

Estimación del Volumen en Duraznos: Un Estudio preliminar con Procesamiento Digital de Imágenes

Luis Ernesto Ituarte
Universidad Nacional de Jujuy
San Salvador de Jujuy
Argentina

Resumen

Numerosos esfuerzos han sido efectuados para determinar el volumen de frutas empleando técnicas no destructivas. Entre ellas, el procesamiento digital de imágenes ha provisto soluciones en todo el mundo para manzanas, naranjas, peras y papayas. Sin embargo, existe información insuficiente para frutas como los duraznos. En Argentina, la estimación de volúmenes de frutas por procesamiento digital de imágenes es un tema de investigación substancial. De hecho, la producción de regiones como el NOA requiere de dicha tecnología para su mejoramiento. Debido a ello, este trabajo ha investigado una técnica no destructiva para estimar el volumen de duraznos. Dicha técnica ha sido basada en la segmentación de los mismos empleando dos imágenes ortogonales y diversos algoritmos. Uno de los resultados obtenidos fue un modelo de regresión lineal entre el volumen obtenido por la técnica de desplazamiento de agua y el volumen calculado por procesamiento digital de imágenes. Otro resultado fue la confirmación experimental de la correlación entre el peso y el volumen de los duraznos. Finalmente, el modelo de regresión lineal mencionado presentó un valor del coeficiente de determinación R^2 similar a otros trabajos científicos.

Abstract

Numerous efforts have been made to establish fruit volume through non destructive techniques. Among them, digital image processing has provided solutions all over the world to apples, oranges, pears and papayas. However, insufficient information exists for fruits like peaches. In Argentina, volume estimation of fruits using digital image processing is a significant research topic. In fact, regional produce of Northwestern Argentina requires this kind of technology for improvement. Owing to this argument, this work has research a nondestructive technique to estimate peaches volume. This technique has been based on peach segmentation using orthogonal images and various algorithms. First result was a linear regression model between volume computed by liquid displacement method and volume estimated by digital image processing. Second result was an experimental confirmation about correlation between peach weight and peach volume. Finally, this linear regression model showed a coefficient of determination R^2 that is similar to those found in other scientific works.

Palabras Clave

Durazno, volumen, procesamiento digital de imágenes.

Introducción

En los últimos años, ha aparecido un gran interés en desarrollar un sector industrial en la Argentina que se adapte al perfil de un país exportador de alimentos. Las ventajas para tal desarrollo han sido sostenidas por la masiva producción de materias primas como la soja, el trigo y las carnes vacunas. Específicamente, dicha producción ha sido exportada al mundo con parámetros de calidad internacional. Debido a ello, existe una necesidad de agregar valor a las materias primas producidas para consolidar este sector industrial nuevo que tiene a la industria procesadora de alimentos como principal motor económico.

En el caso particular del Noroeste Argentino (NOA), la instalación de cultivos complementarios a la producción tradicional ha llevado a los productores a considerar nuevas posibilidades. Este es el caso del cultivo de duraznos en la provincia de Jujuy. Dicho cultivo es un nicho viable para el productor jujeño porque es complementario al cultivo de tabaco tradicional. Asimismo, este nicho es competitivo porque accede anticipadamente a los mercados centrales de abastecimiento durante el año. Esta situación particular ha sido desarrollada gracias a las variedades tempranas de duraznos. De hecho, la provincia de Jujuy es una de las dos regiones que podrían proveer duraznos en el periodo inicial de la temporada.

Para mejorar el procesamiento de duraznos, la medición de parámetros de calidad empleando tecnologías no destructivas se ha convertido en un tema significativo para los productores del sector alimenticio. Algunos parámetros de calidad observados son el peso y el volumen del durazno. Por otro lado, el procesamiento digital de imágenes ha contribuido frecuentemente a incorporar tecnología novedosa para estimar características geométricas y para inspeccionar defectos superficiales. Un detalle revelador es que el volumen y el peso pueden ser estimados conjuntamente con las tareas de inspección de defectos. De hecho, esta tecnología no destructiva supera a otros sensores por la multiplicidad de tareas que puede realizar simultáneamente (Ej.: inspección y clasificación). Todos estos aspectos han sido estudiados previamente.

En este plano tecnológico, las contribuciones realizadas para estimar el volumen de frutas han sido numerosas. Primero, Forbes y Tattersfield (1999) han estimado el volumen de peras de tipo “Bon Cretien” utilizando seis imágenes digitales y una red neuronal para el cálculo del factor de transformación entre el área proyectada y el volumen estimado. También, ellos han señalado que la raíz cuadrática media (RMS) del error para una pera aleatoria fue de $6,2 \text{ cm}^3$. Segundo, Hahn y Sánchez (2000) han estimado el volumen de zanahorias utilizando dos imágenes digitales ortogonales. Adicionalmente, ellos efectuaron una comparación entre dos algoritmos de procesamiento digital de imágenes. Sus resultados en la estimación de volumen fueron de un error medio de $0,838 \text{ cm}^3$. Tercero, Brosnan y Sun (2002) han completado una revisión de los métodos para calcular el volumen de frutas diversas. En el caso de los duraznos, ellos señalaron que existían investigaciones sobre la madurez de los duraznos y su correlación con el color del mismo. Cuarto, Du y Sun (2004) han efectuado una revisión de literatura posterior y han coincidido con Brosnan y Sun en que el análisis del color era la técnica principal para evaluar los duraznos. Quinto, Riyadi et al. (2007) han construido un sistema de clasificación de Papayas basado en el volumen de las mismas. Específicamente, el error promedio obtenido fue del 7%. De hecho, ellos han sostenido que el sistema diseñado ha clasificado correctamente el 90 % de la muestra. Sexto, Moreda et al. (2009) han elaborado una revisión de técnicas no destructivas para determinar el volumen de frutas y hortalizas. En sus conclusiones, ellos han afirmado que los sistemas de dos dimensiones (2D) de Visión por Computador han sido efectivos

en los últimos tiempos. Razón por la cual, ellos han sostenido que la tecnología adecuada para los duraznos es ésta, junto al pesaje electrónico. Finalmente, Omid et al. (2010) han medido naranjas y otros citrus utilizando dos vistas y algoritmos de análisis de color para la estimación de volumen. De hecho, ellos han afirmado que el modelo desarrollado por regresión lineal obtuvo una precisión de 97% en promedio.

Sin embargo, los trabajos previos en el área de estimación de volúmenes han sido concentrados sobre frutas y hortalizas como las papayas, las naranjas, las peras y las zanahorias. De hecho, los intentos para establecer un sistema de estimación de volumen para duraznos utilizando procesamiento digital de imágenes son escasos y diversos.

El propósito de este trabajo es efectuar un estudio experimental basándose en una muestra de duraznos aleatoria, con la expectativa de replicar algunos resultados experimentales realizados por otros investigadores en el mundo. Para tal fin, este trabajo muestra un diseño experimental de bajo costo, basado en dos vistas ortogonales por cada durazno, y una comparación con las mediciones de volumen efectuadas por la técnica del desplazamiento de agua. Finalmente, el trabajo describe el desarrollo de un modelo de regresión lineal para estimar el volumen de cada durazno basándose en dos imágenes ortogonales y en el procesamiento digital de las mismas por segmentación de colores.

Métodos

Los métodos empleados en este trabajo de investigación para medir el volumen de duraznos han sido numerosos. Algunos de ellos han empleado técnicas experimentales clásicas como la medición del volumen por la técnica de desplazamiento de agua. Otros métodos han utilizado técnicas novedosas para la estimación del volumen como el procesamiento digital de imágenes. Sin embargo, todos ellos han constituido un esquema de complementación mutua que sirvió para efectuar una comparación precisa en la determinación de volúmenes de estas frutas.

El primer método trabajado fue la medición del volumen de cada durazno utilizando la técnica del desplazamiento de agua. Esta técnica ha empleado una probeta graduada de vidrio y una balanza de precisión. En este caso, la probeta era de escala 0 a 250 ml y la balanza era de tipo electrónica y de escala 0 a 3 Kgf. Asimismo, la técnica de desplazamiento de agua ha calculado indirectamente el volumen de cada durazno empleando la siguiente ecuación:

$$V_{Durazno} = \frac{M_1 + M_2 - M_3}{\rho_{Agua}} \quad (Ec. 1)$$

donde M_1 es la masa de la probeta llena de agua hasta la marca establecida, M_2 es la masa de cada durazno, M_3 es la masa del conjunto probeta - durazno hasta la marca establecida, y ρ_{Agua} es la densidad del agua. Los detalles constructivos de esta probeta graduada pueden leerse en el trabajo de Forbes et al. (1999). Asimismo, los volúmenes medidos de los duraznos estaban entre 80 cm³ y 275 cm³.

Seguidamente, el segundo método aprovechado fue la adquisición de dos imágenes de cada durazno. Efectivamente, la adquisición de las mismas ha sido efectuada en dos etapas. La primera etapa capturó la imagen en el plano X-Z y la segunda etapa consiguió la imagen en el plano X-Y (Ver Fig. 4). Esta disposición ha sido obtenida por Omid et al. (2010) al emplear dos cámaras simultáneas y un dispositivo de iluminación central apropiado. De todos modos, la adquisición de imágenes fue simplificada a una

sola vista al utilizar un dispositivo de rotación. Para tal fin, el durazno fue posicionado en un dispositivo mecánico que permitió rotar del plano X-Z al plano X-Y, efectuando un giro de 90°. En este caso, la adquisición de las imágenes ha sido efectuada con una cámara digital (Fujifilm™ Finepix A202, 2.0 megapíxeles), sin flash y con iluminación difusa. Es importante aclarar que la adquisición de imágenes de los duraznos fue mejorada aprovechando el contraste de un fondo opaco de color gris.

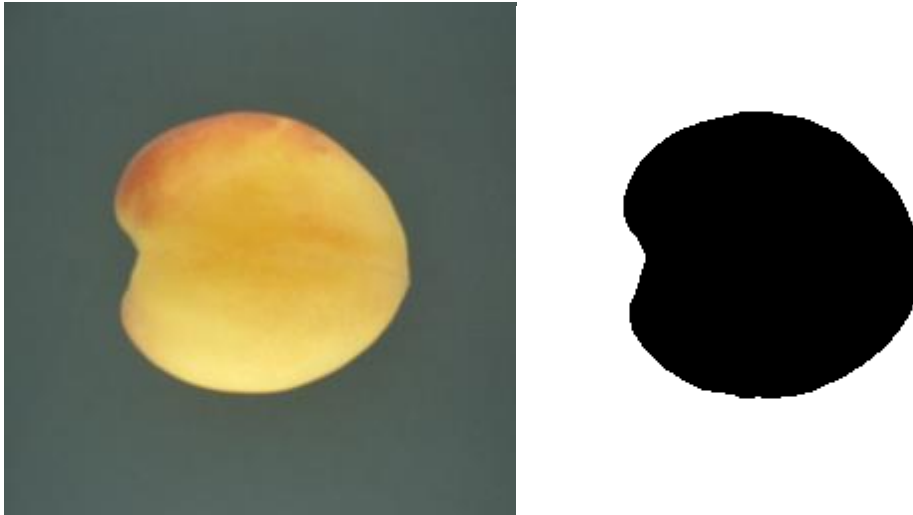
A continuación, el tercer método usado fue el procesamiento digital de las dos imágenes obtenidas. Este procesamiento ha incluido varias etapas. La primera de ellas ha sido la transformación de las imágenes obtenidas por la cámara digital a un modelo de color diferente. Específicamente, las mismas han sido almacenadas en el modelo RGB. Este modelo representa cada color por la combinación de sus componentes Rojo (R), Verde (G) y Azul (B). De tal modo, la transformación requerida para estas dos imágenes ha sido la transformación del modelo RGB al modelo HSI. En este caso, el modelo HSI es un modelo que compone los colores a través de tres componentes: tono (H), saturación (S) e intensidad (I). Par tal fin, González et al. (1993) enunció las siguientes ecuaciones de transformación:

$$I = \frac{1}{3} (R + G + B) \quad (\text{Ec. 2})$$

$$S = 1 - \left\{ \frac{3}{(R + G + B)} [\min(R, G, B)] \right\} \quad (\text{Ec. 3})$$

$$H = \cos^{-1} \left\{ \frac{\frac{1}{2} [(R - G) + (R - B)]}{[(R - G)^2 + (R - B)(G - B)]^{1/2}} \right\} \quad (\text{Ec. 4})$$

Esta transformación, desde el modelo RGB al modelo HSI, ha constituido el procesamiento de segmentación principal de los duraznos de color amarillo-rojo respecto al fondo opaco de color gris. De hecho, la imagen H de cada durazno ha incorporado la información completa del área proyectada desde la vista de la única cámara. Esta situación se observa detalladamente en la Fig. 1. Seguidamente, la segunda etapa en el procesamiento digital de las imágenes adquiridas ha sido un filtrado de mediana para eliminar el ruido presente en ellas. Es importante aclarar que las imágenes procesadas no poseían duraznos con hojas ni tallos. Finalmente, la tercera etapa del procesamiento de imágenes ha sido la binarización mediante la detección de un umbral global. Para tal fin, la selección del umbral ha sido efectuada por el análisis del histograma de intensidades de la imagen digital, según lo detalló Davies (1997).



**Fig. 1 – Segmentación por transformación de modelo RGB en modelo HSI.
a) Imagen de Durazno, b) Imagen de tono (H) de Durazno.**

Finalizado el procesamiento digital de imágenes, el cuarto método fue la estimación del volumen de cada durazno utilizando las imágenes procesadas. Para cumplir este objetivo, el volumen de cada durazno (V_{IP}) ha sido subdividido en pequeñas secciones, respecto al eje X (Ver Fig. 2).

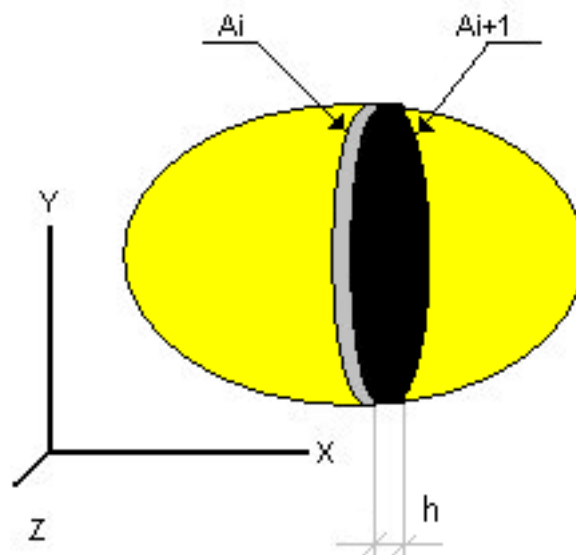


Fig. 2 – Detalles de áreas y diámetros para el cálculo analítico del volumen V_i

Estas secciones poseen el volumen aproximado de un frustum que ha sido denominado V_i . Un frustum es una porción de una figura geométrica (Usualmente un cono ó una pirámide) comprendida entre dos planos paralelos (Ver Fig. 3).

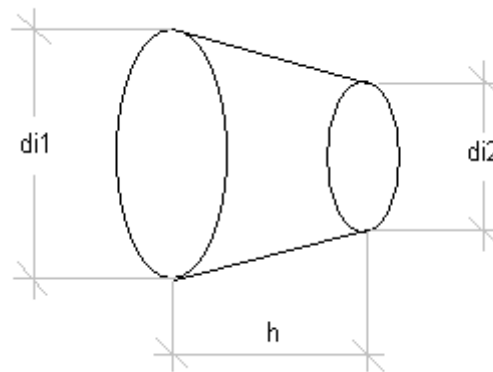


Fig. 3 – Descripción de un frustum cónico.

Por ejemplo, las intersecciones del objeto sólido con un plano cortante son las bases del frustum respectivo. Asimismo, el eje del frustum es el mismo que el del objeto original (En este caso, el eje X). Debido a ello, cada frustum ha requerido para calcular su volumen individual tres atributos geométricos: las áreas transversales (A_i y A_{i+1}) ó bases y el espesor de cada una de ellas (h), respecto al eje X. Si asumimos que las áreas transversales eran elípticas, la expresión aplicada por Omid et al.(2010) definió el cálculo de las mismas, basándose en las imágenes ortogonales:

$$A_i = \pi \left(\frac{d_{i1}}{2} \right) \left(\frac{d_{i2}}{2} \right) \quad (Ec. 5)$$

Aquí, d_{i1} era el diámetro del frustum establecido por la imagen de la vista 1. En el otro caso, d_{i2} era el diámetro del frustum obtenido por la imagen de la vista 2 y perpendicular al d_{i1} . Los detalles de la digitalización para calcular los diámetros pueden observarse en la Fig. 4.

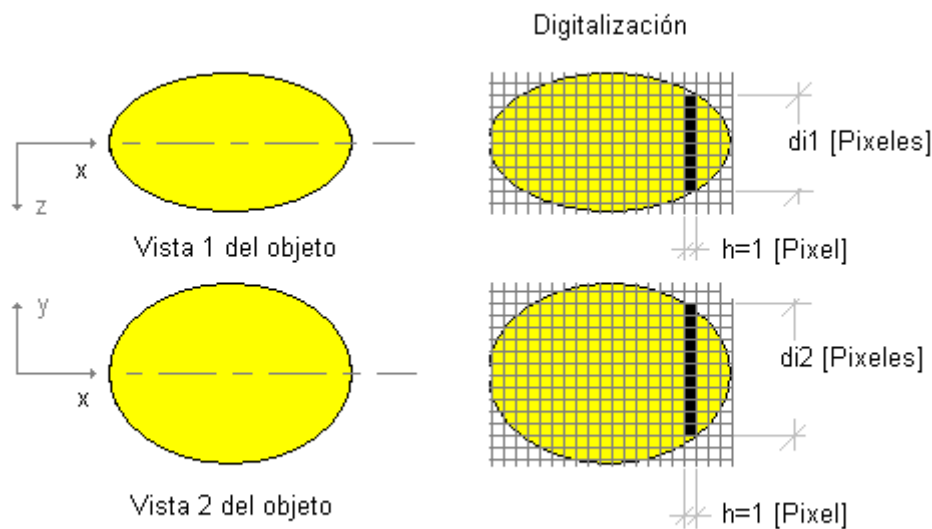


Fig. 4 – Detalle del proceso de Digitalización de las vistas 1 y 2 de cada objeto (Durazno), para calcular los diámetros d_{i1} y d_{i2} .

Una vez que las áreas transversales ó bases del frustum han sido obtenidas (Ver descripción en la Fig. 5), el volumen de cada uno de ellos fue determinado por la siguiente ecuación:

$$V_i = \left(\frac{A_i + A_{i+1}}{2} \right) h \quad (\text{Ec. 6})$$

Estos detalles también se pueden ilustrar en el esquema de la Fig. 2.

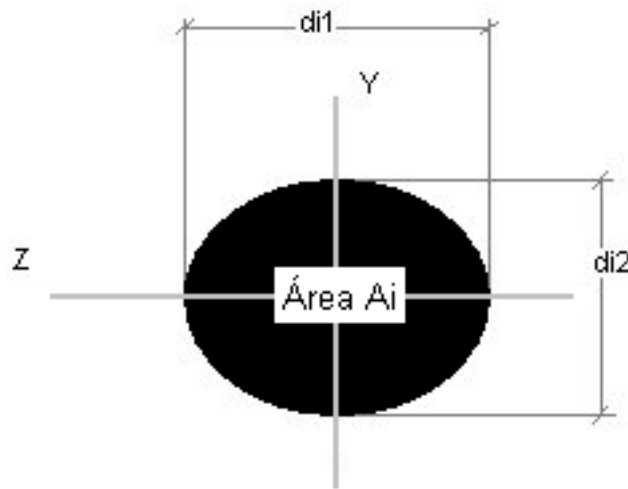


Fig. 5 – Descripción del Área transversal A_i obtenida a través del proceso de Digitalización de las vistas 1 y 2 de cada objeto (Durazno).

Posteriormente, la estimación del volumen total del durazno pudo efectuarse sumando todos los volúmenes individuales de cada frustum. De esta forma, la estimación del volumen total era:

$$V_{IP} \cong \sum_{i=1}^n V_i \quad (\text{Ec. 7})$$

Finalmente, el quinto método elegido fue la regresión lineal entre el volumen obtenido por la técnica de desplazamiento de agua y el volumen estimado por los algoritmos de procesamiento digital de imágenes. De hecho, el cálculo de la ecuación de regresión y del coeficiente de determinación R^2 fue efectuada utilizando MINITAB® 13 para Windows.

Por otra parte, la muestra estudiada fue de 65 duraznos, sin características particulares para su elección. Dicha muestra fue recolectada desde diversos puntos de venta y con distintas variedades de duraznos. Asimismo, la imagen de cada uno de ellos estaba en color RGB y fue de un tamaño de 256 x 256 píxeles. Seguidamente, la imagen segmentada del Tono (H) fue de 256 x 256 píxeles y 256 niveles de grises. Finalmente, la imagen empleada para estimar el volumen era binaria (Objeto de color negro) y de 256 x 256 píxeles.

Resultados

Los resultados obtenidos en este trabajo de investigación son diversos. La mayoría de los mismos refleja los esfuerzos para obtener un modelo de regresión utilizable para la estimación del volumen de cada durazno.

Primero, la segmentación por procesamiento digital de imágenes fue construida merced a la incorporación de la transformación del modelo RGB al modelo HSI. Específicamente, la imagen del Tono (H), que separó la imagen del área proyectada del durazno y la imagen del fondo, fue producida por dicha transformación. La Fig. 6 ilustra ejemplos de esta segmentación para varios duraznos. Asimismo, la Fig. 7 ejemplifica la asimetría de algunas de las áreas segmentadas.

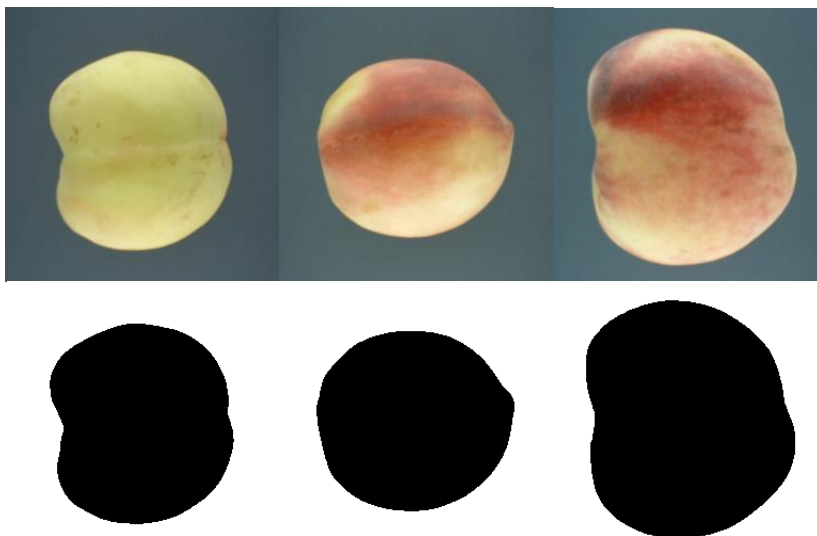


Fig. 6 – Ejemplos de Segmentación por transformación de modelo RGB en modelo HSI.
a) Imágenes de Duraznos, b) Imágenes de Tono (H) de Duraznos.

Segundo, el cálculo analítico del volumen a través de las áreas ortogonales presentó dificultades en su aplicación directa. De hecho, la fórmula analítica empleada fue diseñada para áreas ortogonales de forma elipsoidal. Debido a ello, la fórmula carece de capacidad para computar las concavidades internas de los duraznos. Esta situación debe ser corregida a través de otros métodos como, por ejemplo, un modelo de regresión lineal.

Tercero, la adquisición de imágenes ortogonales presentó imprecisiones en la posición angular de los duraznos. Estas imprecisiones pueden ser provocadas por el giro mecánico del durazno. Dicho giro sigue la curvatura del durazno que está influenciada por su asimetría. Un ejemplo de esta asimetría es ilustrada en la Fig. 7 para dos imágenes ortogonales de un mismo durazno. La Fig. 7 muestra como el durazno de la imagen a 0° (Plano X-Z) se desplaza hacia abajo cuando se efectúa la captación de la imagen a 90° (plano X-Y).

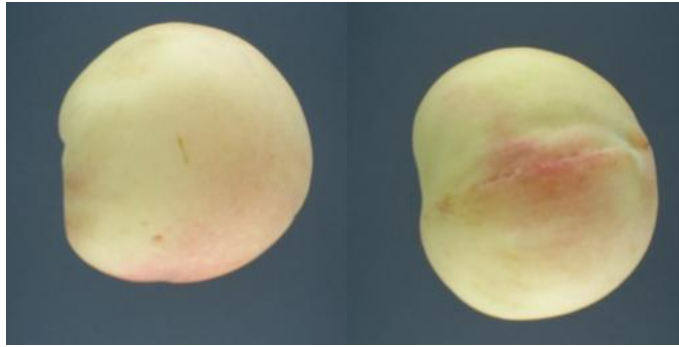


Fig. 7 – Desplazamiento mecánico del Durazno por asimetría
a) Imagen a 0° (Plano XZ), b) Imagen a 90° (Plano XY).

Cuarto, la correlación entre el peso y el volumen de los duraznos ha sido significativa. Concretamente, el valor del coeficiente de correlación de Pearson fue de $r = 0,986$ para la muestra observada. Un valor idéntico de coeficiente de correlación ($0,986$) fue obtenido por Hahn y Sánchez (2000) para la estimación del volumen de zanahorias. Adicionalmente, la Tabla 1 detalla la estadística descriptiva de la masa (obtenida por la medición en balanza electrónica) y el volumen (obtenido por la técnica de desplazamiento de agua) de los duraznos de la muestra investigada.

Tabla 1 – Estadística descriptiva de la masa y del volumen de los Duraznos de la muestra

Estadística descriptiva	Duraznos	
	Masa gr	Volumen cm ³
Media	171,323	177,754
Desviación estándar	47,688	47,376
Varianza	2274,19	2244,5
Mínimo	78	80
Máximo	279	275
Intervalo de Confianza (95%)	[159,506; 183,140]	[166,015; 189,493]

Quinto, un modelo de regresión lineal fue calculado con los volúmenes medidos por la técnica de desplazamiento de agua (VDA) y con los volúmenes calculados por el procesamiento digital de imágenes (VPDI). El valor del coeficiente de determinación R^2 fue de 95,5% para este modelo. Esto significa que el 95,5% de las variaciones observadas en el volumen VDA pueden ser explicadas por la relación lineal aproximada entre Volumen VDA y Volumen VPDI. Para tal fin, la ecuación de regresión simple fue la siguiente:

$$VDA = 36,0429 + (0,562941 VPDI) \quad (Ec. 8)$$

donde las unidades de volumen están en cm^3 . La Fig. 8 muestra el diagrama bivariante junto a la línea de mínimos cuadrados computada por MINITAB.

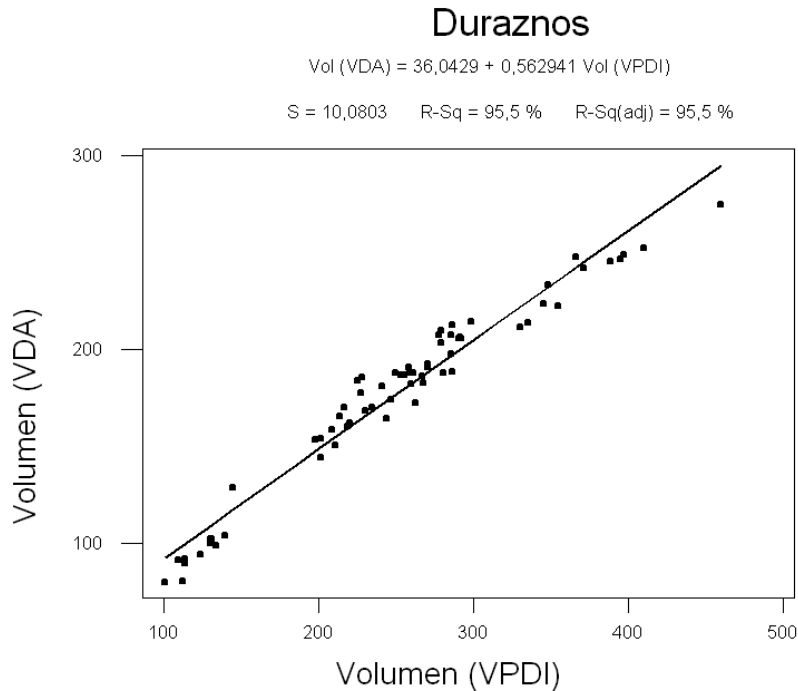


Fig. 8 – Modelo de Regresión simple para la estimación de volumen de Duraznos

Este resultado es similar al obtenido por Omid et al. (2010) para diversos frutos como la lima, el limón y la naranja. Asimismo, la hipótesis de normalidad de los residuos fue observada en forma gráfica (Ver Fig. 9).

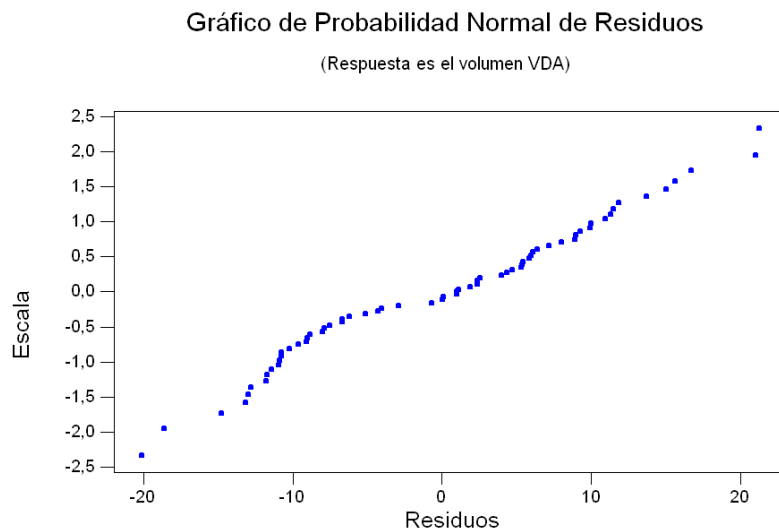


Fig. 9 – Gráfico de Probabilidad Normal para Residuos de la muestra de Duraznos

Discusión

En este trabajo de investigación, se ha desarrollado un sistema de estimación de volumen de duraznos basado en imágenes digitales. Para tal fin, el trabajo ha incluido algoritmos de segmentación propios del procesamiento digital de imágenes.

Seguidamente, el trabajo ha aportado numerosas conclusiones sobre la estimación de volumen en duraznos.

Primero, existe la posibilidad de estimar el volumen de un durazno sin someterlo a esfuerzos destructivos. Esta posibilidad esta sustentada en la correlación significativa entre el peso y el volumen de un durazno. De hecho, la correlación ha sido confirmada por las mediciones experimentales efectuadas con balanza electrónica y con la técnica de desplazamiento de volumen de agua durante este trabajo. En este caso particular, el valor del coeficiente de correlación de Pearson fue de 0,986.

Segundo, el modelo de regresión lineal es una alternativa para estimar provisoriamente el volumen de un durazno utilizando el área proyectada por dos imágenes ortogonales del mismo. En este trabajo, el modelo de regresión lineal desarrollado entre el volumen experimental y el volumen estimado ha presentado un coeficiente de determinación $R^2 = 95,5\%$.

Tercero, la asimetría de la forma de los duraznos es un factor a observar en los cálculos de volumen. Por un lado, esta asimetría complica el cálculo analítico de las áreas transversales al contradecir sus hipótesis iniciales (Ej.: las áreas transversales deberían ser de forma elipsoidal). Por otro lado, la asimetría modifica la posición del durazno durante el movimiento de rotación. Esta situación origina errores de procesamiento en la determinación de los diámetros ortogonales del mismo.

Cuarto, la disposición de dos cámaras perpendiculares que actúan en forma simultánea podría ser una alternativa superior a la investigada. Dicha disposición reduciría el error de desplazamiento inducido por la rotación mecánica.

Quinto, el contraste entre el durazno y su entorno ha facilitado significativamente la segmentación digital de los objetos. Dicha segmentación ha sido establecida por análisis de color. En este caso, la transformación del modelo RGB al modelo HSI ha sido crucial para el desarrollo del modelo. De hecho, la imagen de Tono (H) ha presentado resultados estables para el procesamiento digital en toda la muestra.

Sexto, El valor del coeficiente de determinación R^2 ha sido similar a los obtenidos por Omid et al. (2010) en sus investigaciones sobre naranjas, limas y limones.

Desafortunadamente, estamos inhabilitados por los resultados obtenidos en esta muestra para afirmar que el modelo sea representativo de cualquier variedad de durazno cultivada en Jujuy. Dicha situación podría requerir una muestra de mayor cantidad.

Finalmente, los trabajos de investigación futuros en esta área deberían ser dirigidos a elaborar una estimación más precisa del volumen del durazno utilizando algunos descriptores adicionales. A posteriori, los trabajos de investigación deberían ser orientados hacia el desarrollo de un clasificador de duraznos basado en técnicas de visión de computador y de reconocimiento de patrones.

Referencias

- [1] Brosnan, T.; Sun, D.W. 2002. Inspection and grading of agricultural and food products by computer vision systems – a review. *Computers and Electronics in Agriculture* 36, pp. 193-213.
- [2] Davies, E.R. 1997. *Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities*. 2nd. Ed. Academic Press. UK.
- [3] Du, C.; Sun, D. 2004. Recent developments in the applications of image processing techniques for food quality evaluation. *Trends in Food Science & Technology* 15, pp. 230-249.

- [4] Forbes, K. A.; Tattersfield, G.M. 1999. Estimating Fruit Volume from Digital Images. Fifth Africon Conference in Africa: Africon, vol. 1. IEEE, Los Alamitos, Cal., USA, pp. 107-112.
- [5] Gonzalez, R.C.; Woods, R.E. 1993. Digital Image Processing. Addison-Wesley Publishing Company. USA.
- [6] Hahn, F.; Sanchez, S. 2000. Carrot Volume Evaluation using Imaging Algorithms. Journal of Agricultural Engineering Research 75 (3), pp. 243-249.
- [7] Moreda, G.P.; Ortiz-Cañavate, J.; García-Ramos, F.,J.; Ruiz-Altisent, M. 2009. Non-destructive Technologies for fruit and vegetable size determination – a review. Journal of Food Engineering 92, pp. 119-136.
- [8] Riyadi, S.; Mustafa, M.; Hussain, A.; Hamzah, A. 2007. Papaya fruit grading based on size using image analysis. Proceedings of the International Conference on Electrical and Informatics. Institut Teknologi Bandung. Indonesia, June 17-19.
- [9] Omid, M; Khojastehnazhand, M.; Tabatabaeefar, A. 2010. Estimating volume and mass citrus fruits by image processing technique. Journal of Food Engineering 100, pp. 315-321.

Datos de Contacto:

*Luis E. Ituarte.
Universidad Nacional de Jujuy
Gorriti 237
(4600) San Salvador de Jujuy
Jujuy
Email: lituarte@fi.unju.edu.ar.*