

# Evaluación de técnicas acústicas para la determinación de firmeza en melocotón

A. Herrero<sup>1)</sup>, B. Diezma<sup>1)</sup>, L. Lleó<sup>1)</sup>, C. Valero<sup>1)</sup>, M. Ruiz-Altisent<sup>1)</sup>,

<sup>1)</sup> Laboratorio de Propiedades Físicas y Técnicas Avanzadas en Agroalimentación (LPF-TAG), ETSI Agrónomos, Ing. Rural, Universidad Politécnica de Madrid. [www.lpftag.upm.es](http://www.lpftag.upm.es)

## **Resumen (Abstract)**

Non destructive determination of stone fruit firmness is a critical factor for improving its quality and handling. This work applies available acoustic techniques to the determination peach firmness, considering and comparing different parameters obtained with 2 devices: AWETA-AFS (Acoustic Firmness Sensor), which integrates impact and acoustic response information; and a prototype device by LPF-TAG, which enables to analyze the whole acoustic spectra. Magness-Taylor, quasi-static ball compression and non-destructive impact are used as firmness references, obtaining up to 86% R.

La determinación no destructiva de la firmeza en melocotón es fundamental para mejorar la calidad y facilitar el manejo de esta fruta por la industria. El presente trabajo se plantea con el objetivo de estudiar la aplicación de técnicas acústicas en la caracterización de firmeza en melocotón. Para ello se evalúan y comparan distintos parámetros obtenidos mediante un sensor comercial, el dispositivo "Acoustic Firmness Sensor" (ASF de AWETA) que incorpora también un sensor de impacto; y un prototipo de equipo acústico desarrollado en el LPF-TAG, que permite analizar el espectro acústico completo. Como medidas de referencia se utilizaron: el ensayo Magness-Taylor (MT), la compresión cuasiestática con contacto esférico (B) y la respuesta al impacto, ensayo no destructivo (IMP.) Como principales resultados destacan las correlaciones entre algunos de los parámetros acústicos con las variables de referencia (R de hasta 0,86)

## **Palabras Clave (Keywords)**

Peach, Firmness, Acoustic, Quality, Evolution. (Melocotón, Firmeza, Acústico, Calidad, Evolución)

### **1. Introducción. Objetivos**

Este estudio se realiza dentro del marco del proyecto europeo SAFRUIT y en colaboración con los centros CTIFL (Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes, Avignon, Francia), Cemagref (Montpellier, Francia), e IRTA (Lérida, España). Para ello se analizaron un total de 900 frutos, procedentes de dos campañas, y a los que se aplicaron varios tratamientos, asegurando una muy amplia variabilidad en rangos de firmeza.

En este trabajo se estudia la estimación de la firmeza de forma no destructiva mediante varios dispositivos basados en la respuesta acústica al impacto (Diezma-Iglesias, Ruiz-Altisent et al. 2004; De Ketelaere, Howarth et al. 2006) y/o en la respuesta reológica a impacto no destructivo, registrada con un acelerómetro (Chen and Ruiz-Altisent 1996;

García-Ramos, Ortiz-Cañavate et al. 2003; Slaughter, Ruiz-Altisent et al. 2009). En los ensayos acústicos la muestra se excita mediante un impacto de baja intensidad produciendo una respuesta vibratoria en el rango audible (20 -20.000 Hz). La respuesta se registra con un micrófono y la señal en el tiempo es tratada con el algoritmo de la transformada rápida de Fourier (FFT, Fast Fourier Transform) para obtener la correspondiente señal en frecuencias (espectro acústico).. Las frecuencias resonantes del espectro constituyen el fundamento de la mayor parte de los parámetros acústicos que los diferentes autores relacionan con la firmeza de frutas y hortalizas. La frecuencia resonante de un objeto depende directamente de su geometría, masa y el módulo de elasticidad del material del que se compone (Studman 2001). Numerosos trabajos de investigación (De Ketelaere, Howarth et al. 2006) han aplicado el índice de firmeza (FI) propuesto por Cooke (1972), , en el que se relaciona el módulo de elasticidad de un fruto de forma cuasi esférica con su masa y la frecuencia resonante de amplitud máxima ( $f_R$ , Hz):

$$FI = \rho^2 R m^{2/3} \quad (1)$$

En otros trabajos se proponen ligeras modificaciones en este FI (1ª o 2ª frecuencia resonante, en lugar de la de máxima amplitud), o parámetros que integran la amplitud en una banda frecuencial, tratando así de obviar la dificultad de baja resolución espectral (Farabee et al., 1991).

Los métodos de impacto no destructivo y acústicos se han aplicado a diferentes productos hortofrutícolas para la determinación de la firmeza o madurez: tomate (Ketelaere et al. 2001) , manzana (De Ketelaere, Howarth et al. 2006), melocotón (Diezma-Iglesias, Valero et al. 2006), sandía (Diezma-Iglesias, Ruiz-Altisent et al. 2004), peras (Taniwaki, Hanada et al. 2009).

En el caso del melocotón, (Golding, Spohr et al. 2005), citado por (De Ketelaere, Howarth et al. 2006), observó una mejor correlación de Magness-Taylor, con el impacto no destructivo ( $r= 0,82$ ) que con las técnicas acústicas ( $r=0,62$ ). Similares resultados fueron obtenidos por Diezma et al. (2006); en este trabajo la combinación de los parámetros acústicos y los de impacto (obtenidos mediante prototipos de laboratorio de desarrollo propio: LPF-TAG) mejoró el coeficiente de correlación múltiple a 0,91.

En los últimos años se han desarrollado instrumentos comerciales para la estimación no destructiva de la firmeza a través de técnicas acústicas, que requieren una evaluación y valoración específicas para cada tipo de fruta.

Los objetivos de este trabajo son:

- La evaluación y comparación de varios parámetros basados en la medida no destructiva de las propiedades elásticas y acústicas en melocotón para estimar la firmeza de la fruta. En este caso, se incluyen todos los posibles parámetros que pueden obtenerse con el instrumento comercial AWETA (AWETA-AFS); parámetros basados en el impacto no destructivo, obtenidos mediante el prototipo LPF-TAG ; y parámetros acústicos obtenidos con un equipo acústico propio (LPF-TAG).
- La evaluación de la aptitud de dichos parámetros para el seguimiento de la evolución de la firmeza a lo largo del proceso poscosecha.

## **2. Materiales y métodos**

### **2.1 Ensayos colaborativos campaña 2006**

En una primera campaña (2006) llevada a cabo en colaboración entre los grupos LPF-TAG (UPM), IRTA, CEMAGREF y CTIFL, se examinaron 200 melocotones de la variedad Rich Lady. Se consideró una muestra heterogénea en tamaños y estados de madurez de una plantación comercial situada en Lérida. Los frutos se almacenaron a 7°C y se analizaron durante los dos días siguientes a la recolección (100 frutos analizados el día 1 + 100 frutos, el día 2).

Se realizaron dos medidas por fruto, para todos los parámetros, en la cara más coloreada (chapa) y la menos coloreada (fondo), obteniéndose un total de 400 medidas para cada parámetro.

Tal y como se observa en la Tabla 1, se analizaron las propiedades acústicas de dicha muestra mediante el dispositivo comercial AWETA, y con el equipo LPF-TAG para el impacto no destructivo, tomando como referencia la medida de la máxima fuerza de penetración en el ensayo Magness-Taylor y de contacto esférico cuasi estático.

### **2.2 Ensayos LPF-TAG campaña 2007**

En una segunda campaña (2007) se analizaron en el LPFT-TAG un total de 280 melocotones de la variedad Rich Lady procedentes de Murcia Con el fin de incluir la máxima variabilidad y de observar la capacidad de seguimiento de la maduración del fruto de las técnicas no destructivas de impacto y acústicas estudiadas se consideraron frutos recolectados a lo largo de cuatro semanas consecutivas. Es decir, cuatro cosechas: la realizada 2 semanas antes de la fecha de cosecha óptima (pre-comercial-2), la realizada 1 semana antes de la fecha de cosecha óptima (pre-comercial-1), la realizada en el momento de cosecha óptima 0 (cosecha óptima) y la realizada una semana después de la fecha de

cosecha óptima (post-comercial). Cada cosecha se sometió a tres tratamientos, emulando las condiciones del proceso postcosecha:

Q0: medidos un día después de recolección,

Q1: mantenidos a 2°C cuatro días y a 7°C dos días.

Q2: sometidos a Q0 más Q1 y posteriormente a un proceso de maduración (20 °C durante dos días, en el interior de bolsas perforadas).

Se realizaron ensayos similares a los descritos para la campaña anterior, incluyendo medidas adicionales para el equipo de impacto propio y además medidas tomadas con un prototipo de equipo acústico propio, que permitió la medida del espectro acústico completo, del cual solo se incluye en este trabajo el valor de la integral entre las frecuencias 40 y 90 Hz (BM 40-90).

Las Tablas 1 y 2 recogen las técnicas destructivas y no destructivas utilizadas para el análisis.

Tabla 1. Técnicas no destructivas utilizadas para el análisis: instrumento y parámetros extraídos.

| <b>Técnica No Destructiva</b>      | <b>Instrumento</b>  | <b>Parámetros extraídos</b>   |
|------------------------------------|---|---|
| Respuesta a impacto no destructivo | Impactador lateral LPF-TAG,<br><i>Registra las características de deceleración de una masa de 10g al impactar de forma controlada con la muestra.</i> | Máxima aceleración(a):<br>I_Max.Ac (m/s <sup>2</sup> )  |
|                                    |   | Tiempo para máxima a:<br>I_T(MaxAc) (ms)  |
|                                    |   | Máxima deformación<br>I_MaxDef (µm)   |
|                                    |   | Deformación para a=0<br>I_Def(a=0) (µm)   |
| Respuesta acústica                 | AFS (AWETA ®)   | IF: basados en la masa y la frecuencia de resonancia<br>FI (Hz <sup>2</sup> kg <sup>2/3</sup> )                         |
|                                    |   | FO: Primera frecuencia resonante (Hz) (1p) o frecuencia resonante de máxima intensidad (mp)<br>FO (Hz)                  |
|                                    |   | Parámetro alternativo (Impact firmness): basado en la respuesta al impacto no destructivo (medida con un acelerómetro). |

|  |                                  |  |
|--|----------------------------------|--|
|  |                                  | AW_F (Aweta standard)  |
|  | Equipo acústico propio (LPF-TAG) | Frecuencia resonante de máxima intensidad (AC_Rfreq, Hz)<br>,BM 40-90<br>Para el que se obtuvieron buenos resultados en otros trabajos en melocotón (Diezma <i>et al.</i> , 2006.) |

Tabla 2. Técnicas Destructivas utilizadas como referencia para el análisis: Instrumento y parámetros extraídos.

| <b>Técnica Destructiva</b>   | <b>Instrumento</b>   | <b>Variables extraídas</b>               |
|--|--|--|
| Ensayo Magness-Taylor (8mm)  | Penetrómetro manual en ensayos primera campaña (2006)<br>Texturómetro (Stable Micro Systems Ltd, model TAXT2; Surrey, UK), en ensayos segunda campaña (2007) | Fuerza máxima de penetración:<br>MT (N)  |
| Compresión cuasi estática con bola (20mm de diámetro hasta una deformación de 2mm) | Texturómetro (Stable Micro Systems Ltd, model TAXT2; Surrey, UK).  | Fuerza máxima de deformación:<br>B_F (N) |

### **3. Resultados y discusión**

#### **3.1 Ensayos colaborativos campaña 2006 Comparación de los resultados de FO como la primera frecuencia resonante o como la frecuencia de máxima intensidad**

En un primer análisis se comparó el resultado de considerar el parámetro FO de AWETA como la primera frecuencia resonante o como la frecuencia resonante de máxima amplitud del espectro. Según se observa en el análisis ANOVA recogido en la Tabla 3, no se encontraron diferencias significativas, obteniéndose una F de Fischer de 0.04 y un coeficiente de correlación entre ambas frecuencias del 0,89 (Figura 1). Lo que indica que en el melocotón, fruta con una forma tal que puede aproximarse a la esférica, la frecuencia resonante de máxima intensidad normalmente corresponde al primer pico del espectro. De ello se podría concluir que en este trabajo ambos parámetros se pueden utilizar indistintamente,

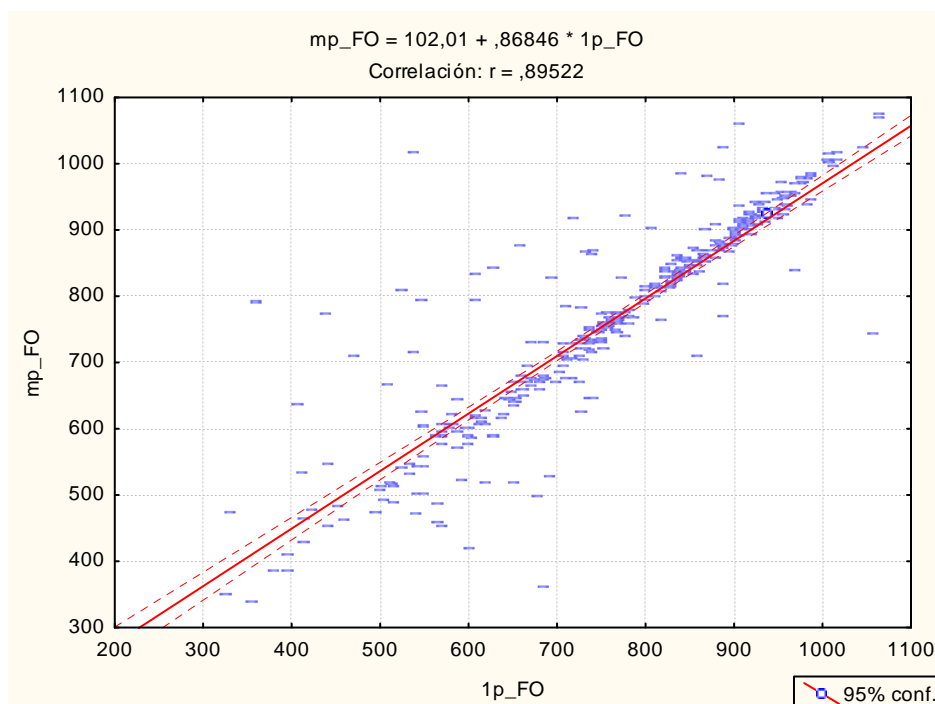


Figura 1. FO como frecuencia resonante de máxima intensidad (mp) vs FO como primera frecuencia resonante (1p). . n=400

Tabla 3. Análisis de Varianza (ANOVA) para el parámetro FO, medido con AWETA AFS, como el primer (1p) o máximo (mp) pico del espectro. N=400 medios frutos.

| <i>FO</i>        | <i>SS</i> | <i>df</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>P</i> |
|------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|
| <i>Intercept</i> | 516908248 | 1         | 516908248 | 22961,95 | 0,000000 |
| <i>1p-mp</i>     | 992       | 1         | 992       | 0,04     | 0,833752 |
| <i>Error</i>     | 19585015  | 870       | 22512     |          |          |

### ***Evaluación parámetros acústicos y de impacto no destructivo en relación a medidas destructivas de firmeza tomadas como referencia***

En la Tabla 4 y la Figura 2 se observa que los parámetros para los que se obtuvo una mayor correlación entre técnicas destructivas y no destructivas son el impacto no destructivo (parámetros del equipo LPF-TAG y AWETA) con la compresión cuasi estática, especialmente con la energía elástica (B\_E). Así, de los parámetros obtenidos con el ASF

de AWETA, el parámetro de impacto (AW\_F) registró la mejor correlación ( $R=0,82$ ) con el equipo LPF-TAG de impacto no destructivo y con la energía elástica obtenida en el ensayo cuasi estático de compresión esférica. En cuanto a la correlación con la Fuerza MT (obtenida con penetrómetro manual) y la fuerza en compresión (B\_F), se obtuvieron valores similares para los índices FI, FO y AW\_F. De los parámetros extraídos del equipo propio de impacto no destructivo las mejores correlaciones, tanto con los parámetros del equipo comercial AWETA como con las referencias se obtuvieron para I\_MaxAc ( $R=0,81$  con B\_F y AW\_F). Asimismo, se observó, una mejor correlación con el ensayo de compresión esférica que con MT (Figura 2 y Figura 3). Este resultado concuerda con trabajos anteriores (Herrero, Lleó et al. 2007), y refleja la naturaleza del ensayo de impacto no destructivo, que registra las propiedades elásticas de la fruta, relacionándose mejor con técnicas de esta misma naturaleza que con las basadas en la caracterización de la resistencia a penetración (MT).

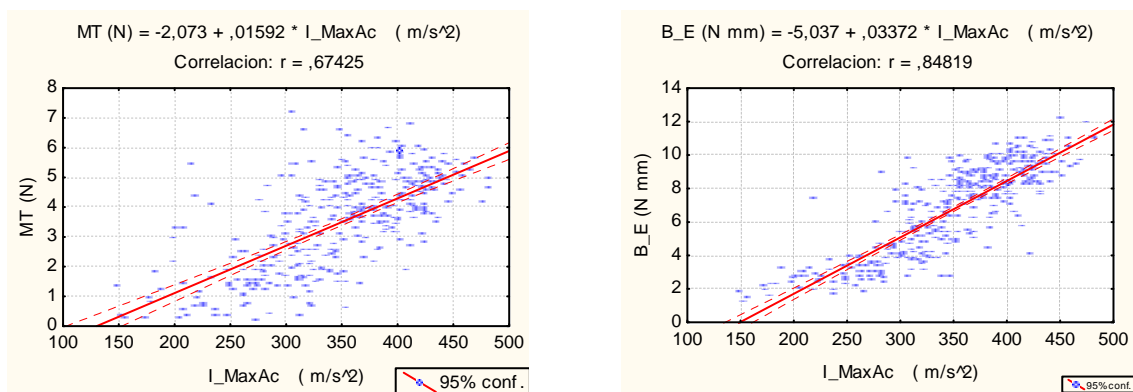


Figura 2. MT vs I\_MaxAc (iqda.). B\_E Vs I\_MaxAc (dcha.). N=400 medios frutos

Según se observa en la Tabla 4 y la Figura 3, la masa y el calibre de los frutos aparecen independientes respecto a las medidas acústicas y de firmeza obteniéndose coeficientes de correlación muy bajos inferiores a 0,5 en valor absoluto, para todas las medidas. . En el análisis de componentes principales de la Figura 3 se observa que la masa y el calibre aparecen en un factor perpendicular al factor que agrupa las medidas acústicas y de firmeza. Son por tanto, dos grupos de medidas independientes.

Tabla 4. Tabla de correlación entre variables de referencia (en negrita) y los parámetros acústicos y de impacto no destructivo. N=400 medios frutos.

|  | <i>Calibre</i> | <i>Masa</i> | <i>B_F</i> | <i>B_E</i> | <i>MT</i> | <i>I_Max</i> | <i>I_Tma</i> | <i>I_MaxDe</i> | <i>1p_FO</i> | <i>FI</i> | <i>AW_F</i> |
|--|----------------|-------------|------------|------------|-----------|--------------|--------------|----------------|--------------|-----------|-------------|
|--|----------------|-------------|------------|------------|-----------|--------------|--------------|----------------|--------------|-----------|-------------|

|                                  |      |      |       |        |       |                        |              |       |       |                                |       |
|----------------------------------|------|------|-------|--------|-------|------------------------|--------------|-------|-------|--------------------------------|-------|
|                                  | (mm) | (g)  | (N)   | (N mm) | (N)   | Ac<br>m/s <sup>2</sup> | xAc<br>(us.) | f (m) | (Hz)  | (Hz.Hz.<br>kg <sup>2/3</sup> ) |       |
| Calibre (mm)                     | 1,00 | 0,95 | -0,17 | -0,10  | -0,26 | 0,04                   | 0,09         | 0,01  | -0,43 | -0,09                          | -0,10 |
| Masa (g)                         |      | 1,00 | -0,19 | -0,12  | -0,26 | 0,01                   | 0,12         | -0,02 | -0,45 | -0,11                          | -0,14 |
| B_F (N)                          |      |      | 1,00  | 0,96   | 0,81  | 0,81                   | -0,69        | 0,72  | 0,79  | 0,77                           | 0,78  |
| B_E (N mm)                       |      |      |       | 1,00   | 0,80  | 0,84                   | -0,75        | 0,78  | 0,79  | 0,80                           | 0,83  |
| MT (N)                           |      |      |       |        | 1,00  | 0,67                   | -0,63        | 0,63  | 0,77  | 0,73                           | 0,72  |
| I_MaxAc<br>(m/s <sup>2</sup> )   |      |      |       |        |       | 1,00                   | -0,88        | 0,95  | 0,68  | 0,77                           | 0,81  |
| I_TmaxAc<br>(us.)                |      |      |       |        |       |                        | 1,00         | -0,97 | -0,62 | -0,67                          | -0,76 |
| I_MaxDef<br>(mm)                 |      |      |       |        |       |                        |              | 1,00  | 0,63  | 0,72                           | 0,79  |
| 1p_FO (Hz)                       |      |      |       |        |       |                        |              |       | 1,00  | 0,80                           | 0,73  |
| FI<br>(Hz*Hz*kg <sup>2/3</sup> ) |      |      |       |        |       |                        |              |       |       | 1,00                           | 0,83  |
| AW_F                             |      |      |       |        |       |                        |              |       |       |                                | 1,00  |

Tabla 5. Tal y como se observa en la Tabla 5, las correlaciones de FO con otras medidas fueron similares tomando la primera frecuencia resonante (1p\_FO) o la frecuencia resonante de máxima intensidad (mp\_FO) del espectro, observando una ligera mejoría para la FO correspondiente a la primera frecuencia resonante. Tabla de correlación entre parámetros D y ND con FO tomadas en el primer 1p\_FO y máximo (mp) pico del espectro de resonancia

|                                  | 1p_FO (Hz) | mp_FO(Hz) |
|----------------------------------|------------|-----------|
| <b>Calibre (mm)</b>              | -0,43      | -0,42     |
| <b>Masa (g)</b>                  | -0,45      | -0,45     |
| <b>B_F (N)</b>                   | 0,79       | 0,74      |
| <b>B_E (N mm)</b>                | 0,79       | 0,74      |
| <b>MT (N)</b>                    | 0,77       | 0,74      |
| <b>I_MaxAc (m/s<sup>2</sup>)</b> | 0,68       | 0,67      |
| <b>I_TmaxAc (us.)</b>            | -0,62      | -0,64     |
| <b>I_MaxDef (m)</b>              | 0,63       | 0,65      |



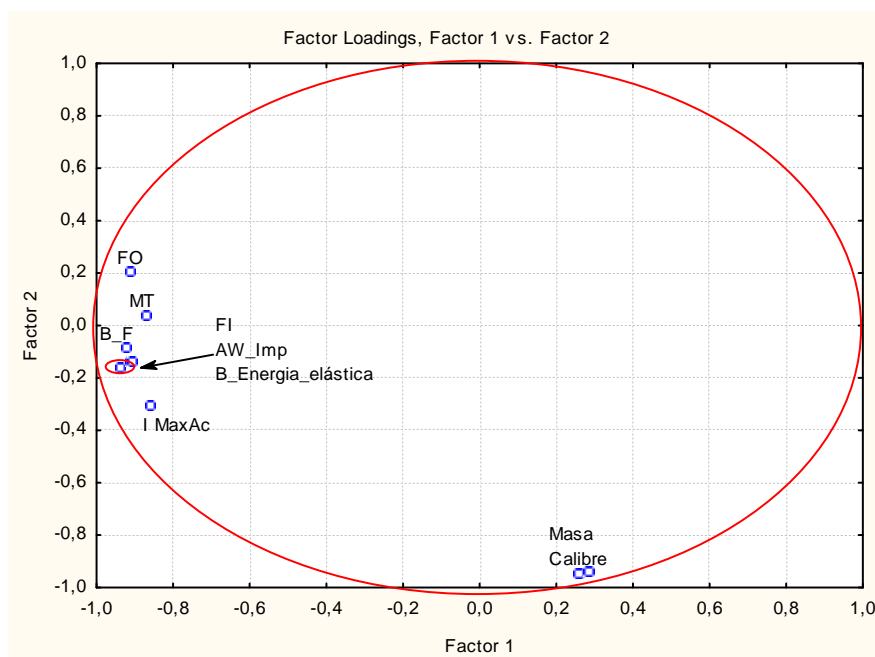


Figura 3. Análisis de componentes principales entre parámetros de referencia: firmeza magness-Taylor (MT), Maxima Fuerza en compresión esférica cuasiestática (B\_F) con parámetros acústicos y de impacto no destructivo y con la masa y calibre. N=400 medios frutos.

### 3.2 Ensayos LPF-TAG campaña 2007. Seguimiento de la maduración mediante técnicas acústicas y de impacto no destructivo.

El potencial de las medidas acústicas y de impacto para diferenciar estados de madurez (evolución fisiológica de la fruta en árbol y en postcosecha), se estudió mediante el análisis de la capacidad de los parámetros de AFS y el equipo de impacto LPF-TAG para distinguir entre frutos procedentes de diferentes fechas de recolección (maduración en árbol) y tratamientos (maduración postcosecha).

En un análisis de varianza realizado individualmente para cada parámetro (Tabla 6), se observó que los parámetros no destructivos que presentaron mayor potencialidad para el seguimiento de la evolución postcosecha corresponden a los obtenidos mediante el ensayo de impacto. En cuanto al seguimiento en árbol el AW\_F, parámetro de AWETA basado en el impacto, mostró la mayor capacidad de segregación (mayor F de Fisher).

Tabla 6. Análisis de varianza (ANOVA) realizado individualmente para cada parámetro. N=560

| ANOVA<br>(F) | Cosecha | Tratamiento |
|--------------|---------|-------------|
|--------------|---------|-------------|

|                    | <i>F</i> | <i>p</i> | <i>F</i> | <i>p</i> |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|
| Masa               | 533,00   | 0,0000   | 26,70    | 0,0000   |
| B_F                | 343,00   | 0,0000   | 1524,00  | 0,0000   |
| B_E.elást.         | 279,00   | 0,0000   | 1174,00  | 0,0000   |
| MT                 | 348,38   | 0,0000   | 192,96   | 0,0000   |
| I_MaxAc            | 131,48   | 0,0000   | 880,96   | 0,0000   |
| I_T(MaxAc)<br>(us) | 203,36   | 0,0000   | 303,60   | 0,0000   |
| I_MaxDef (m)       | 137,13   | 0,0000   | 565,61   | 0,0000   |
| AC_Rfrec (Hz)      | 294,94   | 0,0000   | 2,40     | 0,1222   |
| BM 40-90           | 77,93    | 0,0000   | 113,50   | 0,0000   |
| FI                 | 20,79    | 0,0000   | 202,24   | 0,0000   |
| FO                 | 243,08   | 0,0000   | 158,22   | 0,0000   |
| AW_F               | 435,08   | 0,0000   | 411,38   | 0,0000   |

En la Figura 4, se observa la evolución de las medias e intervalos de confianza (95%) para cada cosecha y fecha de recolección para esta medida, reflejándose la disminución del valor de I\_Max.Ac (m/s<sup>2</sup>) para los sucesivos tratamientos postcosecha.

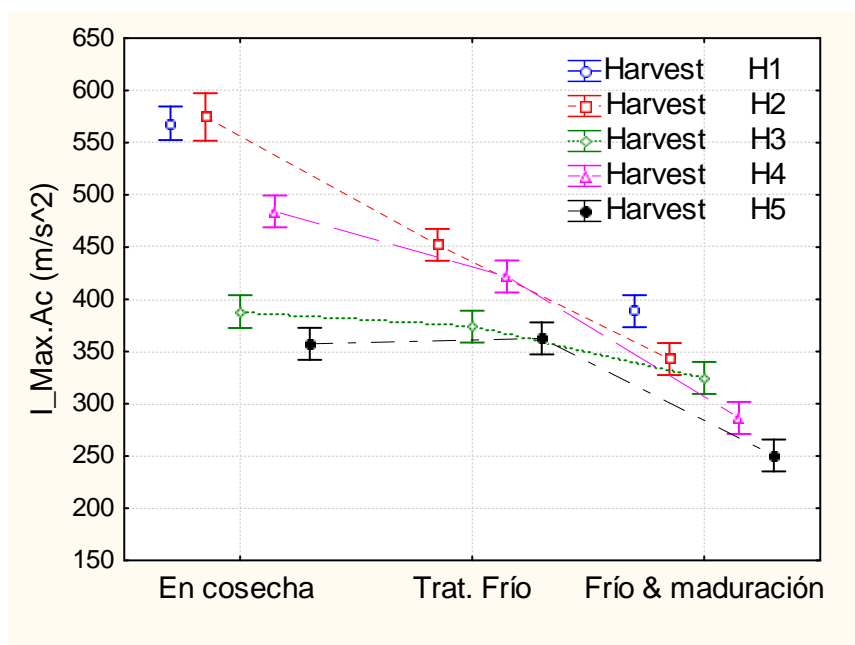


Figura 4. Medias e intervalos de confianza para I\_Max.Ac (m/s<sup>2</sup>). N=560 medios frutos.

La Tabla 7, muestra la correlación entre varios parámetros del AFS de AWETA y el impactador y equipo acústico LPF-TAG, así como con las variables de referencia destructivas.

Tabla 7. Tabla de correlación entre variables de referencia (en negrita) y los parámetros acústicos y de impacto no destructivo. N=560 medios frutos.

|  | <b>B_F (N)</b> | <b>B_E (N mm)</b> | <b>MT (N)</b> | $I_{MaxAc}$<br>(m/s <sup>2</sup> ) | $I_{TmaxAc}$<br>(us.) | $I_{MaxDef}$<br>(m) | AC_R<br>frec<br>(Hz) | BM<br>40-<br>90 | FI<br>(Hz.Hz.<br>kg <sup>2/3</sup> ) | FO (Hz) | AW_F  |
|--|----------------|-------------------|---------------|------------------------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|-----------------|--------------------------------------|---------|-------|
| <b>B_F (N)</b>                           | 1,00           | 0,98              | 0,80          | 0,78                               | -0,84                 | 0,81                | 0,40                 | -0,58           | 0,61                                 | 0,76    | 0,93  |
| <b>B_E (N mm)</b>                        | 0,98           | 1,00              | 0,76          | 0,76                               | -0,86                 | 0,83                | 0,37                 | -0,60           | 0,65                                 | 0,75    | 0,92  |
| <b>MT (N)</b>                            | 0,80           | 0,76              | 1,00          | 0,53                               | -0,78                 | 0,63                | 0,71                 | -0,51           | 0,39                                 | 0,82    | 0,86  |
| $I_{MaxAc}$<br>(m/s <sup>2</sup> )       | 0,78           | 0,76              | 0,53          | 1,00                               | -0,78                 | 0,92                | 0,26                 | -0,46           | 0,54                                 | 0,58    | 0,70  |
| $I_{TmaxAc}$<br>(us.)                    | -0,84          | -0,86             | -0,78         | -0,78                              | 1,00                  | -0,93               | -0,46                | 0,56            | -0,56                                | -0,78   | -0,88 |
| $I_{MaxDef}$<br>(m)                      | 0,81           | 0,83              | 0,63          | 0,92                               | -0,93                 | 1,00                | 0,31                 | -0,49           | 0,59                                 | 0,66    | 0,79  |
| AC_Rfrec<br>(Hz)                         | 0,40           | 0,37              | 0,71          | 0,26                               | -0,46                 | 0,31                | 1,00                 | -0,45           | 0,06                                 | 0,63    | 0,54  |
| BM 40-90                                 | -0,58          | -0,60             | -0,51         | -0,46                              | 0,56                  | -0,49               | -0,45                | 1,00            | -0,38                                | -0,59   | -0,62 |
| FI (Hz <sup>2</sup> *kg <sup>2/3</sup> ) | 0,61           | 0,65              | 0,39          | 0,54                               | -0,56                 | 0,59                | 0,06                 | -0,38           | 1,00                                 | 0,73    | 0,59  |
| FO (Hz)                                  | 0,76           | 0,75              | 0,82          | 0,58                               | -0,78                 | 0,66                | 0,63                 | -0,59           | 0,73                                 | 1,00    | 0,85  |
| AW_F                                     | 0,93           | 0,92              | 0,86          | 0,70                               | -0,88                 | 0,79                | 0,54                 | -0,62           | 0,59                                 | 0,85    | 1,00  |

#### 4. Conclusiones

De los resultados del ensayo acústico se deduce que la frecuencia resonante más relacionada con la firmeza del melocotón es la primera frecuencia resonante, probablemente la correspondiente a un modo de vibración esférico como se ha comprobado en otros frutos cuasi esféricos. El índice de firmeza (IF), que trata de corregir el efecto de la masa de un fruto en su frecuencia resonante, no presenta mejores correlaciones con las determinaciones de referencia (compresión con contacto esférico) que la frecuencia resonante (FO).

Tanto los parámetros de impacto como los acústicos han mostrado buenas posibilidades para la estimación no destructiva de la firmeza en melocotón. Así, se ha constatado la capacidad de dichos parámetros para la discriminación entre las muestras correspondientes a diferentes tratamientos o fechas de recolección.

#### Referencias

ISAFRUIT (2006-2009). *Increasing fruit consumption through a trans-disciplinary approach leading to high quality produce from environmentally safe, sustainable methods* (EU Project Ref. 016279).

Cooke, J. R. (1972). "An interpretation of the resonant behaviour of intact fruits and vegetables." *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 15: 1075-1080.

Chen, P. and M. Ruiz-Altisent (1996). *A low mass impact sensor for high-speed firmness sensing of fruits*. AgEng. Madrid, Paper no. 96F-003.

- De Ketelaere, B., M. S. Howarth, et al. (2006). "Postharvest firmness changes as measured by acoustic and low-mass impact devices: a comparison of techniques." *Postharvest Biology and Technology* 41(3): 275-284.
- Diezma-Iglesias, B., M. Ruiz-Altisent, et al. (2004). "Detection of Internal Quality in Seedless Watermelon by Acoustic Impulse Response." *Biosystems Engineering* 88(2): 221-230.
- Diezma-Iglesias, B., C. Valero, et al. (2006). "Monitoring of firmness evolution of peaches during storage by combining acoustic and impact methods." *Journal of Food Engineering* 77(4): 926-935.
- Farabee M; Stone M L (1991). Determination of watermelon maturity with sonic impulse testing. ASAE Paper No. 91-3013
- García-Ramos, F. J., J. Ortiz-Cañavate, et al. (2003). "Development and implementation of an on-line impact sensor for firmness sensing of fruits." *Journal of Food Engineering* 58(1): 53-57.
- Golding, J. B., L. Spohr, et al. (2005). "Nondestructive assessment of peach and nectarine firmness." *Acta Hort. (ISHS)* 687: 261-270.
- Herrero, A., L. Lleó, et al. (2007). Evaluación de técnicas no destructivas para la caracterización de firmeza en melocotón. Actas de IV Congreso Nacional de Agroingeniería. Albacete: 374-375.
- Slaughter, D. C., M. Ruiz-Altisent, et al. (2009). "A Handheld, Low-Mass, Impact Instrument to Measure Nondestructive Firmness of Fruit." *American Society of Agricultural and Biological Engineers. Transactions of the ASABE* 52(1).
- Studman, C. J. (2001). "Computers and electronics in postharvest technology -- a review." *Computers and Electronics in Agriculture* 30(1-3): 109-124.
- Taniwaki, M., T. Hanada, et al. (2009). "Non-destructive determination of the optimum eating ripeness of pears and their texture measurements using acoustical vibration techniques." *Postharvest Biology and Technology* 51(3): 305-310.