temporal de la (a) luminosidad ( $L^*$ ), (b) tono ( $h^*_{ab}$ ) y (c) croma de los lotes analizados.

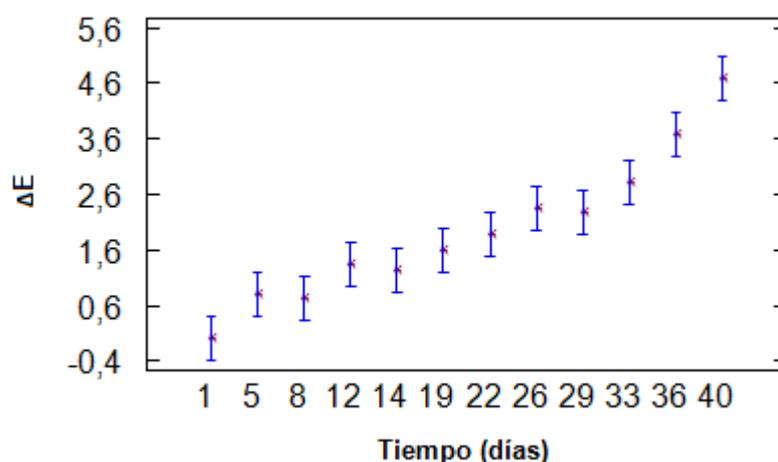
Se observa que la luminosidad del producto sufre cambios significativos ( $p(0,0024) < 0,05$ ) muy leves durante su almacenamiento, puesto que los valores oscilan entre 29 y 32 de una escala de 0 a 100. En cambio, en vista de los resultados estadísticos, existen cambios más apreciables en la tonalidad y pureza de color del producto. La tonalidad disminuye y el croma o pureza de color aumenta a medida que aumenta el tiempo de almacenamiento del pepino, aunque este efecto sólo se hace notable a partir del día 33 de almacenamiento.

La Figura 3 muestra la ubicación en los planos cromáticos  $a^*L^*$  y  $a^*b^*$  de los distintos lotes de pepinos estudiados. El plano  $a^*b^*$  incluye la línea isótono ( $123^\circ$ ) del pepino a tiempo cero de almacenamiento.



**FIGURA 3.** Planos cromáticos  $a^*L^*$  y  $a^*b^*$  para los distintos lotes de pepinos analizados.

La Figura 4 muestra los cambios de color que sufre el pepino durante su almacenamiento a  $9^\circ\text{C}$  y 95% de humedad relativa. En vista de los resultados obtenidos, se puede afirmar que existe un aumento significativo ( $p(0) < 0,05$ ) de los cambios en el color total del pepino a medida que aumenta el tiempo de almacenamiento. Sin embargo, estos cambios son muy pequeños ya que las diferencias de color observadas en muchos de los casos son inferiores a  $\pm 3$  unidades. Diferencias de color inferiores a  $\pm 3$  unidades no son perceptibles por el ojo humano (Francis y Clydesdale, 1975), pero diferencias mayores pueden ser percibidas por el consumidor e incluso en algunos alimentos provocar su rechazo. En base a este criterio, a simple vista no se podrían apreciar diferencias de color en los pepinos hasta 33 días de almacenamiento (lote J), tiempo a través del cual ya se ha producido un 39% de pérdida de peso en el producto tal y como se observa en la Figura 1.



**FIGURA 4.** Diferencia de color ( $\Delta E^*$ ) que sufren los pepinos durante su almacenamiento a  $9\text{ }^{\circ}\text{C}$  y una humedad relativa del 95%.

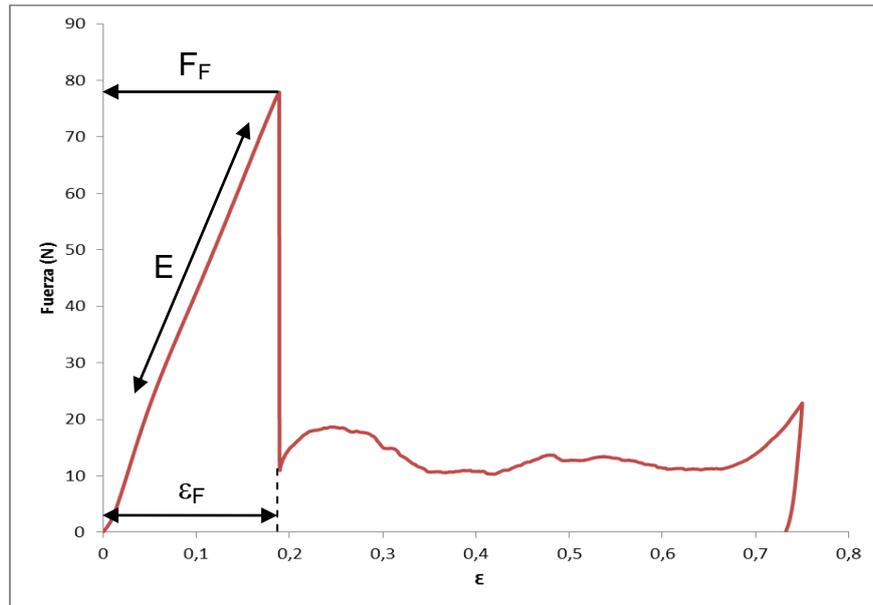
Los resultados obtenidos ponen de manifiesto la ineficacia del uso del colorímetro para la detección de cambios de calidad en el pepino hasta transcurridos 33 días de almacenamiento.

### Propiedades Mecánicas

#### PRENSA UNIVERSAL DE ENSAYOS MECÁNICOS

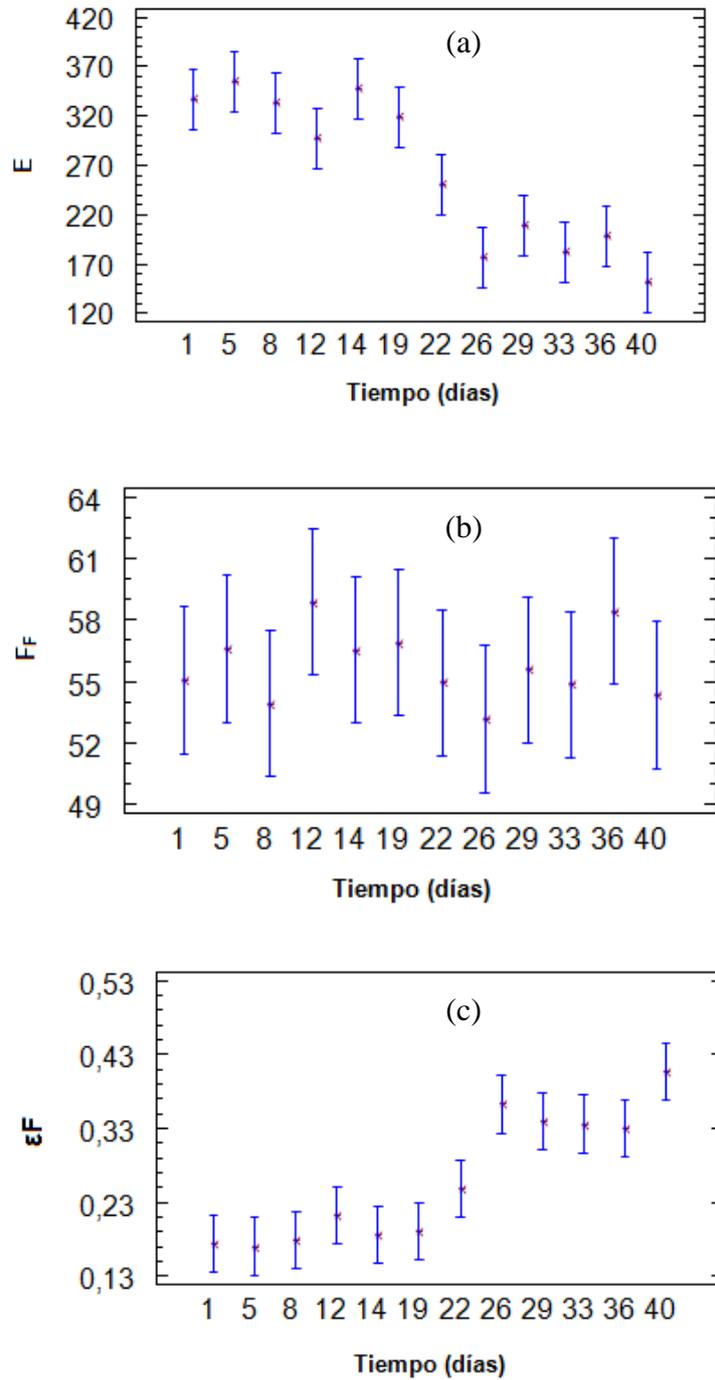
La textura en productos vegetales se utiliza frecuentemente en la caracterización del estado de madurez del fruto y es un importante factor de calidad en la comercialización de los productos (Konopacka et al., 2004). El análisis de la elasticidad del producto aporta información sobre el grado de madurez del mismo, y por tanto puede jugar un papel relevante a la hora de su elección en el mercado. De este modo, el estudio de las propiedades mecánicas del pepino, proporciona datos objetivos sobre los diferentes atributos que definen el producto. Los pepinos son cuerpos sólidos, es decir que, al aplicarle una fuerza, sufre una deformación instantánea de manera que la deformación relativa ( $\gamma$ ) es proporcional al esfuerzo ( $\sigma$ ) aplicado (Chiralt et al., 2007). La relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación relativa viene expresada por la ley de Hooke, donde el módulo de elasticidad es el parámetro que permite la caracterización del sólido. De los ensayos de punción realizados se obtuvieron curvas fuerza ( $F$ ) - distancia ( $d$ ) que fueron transformadas en curvas fuerza ( $F$ ) - deformación ( $\epsilon$ ) (Dobraszczyk y Vincent, 1999), teniendo en cuenta la distancia de avance del punzón y el espesor de la muestra.

La Figura 5 muestra la curva típica del ensayo para un pepino fresco donde se representan los parámetros que se han tenido en cuenta a la hora de caracterizar las curvas de punción: pendiente del tramo inicial (módulo de elasticidad,  $E$ ), la fuerza de fractura ( $F_F$ ) y la deformación relativa de fractura ( $\epsilon_F$ ).



**FIGURA 5.** Curva de punción de una muestra de pepino fresco, en la que se representa fuerza frente a deformación.

Se observa como inicialmente presenta un aumento rápido de la fuerza con la distancia, hasta que ocurre la fractura de la muestra, que se refleja en una caída brusca de la fuerza. La fuerza correspondiente a la fractura es proporcional al área, al perímetro del punzón y a las propiedades mecánicas del producto, el coeficiente de compresión y el coeficiente de cizalla (Bourne, 1975). Inicialmente se produce una compresión del producto bajo el punzón cuya fuerza es proporcional al área del mismo y posteriormente, ocurre el corte del producto alrededor del punzón con una fuerza proporcional a su perímetro. Por tanto, la fuerza desarrollada en un ensayo de punción dependerá del producto, de la forma y del tamaño del punzón y de la velocidad de penetración (Bourne, 1982). La Figura 6 muestra la evolución temporal de los tres parámetros estudiados, (a) módulo de elasticidad ( $E$ ), (b) La fuerza de fractura ( $F_F$ ) y (c) la deformación relativa de fractura ( $\epsilon_F$ ). El módulo de elasticidad o pendiente del tramo inicial de la curva, marca la dureza de las muestras, es decir, la resistencia a la deformación. Valores de módulo de Young altos, significan una pendiente elevada y por consiguiente el material se define como duro, según la ley de Hooke. En cambio, valores de  $E$  pequeños determinan que el material es blando.



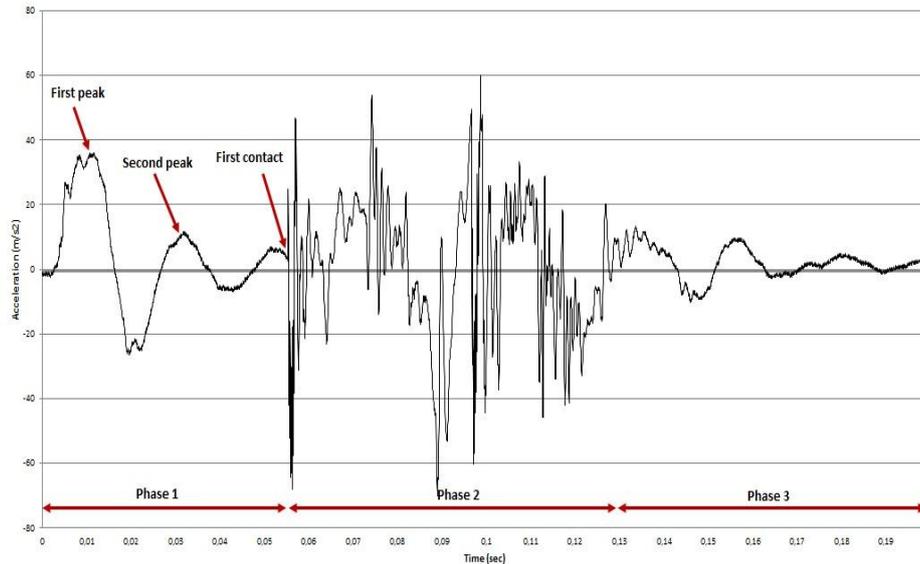
**FIGURA 6.** (a) Evolución temporal del módulo de Young (E), (b) fuerza de fractura ( $F_F$ ) y (c) deformación relativa ( $\epsilon_F$ ) de los pepinos analizados.

Las pendientes de los primeros lotes analizados guardan una estrecha similitud entre sus valores. Este hecho concuerda con los resultados esperados puesto que durante los primeros días de almacenamiento en la cámara, las condiciones de frescura del pepino se mantienen prácticamente intactas, sin embargo, durante la maduración de un fruto, se dan una serie de cambios fisiológicos y bioquímicos que repercute directamente en la

textura del alimento. Cuando el fruto está verde, sus propiedades mecánicas resultan muy diferentes a las del mismo fruto en estado avanzado de madurez. Durante la senescencia, los fenómenos como la degradación de las paredes celulares, activación enzimática, el aumento de la permeabilidad de membranas, entre otros, provocan un descenso de dureza de las paredes del fruto. De esta forma, los productos vegetales maduros se asocian a valores de módulo de Young bajos y, en contraposición, productos vegetales verdes muestran valores altos de  $E$ . Esta tendencia se observa en la Figura 6 (a), donde se puede afirmar ( $p(0) < 0,05$ ) que los valores de pendiente de los pepinos disminuyen a partir del día 14 de almacenamiento, correspondiendo al lote E. Por otra parte, en la Figura 6 (b) se observa que no existen diferencias significativas en los valores de fuerza de fractura ( $p(0,9) > 0,05$ ), aunque si se observan diferencias en los valores de la deformación de fractura (Figura 7 (c)). Se pone en evidencia un aumento significativo ( $p(0) < 0,05$ ) de los valores de  $\varepsilon_F$  a partir del día 14 (Lote E), como ocurría para los valores de módulo de elasticidad. Este hecho concuerda con la maduración del fruto, ya que a medida que aumenta su senescencia los valores de deformación relativa se hacen mayores, puesto que las paredes del alimento se hacen más débiles. En base a los análisis mecánicos se llega a la conclusión de que la firmeza del producto se mantiene más o menos intacta durante los primeros días de almacenamiento (a pesar de tener pérdidas de peso entorno al 20% (ver Figura 1), pero una vez sobrepasado un determinado punto (lote E, 14 días de almacenamiento a 9°C y 95 % de humedad relativa) se observa un gran deterioro en la textura del producto. Este cambio en la textura del producto no va acompañado de un cambio significativo en las propiedades ópticas del producto, así que no puede ser detectado usando un espectrocolorímetro. Tras ese periodo de almacenamiento, las diferencias de color totales en el pepino, en relación al pepino fresco, no son suficientes como para ser percibidas por el ojo humano, por lo que el manejo de las propiedades mecánicas resulta clave para la clasificación del pepino a nivel industrial.

## GARRAS ROBÓTICAS

El diseño de la garra robótica para la manipulación de pepino se desarrolló con la finalidad de probar su utilidad en operaciones de *pick&place* dentro de la industria (Blanes et al, 2011). La Figura 7, muestra un ejemplo de señal registrada por los acelerómetros de la garra durante el proceso de agarre del pepino. Las señales recogidas por los acelerómetros permiten observar tres fases diferentes de agarre. La primera de ellas, es la aproximación de los dedos de la garra al producto; la segunda fase, abarca desde el primer contacto con el producto hasta que no existe movimiento relativo entre los dedos de la garra y el producto, es decir, cuando el producto queda sujeto por los dedos de la misma; la tercera fase y última, representa la oscilación solidaria del conjunto garra-producto.



**FIGURA 7.** Ejemplo de una señal registrada por los acelerómetros durante el proceso de agarre del pepino en la que se representa la aceleración ( $m/s^2$ ) frente al tiempo (segundos).

La aplicación del modelo de análisis multivariante N-PLS se realizó en primer lugar a todo el conjunto de variables. Se asoció la estructura X a un cubo, tal y como se ha descrito en materiales y métodos. Una de las aristas se formó con 6 filas de datos (tantas como pepinos de un lote), otra arista representó los 22 parámetros correspondientes a la media y la desviación típica de cada una de las 11 variables originales derivadas de los sensores de la garra y por último, los 11 instantes de tiempo asociados a cada uno de los lotes, conformó la tercera arista. Con la estructura Y se procedió de la misma forma, con los datos de los 6 pepinos, 6 parámetros correspondientes a la media y la desviación típica de cada una de las 3 variables originales derivadas de los análisis de textura y 11 instantes de tiempo asociados a cada uno de los lotes. Los resultados de la aplicación del modelo N-PLS a todo el conjunto de variables de manera simultánea no fue satisfactorio, puesto que logró explicar solo un 66 % del bloque de variables Y en su conjunto. Se realizó un nuevo análisis más adecuado, sometiendo al modelo las variables implicadas por separado. En la Tabla 1 se muestran los valores obtenidos tras el análisis independiente de unas variables determinadas para las estructuras X e Y tras la aplicación del modelo multivariante N-PLS. Se observa que para los tres parámetros que definen las propiedades mecánicas del pepino, fuerza de fractura, deformación relativa y pendiente, existe un porcentaje de explicación superior al 90 %, tanto contemplando las medias como las desviaciones estándar. El porcentaje de explicación es indicativo de la descripción del modelo a través de sus componentes (variables), es por ello que un porcentaje alto significa que con los datos registrados por la garra robótica, se puede obtener más del 90 % de la información registrada por el texturómetro. De este estudio, se puede concluir que el sistema de garras robóticas es válido para registrar las propiedades mecánicas del pepino y que por tanto, abre todo un abanico de posibilidades para su implantación dentro de la industria agroalimentaria.

**TABLA 1.** Resultados de la aplicación del modelo multivariante N-PLS a las variables de las estructuras de datos X e Y.

Variable	Componentes	Explicación X-Block (%)	Explicación Y-Block (%)
$F_{F \text{ media}}$	4	39.73	91.53
$F_{F \text{ Stand}}$	5	46.70	99.69
$\epsilon F_{\text{ media}}$	4	35.64	96.27
$\epsilon F_{\text{ Stand}}$	4	41.45	95.22
$E_{\text{ media}}$	4	37.15	92.45
$E_{\text{ Stand}}$	4	32.15	91.72

## CONCLUSIONES

Durante el almacenamiento del pepino en refrigeración se observa que el pepino experimenta una degradación progresiva con el tiempo. El aumento del porcentaje de pérdida de peso, es consecuencia del proceso de maduración, que conlleva una serie de cambios fisiológicos y bioquímicos que repercuten directamente a la pérdida de agua del fruto.

Mientras que las propiedades ópticas estudiadas no pueden aportar información válida sobre la maduración del pepino a nivel externo, las propiedades mecánicas, en cambio, sí que permiten registrar la evolución temporal de los cambios de textura que experimenta el fruto. Los datos de aceleración dinámica (vibración) y estática (gravedad) obtenidos de los acelerómetros de la garra robótica muestran una buena correlación con los registrados por el texturómetro según el modelo estadístico de análisis multivariante (N-PLS).

Estos resultados ponen de manifiesto la idoneidad del sistema de garras robóticas para la clasificación de pepino, abriendo las puertas a su aplicación en la industria agroalimentaria.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Vicerectorat d'Investigació, Universitat Politècnica de València a través del proyecto PAID-05-11-2745.

## REFERENCIAS

- Blanes, C., Mellado, M., Ortiz, C., & Valera, A. (2011). Technologies for robot grippers in pick and place operations for fresh fruits and vegetables. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(4), 1130-1141.
- Blasco, J., Cubero, S., Gómez-Sanchís, J., Mira, P., & Moltó, E. (2009). Development of a machine for the automatic sorting of pomegranate (*Punica granatum*) arils based on computer vision. *Journal of Food Engineering*, 90(1), 27-34.
- Bro, R. (1996). Multiway calibration. Multilinear PLS. *Journal of Chemometrics*, 10, 47-61.
- Bro, R. (1998). *Multi-Way Analysis in the Food Industry: Models, Algorithms, and Application*. Tesis Doctoral. Royal Veterinary and Agricultural University, Copenhagen, Denmark.

- Bruhn, C. (2007). Aspectos de calidad y seguridad alimentaria de interés para el consumidor. *Tecnología Poscosecha De Productos Hortofrutícolas*, 37-44.
- Chiralt, A., Martínez, N., González, C., Talens, P. y Moraga, G. (2007). *Propiedades físicas de los alimentos*. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia.
- Dobraszczyk, B. J., & Vincent, J. F. V. (1999). Measurement of mechanical properties of food materials in relation to texture: The materials approach. *Food Texture: Measurement and Perception*, 99-151.
- Francis, F. J., & Clydesdale, F. M. (1975). *Food colorimetry: Theory and applications*. AVI Publishing Co. Inc.
- Francis, F. (1995). Quality as influenced by color. *Food Quality and Preference*, 6(3), 149-155.
- Garrido-Novell, C., Pérez-Marin, D., Amigo, J. M., Fernández-Novales, J., Guerrero, J. E., & Garrido-Varo, A. (2012). Grading and color evolution of apples using RGB and hyperspectral imaging vision cameras. *Journal of Food Engineering*, 113(2), 281-288.
- Geladi, P., & Kowalski, B. R. (1986). Partial least-squares regression: A tutorial. *Analytica Chimica Acta*, 185, 1-17.
- Harker, F. R., Kupferman, E. M., Marin, A. B., Gunson, F. A., & Triggs, C. M. (2008). Eating quality standards for apples based on consumer preferences. *Postharvest Biology and Technology*, 50(1), 70-78.
- Hutchings, J. B., & Hutchings, J. (1999). *Food color and appearance*. Aspen Publishers. Gaithersburg.
- Juran, J. M. (2005). In Bingham R. S., Gryna F. M. (Eds.), *Manual de control de la calidad. volumen 1*. Barcelona. Ediciones Reverté.
- Konopacka, D., & Plochanski, W. J. (2004). Effect of storage conditions on the relationship between apple firmness and texture acceptability. *Postharvest Biology and Technology*, 32(2), 205-211.
- Korifi, R., Le Dréau, Y., Antinelli, J., Valls, R., & Dupuy, N. (2013). CIEL\*a\*b\* color space predictive models for colorimetry devices – analysis of perfume quality. *Talanta*, 104(0), 58-66.
- Ministerio de Agricultura y Medio Ambiente [en línea]. Dirección URL: <<http://www.magrama.gob.es/es/>>. [Consulta: 09 Dic. 2012]
- Montgomery, D. C. (2008). *Design and analysis of experiments*. John Wiley & son Inc. United States of America.
- Nicolai, B. M., Beullens, K., Bobelyn, E., Peirs, A., Saeys, W., Theron, K. I., & Lammertyn, J. (2007). Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review. *Postharvest Biology and Technology*, 46(2), 99-118.
- Piqueras-Fiszman, B., Alcaide, J., Roura, E., & Spence, C. (2012). Is it the plate or is it the food? assessing the influence of the color (black or white) and shape of the plate on the perception of the food placed on it. *Food Quality and Preference*, 24(1), 205-208.
- Prieto, M., Mouwen, J. M., López Puente, S., & Cerdeño Sánchez, A. (2008). Concepto de calidad en la industria agroalimentaria. *Interciencia*, 33(4), 258-264.
- Rojas, F., & Ubina, K. (2009). *Determinación no destructiva de parámetros de calidad de frutas y hortalizas mediante espectroscopía de reflectancia en el infrarrojo cercano*. Universidad de Córdoba, Servicio de Publicaciones.
- Sánchez-Pineda, M. (2004). Procesos de conservación poscosecha de productos vegetales. *Madrid: AMV Ediciones*,
- Senlle, A. (2001). *ISO 9000-2000 - calidad y excelencia* Gestion 2000.
- Smilde, A. K., Bro, R., Geladi, P., & Wiley, J. (2004). *Multi-way analysis with applications in the chemical sciences*. John Wiley & sons Inc. Chichester. UK.
- Sun, D. W. (2007). *Computer vision technology for food quality evaluation*. Academic Press. London. UK.
- United States Department of Agriculture (USDA). National Nutrient Database for Standard Reference [en línea]. Dirección URL: <<http://ndb.nal.usda.gov/>>. [Consulta: 15 Dic. 2012]
- Wills, R., & González, J. B. (1999). *Introducción a la fisiología y manipulación poscosecha de frutas, hortalizas y plantas ornamentales*. Zaragoza. Acribia.