



Estudio de la evolución de la calidad de granada 'Mollar de Elche' durante su maduración usando sistemas de visión artificial

S. Munera¹, F. Hernández², N. Aleixos³, S. Cubero¹, J. Blasco^{1*}

¹ Centro de Agroingeniería, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA). Carretera CV-315, Km 10.7, 46113 Moncada, España; blasco_josiva@gva.es

² Grupo de Fruticultura y Técnicas de Producción. Departamento de Producción Vegetal y Microbiología, Universidad Miguel Hernández de Elche, Carretera de Beniel, Km 3.2, 03312 Orihuela, España

³ Departamento de Ingeniería Gráfica, Universitat Politècnica de València. Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España.

Resumen: En el presente trabajo se ha estudiado la capacidad de la visión artificial para monitorear la evolución de diferentes propiedades fisicoquímicas de la granada 'Mollar de Elche' durante su madurez. Para ello se han obtenido imágenes hiperespectrales y RGB de 30 frutas intactas y sus arilos durante siete recolecciones consecutivas cada 2 semanas (210 frutos en total). En cada fruta se han medido las propiedades de peso, diámetro, sólidos solubles totales (SST), acidez, la actividad antioxidante y el contenido en fenoles totales. Posteriormente, la información espectral (450-1050 nm) y de color (L^* , a^* y b^*) obtenida de las imágenes de las frutas intactas y arilos se ha correlacionado con las propiedades fisicoquímicas mediante el método multivariante de mínimos cuadrados parciales. En el caso de fruta intacta, ambos métodos de visión obtuvieron resultados de predicción similares en todos los parámetros excepto en la actividad antioxidante, donde la imagen hiperespectral fue más precisa. En general, los parámetros predichos por estas técnicas que mayor precisión obtuvieron ($R^2 = > 0,75$; $RPD = > 2$) fueron el índice de madurez y $BrimA$, los parámetros de color de los arilos L^* y a^* , la actividad antioxidante y los fenoles totales. Sin embargo, en el caso de los arilos, la imagen hiperespectral predijo la mayoría de parámetros de manera más precisa ($R^2 = > 0,75$; $RPD = > 2$) que la imagen RGB, la cual no obtuvo valores de $R^2 = > 0,75$ y $RPD = > 2$ en ningún parámetro. Estos resultados indican el gran potencial de la visión artificial, especialmente la imagen hiperespectral, para evaluar las propiedades de calidad de granadas intactas y de los arilos, ofreciendo la posibilidad de determinar el procesamiento al que irán destinadas estas frutas de manera no destructiva y rápida.

Palabras clave: *Punica granatum*, madurez, no destructivo, imagen hiperespectral, RGB

1. Introducción

Hoy en día, la granada (*Punica granatum* L.) ha ganado gran importancia porque es una fuente de azúcares, ácidos orgánicos y compuestos bioactivos [1] que reportan beneficios positivos para la salud [2].

La calidad comercial de esta fruta se basa en atributos externos como el tamaño, la forma y el color [3]. Sin embargo, el color de la corteza no siempre indica su idoneidad para el consumo. Se deben considerar también los atributos internos, como los sólidos solubles totales y la acidez, que deben satisfacer los requisitos del mercado [4,3]. Dado que la granada es una fruta no

climática, es muy importante que las frutas se cosechen en su etapa de maduración adecuada para obtener su mayor potencial con respecto a las propiedades nutricionales, funcionales y sensoriales [5].

Hoy en día, el control de calidad de la granada todavía se realiza por métodos tradicionales. Esto se debe principalmente a que tanto la corteza como los arilos son delicados y pueden dañarse por las operaciones mecánicas, pero también porque su producción es relativamente baja y no hay máquinas adaptadas. Sin embargo, se está empezando a realizar un esfuerzo científico para crear nuevas técnicas no destructivas basadas en imagen con este objetivo, como los rayos X para cuantificar el volumen de las diferentes partes de esta fruta [6, 7] y para detectar la enfermedad del corazón negro y la carpocapsa [8]. La resonancia magnética nuclear se ha utilizado para determinar el efecto de los cambios fisiológicos inducidos por *Alternaria* y *Aspergillus*, y para detectar el fenómeno de corazón negro [9]. También se ha desarrollado un sistema de visión artificial para clasificar los arilos en diferentes categorías según el color (arilos buenos, inmaduros o podridos) en tiempo real [10]. Este sistema también podía separar los arilos de otros materiales, como trozos de cáscara o membranas internas.

La imagen hiperespectral, que integra información tanto espectral como espacial [11], se ha aplicado como una poderosa herramienta de procesamiento analítico para una inspección rápida y no destructiva de los atributos de calidad internos y externos en frutas con corteza [12] como la naranja [13], la lima [14] o el plátano [15]. Sin embargo, el uso de la imagen multiespectral sólo ha sido investigado para determinar la textura y los sólidos solubles totales (SST) de granada intactas [16].

De acuerdo con esto, el objetivo del presente estudio ha sido evaluar la capacidad de ambas técnicas de visión artificial, color e imágenes hiperespectrales, para predecir las propiedades fisicoquímicas y la etapa de madurez de los frutos de granada 'Mollar de Elche' utilizando tanto la información de las frutas intactas como de los arilos.

2. Materiales y métodos

2.1. Muestras

Para la realización de este estudio se utilizaron un total de 210 granadas "Mollar de Elche" recolectadas en un huerto comercial ubicado en San Isidro (Alicante, España). Se realizaron siete recolecciones durante la temporada 2018, desde finales de julio (90 días después de la floración) hasta finales de octubre (180 días después de la floración) cuando las frutas estaban maduras. En cada recolección, se recolectaron al azar 30 frutos sin daños externos.

En todas ellas se limpiaron todas las frutas, se pesaron y se les midió el diámetro ecuatorial. Luego, se capturaron imágenes de todas las frutas como se explica en la siguiente sección. Después, los arilos se extrajeron cuidadosamente a mano. Se seleccionaron al azar un total de 20 arilos por fruta y se eliminó la humedad de la superficie utilizando papel, para posteriormente adquirir imágenes de los mismos. El resto de los arilos se exprimieron y el zumo resultante se usó para analizar las propiedades químicas de cada fruta.

2.2. Adquisición y procesado de las imágenes de color e hiperespectrales

Las imágenes de color de las frutas intactas y arilos se tomaron con una cámara réflex (Canon EOS 550D, Canon Inc. Japón), con un tamaño de 2592 x 1944 píxeles. A partir de estas imágenes se obtuvieron los valores medios de las coordenadas de color en el espacio CIELAB L^* , a^* , b^* . Para esto se utilizó un software de análisis de imagen desarrollado en el IVIA (FoodImage-Inspector v4.0, disponible en <http://www.cofilab.com>).

Las imágenes hiperespectrales de las frutas intactas y los arilos se obtuvieron por medio del uso de una cámara industrial (CoolSNAP ES, Photometrics, AZ, USA) acoplada a un filtro sintonizable de cristal líquido (Varispec NIR-07, Cambridge Research & Instrumentation, Inc.,

MA, USA), capaz de adquirir imágenes entre 720 nm y 1050 nm. El sistema se configuró para capturar imágenes de 1392 x 1040 píxeles con una resolución espacial de 0,14 mm/píxel cada 10 nm. La iluminación consistió en 12 halógenos que iluminaron la escena indirectamente por medio de reflexión difusa, en una cúpula de aluminio donde las muestras se introducían manualmente. Una vez capturadas las imágenes, se obtuvo el espectro promedio de todos los píxeles de la fruta intacta y arilos utilizando el programa HYPER-Tools [17] para MATLAB (The MathWorks, Inc. MA, EE. UU.).

2.3. *Análisis de referencia*

La medición de los SST se realizó por medio del uso de un refractómetro digital (Atago N-20, Atago, Bellevue, Wash., U.S.A.) y la acidez se midió usando un potenciómetro ácido-base (Titrino plus 877, Metrohm AG, Herisau, Switzerland). Los resultados se expresaron como % de SST y g ácido cítrico por L de zumo, respectivamente. Con estos parámetros se obtuvo el índice de madurez (SST/acidez) y el índice BrimA ($SST \cdot k \cdot \text{acidez}$; $k=2$).

El contenido de compuestos fenólicos totales (CFT) se determinó utilizando el método de Folin-Ciocalteu [18]. El resultado fue expresado en g de equivalentes de ácido gálico por litro de zumo (g/L).

El análisis de la actividad antioxidante (AA) se realizó por medio de la determinación de la capacidad de captación de radicales libres usando el método del radical DPPH [19]. Los resultados se expresaron como mmol equivalentes de Trolox por litro (mmol Trolox/L).

Finalmente se realizó un análisis de la varianza (ANOVA) y un test de Tukey para determinar la existencia de diferencias estadísticas entre las propiedades fisicoquímicas con respecto a las diferentes recolecciones.

2.4. *Análisis multivariante*

Para predecir las propiedades de las frutas se utilizó la regresión basada en mínimos cuadrados parciales (PLS-R). Para la construcción de los modelos se usaron dos tercios de la información de las muestras y el tercio restante se utilizó para validarlo. Los resultados de los modelos fueron expresados en base al coeficiente de determinación (R^2), al error cuadrático medio (RMSE) y a la desviación predictiva residual (RPD), definida como la relación entre la desviación estándar de los datos de referencia y RMSE de la validación externa, y que indica el poder de predicción del modelo [20].

3. Resultados y discusión

3.1. *Análisis de referencia*

La Tabla 1 resume los resultados obtenidos del análisis de las propiedades fisicoquímicas medidas en las muestras de fruta intacta y en el zumo de las frutas en cada recolección.

El peso aumentó de 237 g en la primera recolección a 456 g en la última, mientras que el diámetro ecuatorial aumentó de 78,9 mm a 95,6 mm. Según las especificaciones de la Denominación de Origen Protegida “Granada Mollar de Elche” [21], deben excluirse las frutas que pesen menos de 125 gramos.

El contenido en SST aumentó de 12,0 % en la primera recolección a 16,6 % en la última, siendo los valores de las últimas tres recolecciones no estadísticamente diferentes. Por el contrario, la tendencia de la acidez fue una disminución durante la madurez. En general, los valores de acidez fueron muy similares, pero entre la primera y la última recolección los valores obtenidos fueron diferentes, de 2,6 a 2,0 g/L. El valor mínimo establecido de acidez en las frutas maduras de esta variedad es de 1,8 g/L y el máximo de 2,4 g/L [21].

El índice de madurez se usa comúnmente para definir el "sabor" de la fruta de la granada durante su desarrollo [22]. Este parámetro aumentó de 4,6 a 8,4, no siendo estadísticamente diferente las últimas dos recolecciones. El valor mínimo del índice de madurez en el fruto maduro de esta variedad debe ser 6,0 y el máximo 9,0 (<http://www.agroambient.gva.es>). Aunque el índice de madurez se usa comúnmente, éste no siempre se correlaciona bien con la percepción de madurez. El índice BrimA [23] fue propuesto para ser usado en lugar del índice de madurez debido a que los azúcares y ácidos tienen el efecto opuesto sobre el sabor, y la lengua es más sensible a la acidez. Los valores de BrimA aumentaron de 6,7 a 12,5, no habiendo diferencias estadísticas entre las dos últimas recolecciones.

El contenido de los CPT medido en el zumo de la fruta disminuyó de 2,7 a 1,2 g/L. Esta disminución fue más acentuada en la cuarta recolección, siendo la fruta inmadura más rica en estos compuestos. Estudios previos [24] también informaron sobre la reducción de los CPT en un 54,5 % durante la etapa inicial del desarrollo de la fruta y la disminución continuó hasta que la fruta se consideró completamente madura. Algo similar sucedió con la AA que está relacionada con el nivel de CPT. La AA disminuyó de 8,0 a 2,5 mmol Trolox/L, siendo esta disminución más acentuada en la cuarta recolección. Sin embargo, estos resultados son algo diferentes a los obtenidos en otro estudio [5], en los que se presentaron valores de CPT de 3,7, 3,3 y 2,7 g/L y de AA de 7,0, 6,5 and 6,6 mmol Trolox/L. Otros autores [25] señalaron que la variación en la concentración de estos parámetros puede depender en gran medida de factores como el área de crecimiento, las condiciones climáticas o la influencia de técnicas de procesamiento como el aclarado.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de las granadas en cada recolección.

Recolec	Peso (g)	Diámetro (mm)	SST (%)	Acidez (g/L)	Índice de madurez	BrimA	CFT (g/L)	AA (mmol Trolox/L)
1	237 ^f ± 25	78,9 ^d ± 3,1	12,0 ^e ± 1,4	2,6 ^a ± 0,3	4,6 ^f ± 0,3	6,7 ^e ± 1,0	2,7 ^a ± 0,3	8,1 ^a ± 0,2
2	274 ^e ± 33	82,9 ^c ± 3,8	13,7 ^d ± 0,9	2,5 ^{ab} ± 0,1	5,5 ^e ± 0,4	8,7 ^d ± 0,8	2,4 ^b ± 0,2	6,8 ^b ± 0,4
3	305 ^d ± 45	84,5 ^c ± 3,8	14,8 ^c ± 0,6	2,4 ^b ± 0,2	6,2 ^d ± 0,5	10,0 ^c ± 0,6	2,4 ^b ± 0,2	5,1 ^c ± 0,7
4	372 ^c ± 40	90,8 ^b ± 4,1	15,7 ^b ± 0,8	2,2 ^c ± 0,3	7,3 ^c ± 0,8	11,4 ^b ± 0,8	1,2 ^c ± 0,1	3,3 ^d ± 0,1
5	423 ^b ± 64	94,8 ^a ± 3,9	16,4 ^a ± 0,8	2,1 ^{cd} ± 0,2	7,9 ^b ± 0,5	12,2 ^a ± 0,6	1,2 ^c ± 0,1	3,1 ^{de} ± 0,2
6	414 ^b ± 59	93,3 ^{ab} ± 4,1	16,2 ^a ± 0,8	2,0 ^d ± 0,3	8,4 ^a ± 1,0	12,3 ^a ± 0,7	1,2 ^c ± 0,1	2,8 ^e ± 0,2
7	456 ^a ± 66	95,6 ^a ± 4,1	16,6 ^a ± 0,8	2,0 ^d ± 0,2	8,3 ^a ± 0,6	12,6 ^a ± 0,6	1,2 ^c ± 0,1	2,5 ^f ± 0,2

Valor medio ± desviación estándar. Letras diferentes en la misma columna significa que existe diferencia entre las recolecciones (p-valor < 0,05). SST = sólidos solubles totales

3.2. Análisis espectral y de color

El valor medio de cada coordenada de color de la fruta intacta y los arilos en cada recolección se presenta en la Tabla 2. En la piel, solo la coordenada a* (que va de verde a rojo) aumentó durante la madurez, siendo todos los valores estadísticamente diferentes salvo en la recolección 1 y 2. Por lo tanto, el color de la corteza evolucionó de verde a rojizo debido principalmente a la disminución del contenido en clorofilas y carotenoides y al aumento de la síntesis de pigmentos como las antocianinas [26] (Figura 1). En el caso de los arilos, las tres coordenadas evolucionaron durante la madurez. L* disminuyó especialmente a partir de la tercera recolección, b* (que va de azul a amarillo) a partir de la quinta recolección, mientras que

a* aumentó a partir de la tercera recolección. Por lo tanto, el color de los arilos evolucionó de arilos blancos inmaduros a rojizos debido a la síntesis de antocianinas [27] (Figura 1).

Tabla 2. Color de la fruta intacta y los arilos en cada recolección.

Recolección	Fruta intacta			Arilos		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
1	47,0 ^c ± 4,3	-9,6 ^f ± 2,5	24,3 ^d ± 2,0	59,5 ± 1,7 ^a	-5,4 ± 1,2 ^e	14,1 ± 0,6 ^a
2	52,9 ^b ± 3,4	-7,7 ^f ± 2,6	27,7 ^b ± 1,8	59,5 ± 1,5 ^a	-5,0 ± 0,9 ^e	14,1 ± 1,1 ^a
3	55,2 ^b ± 5,4	-2,8 ^e ± 2,7	29,3 ^{ab} ± 1,3	58,3 ± 2,2 ^{ab}	-3,4 ± 1,5 ^e	13,9 ± 1,4 ^a
4	60,5 ^a ± 2,7	3,6 ^d ± 3,5	30,3 ^a ± 3,4	56,4 ± 2,8 ^b	0,3 ± 2,4 ^d	13,1 ± 1,6 ^a
5	60,7 ^a ± 2,4	9,0 ^c ± 3,5	29,7 ^{ab} ± 1,3	51,8 ± 3,4 ^c	4,4 ± 3,5 ^c	13,3 ± 1,2 ^a
6	59,4 ^a ± 3,7	19,1 ^b ± 5,5	25,4 ^c ± 5,5	43,4 ± 4,9 ^d	14,9 ± 4,6 ^b	11,1 ± 1,1 ^b
7	49,1 ^c ± 4,5	22,6 ^a ± 6,8	24,6 ^c ± 1,8	26,9 ± 4,5 ^e	23,4 ± 2,5 ^a	9,2 ± 1,6 ^c



Figura 1. Apariencia de las frutas intactas y arilos en cada recolección.

Los espectros medios de las frutas intactas y los arilos en cada recolección se presentan en la Figura 2. Los espectros mostraron tendencias similares para las frutas intactas y los arilos, pero la intensidad en la reflectancia es diferente en cada recolección. Esto significa que poseen constituyentes similares pero en diferente concentración. En el caso de las frutas intactas, estas diferencias en la intensidad de reflectancia se ubicaron alrededor de 720-750 nm cerca del pico de absorción de clorofila, 680 nm, y el valle presente en la región 960-990 nm, principalmente asignado a las bandas de absorción de agua. Este valle fue más pronunciado en la fruta más madura porque el contenido de agua aumenta en los tejidos durante el inicio de la maduración, debido a la rotura celular y al movimiento osmótico del agua [15].

En los espectros medios de los arilos, las diferencias fueron más acentuadas que en la frutas intactas. Estas se visualizaron principalmente entre 720-800 nm, un pico de alrededor de 920 nm y un valle entre 960 y 990 nm, asignados a ácidos, azúcares y absorción de agua [28]. Sin embargo, los espectros están dominados por el espectro exterior con bandas de armónicos de los enlaces OH a 760 nm y 970 nm y se necesitan sofisticadas técnicas estadísticas para extraer la información útil de estos espectros [29].

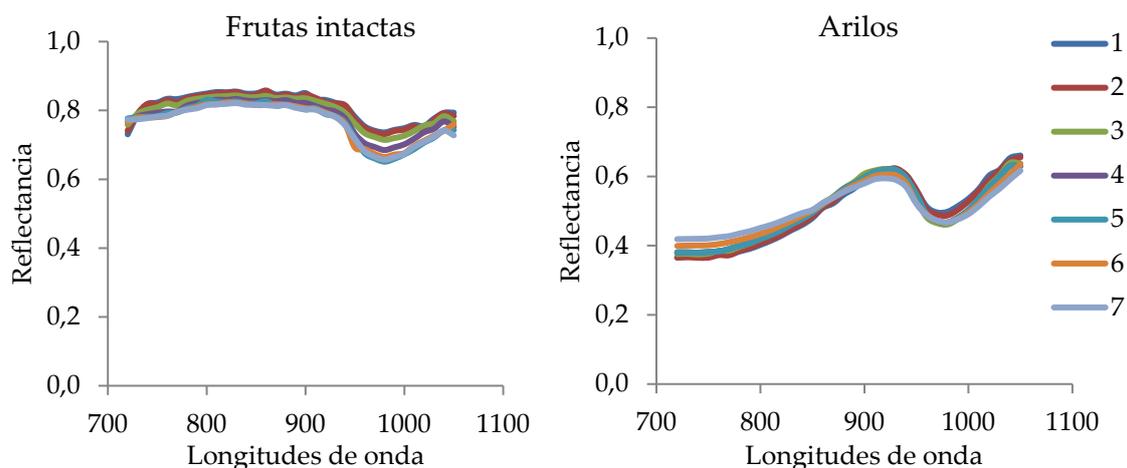


Figura 2. Espectro medio de las frutas intactas y los arilos en cada recolección.

3.3. Predicción de las propiedades fisicoquímicas

La tabla 3 muestra los resultados de la validación de los modelos para predecir las propiedades fisicoquímicas utilizando el color y el espectro de las frutas intactas y arilos.

El peso y el diámetro se predijeron utilizando solo la información de la fruta intacta. El R^2 de predicción utilizando el color fue de 0,62 y 0,64 con un RSME de 58,1 g y 4,49 mm, para frutas intactas y arilos respectivamente. Cuando estos parámetros se correlacionaron con los datos espectrales, el R^2 fue de 0,64 y 0,71 y el RSMEP fue de 54,2 g y 4,10 mm. Estos resultados concuerdan con los obtenidos previamente [30], donde se obtuvo un R^2 de 0,62 en el cultivar 'Wonderful' utilizando espectroscopia de reflectancia difusa.

Los valores de RPD obtenidos para la predicción del peso y el diámetro con datos de color fueron 1,6 para ambos parámetros, y el uso de datos espectrales fue 1,7 y 1,8, respectivamente. Aunque las imágenes hiperespectrales obtuvieron resultados más precisos los valores de RPD para ambas técnicas indicaron que los modelos solo pueden distinguir entre los valores más bajos y los más altos de los parámetros evaluados, pero esto no es suficiente y, por lo tanto, no se recomienda para una aplicación de control de calidad.

En cuanto a los SST y la acidez, el R^2 obtenido usando el color de las frutas intactas fue de 0,68 y 0,47 con un RSME de 0,94 % y 0,24 g/L. En el caso de los arilos el valor de R^2 obtenido fue de 0,44 y 0,37 con un RSME de 1,23 % y 0,26 g/L. Cuando los TSS y la acidez se correlacionaron con los datos espectrales de las frutas intactas, el R^2 fue de 0,71 y 0,46 y el RSME fue de 0,89 % y 0,24 g/L. Cuando se utilizó la información de arilos obtuvieron un R^2 de 0,77 y 0,46 y el RSME fue de 0,82 % y 0,24 g/L, respectivamente.

Otras técnicas no destructivas previamente probadas obtuvieron diferentes resultados en la predicción de estos parámetros en diferentes variedades de granada. Varios estudios [30, 31] utilizaron la espectroscopia para predecir los SST y la acidez de granadas 'Wonderful' utilizando la información de la fruta intacta obteniendo un R^2 de 0,78 y 0,77, respectivamente. Cuando usaron la información de los arilos obtuvieron un R^2 de 0,88 y 0,87. Utilizando un sistema multispectral se obtuvo un R^2 de 0,94 [16]. Cuando se empleó la resonancia magnética nuclear para evaluar los SST y la acidez de granadas 'Wonderful' se obtuvo un R^2 de 0,12 y 0,54, respectivamente [9].

Los valores de RPD obtenidos para STT utilizando el color fueron 1,7 y 1,3, lo que indica un rendimiento justo del modelo utilizando la información de las frutas intactas, pero un rendimiento pobre del modelo utilizando la información proveniente de los arilos. Usando los datos espectrales, los valores fueron 1,8 y 2,0, lo que indica un buen rendimiento del modelo utilizando tanto la fruta intacta como los arilos. Por lo tanto, las predicciones cuantitativas son

posibles utilizando imágenes hiperespectrales en frutas intactas y arilos. Para la acidez, el valor de RPD obtenido utilizando la información conjunta de frutas intactas y arilos y ambas técnicas fue 1,4, que indican un modelo muy pobre.

Tabla 3. Resultados de la predicción de las propiedades fisicoquímicas en el set de validación externa de granadas ‘Mollar de Elche’ usando imágenes a color e hiperespectrales.

	Propiedad	Imagen color			Imagen hiperespectral			
		R ²	RMSE	RPD	R ²	RMSE	RPD	
Fruta intacta	Peso	0,62	58,1	1,6	0,67	54,2	1,7	
	Diámetro	0,64	4,49	1,6	0,71	4,10	1,8	
	SST	0,68	0,94	1,7	0,71	0,89	1,8	
	Acidex	0,47	0,24	1,4	0,46	0,24	1,4	
	Índice madurez	0,78	0,70	2,1	0,71	0,81	1,8	
	BrimA	0,81	0,92	2,2	0,85	0,79	2,6	
	Color arilos	L*	0,77	5,47	2,1	0,68	6,45	1,8
		a*	0,85	4,05	2,6	0,75	5,15	2,0
		b*	0,49	1,44	1,4	0,45	1,50	1,3
		CFT	0,81	0,30	2,3	0,86	0,25	2,7
	AA	0,84	0,83	2,5	0,91	0,62	3,4	
Arilos	SST	0,44	1,23	1,3	0,77	0,82	2,0	
	Acidez	0,37	0,26	1,3	0,46	0,24	1,4	
	Índice madurez	0,55	1,00	1,4	0,78	0,72	2,1	
	BrimA	0,53	1,41	1,4	0,88	0,72	2,7	
	CFT	0,57	0,45	1,4	0,87	0,25	2,7	
	AA	0,61	1,28	1,6	0,92	0,57	3,6	

SST= sólidos solubles totales; CFT= compuestos fenólicos totales; AA= actividad antioxidante; RMSE = error cuadrático medio; RPD = desviación predictiva residual.

La predicción del índice de madurez y el BrimA utilizando el color de las frutas intactas obtuvo valores de R² de 0,78 y 0,81 y el RSME fue de 0,70 y 0,92, respectivamente. Utilizando los datos de color de los arilos los valores de R² fueron de 0,55 y 0,53 y el RSME fue de 1,00 y 1,41. En el caso de los datos espectrales, el R² del índice de madurez y el BrimA utilizando la información de la fruta intacta fueron de 0,71 y 0,85 y el RSME de 0,81 y 0,79. Con la información de los arilos, los de R² fueron de 0,78 y 0,88 y el RSME fue de 0,72 y 0,72. Resultados similares fueron obtenidos por en granadas intactas ‘Wonderful’, R² de 0,78 y 0,79, y en arilos, R² de 0,82 y 0,83 usando espectroscopia [30, 31]. Utilizando resonancia magnética nuclear para evaluar el índice de madurez en granadas ‘Wonderful’ se obtuvo un R² de 0,63 [9].

Los valores de RPD para los modelos del índice de madurez y del BrimA obtenidos usando el color de las frutas intactas fueron 2,1 y 2,2, lo que indica un buen rendimiento del modelo. Sin embargo, utilizando el color de los arilos, el valor de RPD de ambos índices fue de 1,4, lo que indica un modelo deficiente. En cuanto a los datos espectrales, los valores de RPD que usaron la información de la fruta intacta fueron 1,8 y 2,6, lo que indica un rendimiento justo del modelo para el índice de madurez y una excelente precisión en la predicción para BrimA. El valor obtenido utilizando la información espectral de los arilos fue 2,1 para la predicción del índice de madurez, lo que significa que es posible la predicción de este índice y 2,7 para BrimA, lo que indica un excelente rendimiento del modelo.

Los modelos calibrados utilizando los datos de color mostraron un potencial limitado de predicción de los SST, el índice de madurez y el BrimA cuando se usó la información de los arilos. Estos resultados demostraron un mayor potencial de las imágenes hiperespectrales en comparación con las imágenes de color convencionales para predecir las propiedades de la granada 'Mollar de Elche' usando la información de la fruta intacta y los arilos.

Con respecto al color de los arilos, su predicción se llevó a cabo usando solo la información de la fruta intacta. Los tres modelos que utilizan datos de color obtuvieron valores de R^2 de 0,77, 0,85 y 0,49 y de RSME de 5,47, 4,05 y 1,44, respectivamente. En el caso de los datos espectrales, los valores de R^2 fueron 0,68, 0,75 y 0,45 y de RSMEP fueron 6,45, 5,15 y 1,50.

Los valores de RPD obtenidos para L^* , 2,6 y 2,0, indicaron un excelente rendimiento del modelo utilizando datos de color y un buen rendimiento del modelo utilizando datos espectrales. Los valores obtenidos para a^* , 2,1 y 1,8, indicaron un muy buen rendimiento del modelo utilizando datos de color y un buen rendimiento del modelo utilizando datos espectrales. En el caso de b^* , ambas técnicas presentaron un RPD de 1,4 y 1,3, lo que significa un rendimiento deficiente del modelo. La espectroscopia [30] predijo la coordenada a^* de los arilos de la variedad 'Wonderful' y obtuvo un resultado similar a la imagen hiperespectral, R^2 0,71. Estos resultados mostraron que la información de color de la corteza obtuvo una mejor correlación con L^* y a^* que los datos espectrales en la región NIR.

En el caso del contenido en CFT, los modelos que utilizan los datos de color de la fruta intacta y los arilos obtuvieron valores de R^2 de 0,81 y 0,57 y el RSME fue de 0,30 y 0,45 g/L. Cuando se usaron los datos espectrales, se obtuvieron valores de R^2 de 0,86 y 0,87 y de RSME de 0,25 y 0,25 g/L. Mediante el uso de espectroscopia [30, 31] también se predijo CFT en frutas intactas y arilos de granada y se obtuvieron resultados similares a los obtenidos usando imágenes hiperespectrales, un R^2 de 0,83 usando la información de las frutas intactas y 0,87 usando la información de los arilos.

Los valores de RPD obtenidos para los datos de color fueron 2,3 y 1,4, lo que indica un buen rendimiento del modelo con la información de la fruta intacta, pero un rendimiento pobre del modelo con la información de los arilos. Por el contrario, los modelos que usaron los datos espectrales obtuvieron un valor de 2,7, lo que indica un excelente rendimiento utilizando la información de las frutas intactas y los arilos conjuntamente.

En cuanto a la AA, cuando se usaron los datos espectrales de la fruta intacta, el modelo obtuvo un R^2 de 0,91 y el RSME fue 0,62 mmol Trolox/L. Utilizando la información de los arilos, el R^2 fue de 0,92 y el RMSE fue de 0,57 mmol de Trolox/L. Los valores de RPD obtenidos para el método DPPH fueron 2,5 y 1,6 para los datos de color, lo que indica un muy buen rendimiento del modelo utilizando la información de la fruta intacta y el rendimiento del modelo justo utilizando la información de los arilos. Utilizando los datos espectrales, los valores de RPD fueron 3,4 y 3,6, lo que indica un excelente rendimiento del modelo utilizando los datos espectrales de las frutas intactas y los arilos.

Al igual que en el caso de TSS, MI, BrimA y TPC, los modelos PLS-R calibrados utilizando los datos de color mostraron un potencial limitado de predicción de CFT y AA cuando se usó la información de los arilos.

4. Conclusiones

En este trabajo, se ha evaluado el potencial de dos sistemas de visión artificial, imágenes a color e hiperespectrales, para evaluar la calidad de la granada 'Mollar de Elche' durante su madurez.

Se crearon modelos PLS-R para predecir las propiedades fisicoquímicas de la fruta intacta y los arilos utilizando el color y los datos espectrales (720 - 1050 nm). Los parámetros fisicoquímicos mejor predichos ($R^2 \geq 0,75$; RPD ≥ 2) utilizando imágenes de color fueron el índice de madurez y BrimA, las coordenadas de color L^* y a^* , los CFT y la AA. Todos ellos

utilizando la información de la fruta intacta. Cuando se usaron imágenes hiperespectrales en la fruta intacta, los parámetros fisicoquímicos mejor predichos ($R^2 = > 0,75$; $RPD = > 2$) fueron BrimA, la coordenada de color a^* , los CFT y la AA. Para los arilos, todos los parámetros fisicoquímicos estudiados se predijeron correctamente ($R^2 = > 0,75$; $RPD = > 2$) excepto la acidez.

Estos resultados demuestran que las imágenes a color se podrían usar como una potencial herramienta para monitorear algunas propiedades físico-químicas de las frutas intactas. Sin embargo, las imágenes hiperespectrales han demostrado un mayor poder de predicción tanto en frutos intactos como en arilos.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por fondos del INIA y FEDER a través del proyecto RTA2015-00078-00-00. Sandra Munera agradece al INIA el contrato FPI-INIA núm. 43 (CPR2014-0082), parcialmente financiado por fondos de la Unión Europea FSE.

Referencias

1. Opara L.U., Al-Ani M.R., Al-Shuaibi Y.S. Physico-chemical properties, vitamin C content, and antimicrobial properties of pomegranate fruit (*Punica granatum* L.). *Food Bioprocess and Technology*. 2009, 2, 315–321.
2. Viuda-Martos M., Fernández-López J., Pérez-Álvarez J.A. Pomegranate and its many functional components as related to human health: a review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2010, 9, 635–654.
3. Boussa F., Zaouay F., Burlo-Carbonell F., Nuncio-Jáuregui N., Gmati M., El Arbi B., Melgarejo P., Hernández F., Mars M. Combined effects of cropping system and harvest date determine quality and nutritional value of pomegranate fruits (*Punica granatum* L. cv. Gabsi). *Scientia Horticulturae*. 2019, 249, 419-431.
4. Fawole O.A., Opara U.L. Developmental changes in maturity indices of pomegranate fruit: A descriptive review. *Scientia Horticulturae*. 2013, 159, 152-161.
5. Nuncio-Jáuregui N., Calín-Sánchez A., Carbonell-Barrachina A., Hernández F. Changes in quality parameters, proline, antioxidant activity and color of pomegranate (*Punica granatum* L.) as affected by fruit position within tree, cultivar and ripening stage. *Scientia Horticulturae*. 2014, 165, 181-189.
6. Salmanizadeh F., Nassiri S.M., Jafari A., Bagheri M.H. Volume estimation of two local pomegranate fruit (*Punica granatum* L.) cultivars and their components using non-destructive X-ray computed tomography technique. *International Journal of Food Properties*. 2014, 18, 439-455.
7. Arendse E., Fawole O.A., Magwaza L.S., Opara, U.L. Non-destructive characterization and volume estimation of pomegranate fruit external and internal morphological fractions using X-ray computed tomography. *Journal of Food Engineering*. 2016, 186, 42-49.
8. Arendse E., Fawole O.A., Magwaza L.S., Opara U.L. Estimation of the density of pomegranate fruit and their fractions using X-ray computed tomography calibrated with polymeric materials. *Biosystems Engineering*. 2016, 148, 148-156
9. Zhang L., McCarthy M.J. Black heart characterization and detection in pomegranate using NMR relaxometry and MR imaging. *Postharvest Biology and Technology*. 2012, 67, 96–101.
10. Blasco J., Cubero S., Gómez-Sanchis J., Mira P., Moltó E. Development of a machine for the automatic sorting of pomegranate (*Punica granatum*) arils based on computer vision. *Journal of Food Engineering*. 2009, 90, 27–34.
11. Lorente D., Aleixos N., Gómez-Sanchis J., Cubero S., García-Navarrete O.L., Blasco, J. Recent advances and applications of hyperspectral imaging for fruit and vegetable quality assessment. *Food Bioprocess Technology*. 2012, 5, 1121–1142.
12. Arendse E., Fawole O.A., Magwaza L.S., Opara U.L. Non-destructive prediction of internal and external quality attributes of fruit with thick rind: A review. *Journal of Food Engineering*. 2018, 207, 11-23.

X CONGRESO IBÉRICO DE AGROINGENIERÍA
X CONGRESSO IBÉRICO DE AGROENGENHARIA

3 – 6 septiembre 2019, Huesca - España

13. Liu M., Hu S., Lin H., Guo E. Hyperspectral laser-induced fluorescence imaging for non-destructive assessing soluble solids content of orange. IFIP. 2008, 258, 51-59.
14. Teerachaichayut S., Ho H.T. Non-destructive prediction of total soluble solids, titratable acidity and maturity index of limes by near infrared hyperspectral imaging. *Postharvest Biology and Technology*. 2017, 133, 20-25.
15. Rajkumar P., Wang N., Elmasry G., Raghavan G.S.V., Garipey Y. Studies on banana fruit quality and maturity stages using hyperspectral imaging. *Journal of Food Engineering*. 2012. 108, 194-200.
16. Khodabakhshian R., Emadi B., Khojastehpour M., Golzarian M.R. Determining quality and maturity of pomegranates using multispectral imaging. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 2017, 16, 322-331.
17. Mobaraki N., Amigo J.M. HYPER-Tools. A graphical user-friendly interface for hyperspectral image analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2018, 172, 174-187.
18. Singleton V.L., Orthofer R., Lamuela-Raventos R.M. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology*. 1999, 299, 152-178.
19. Brand-Williams W., Cuvelier M.E., Berset C. Use of free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology*. 1995, 28, 25-30.
20. Williams P.C. Variables affecting near-infrared reflectance spectroscopic analysis. In: Williams, P., Norris, K. (Eds.), *Near-infrared Technology in the Agricultural and Food Industries*. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN, 1987, pp. 143-166.
21. Generalitat Valenciana. Conselleria de Agricultura, medio ambiente, cambio climático y desarrollo rural. Pliego de condiciones de la denominación de origen protegida "Granada Mollar de Elche" / "Granada de Elche". <http://www.agroambient.gva.es/> - Accessed 14.07.19
22. Shwartz E., Glazer I., Bar-Ya'akov I., Matityahu I., Bar-Ilan I., Holland D., Amir R. Changes in chemical constituents during the maturation and ripening of two commercially important pomegranate accessions. *Food Chemistry*. 2009, 115, 965-973.
23. Jordan R., Seelye R., McGlone A. A sensory-based alternative to brix/acid ratio. *Food Technology*. 2001, 55, 36-44.
24. Kulkarni A.P., Aradhya S.M. Chemical changes and antioxidant activity in pomegranate arils during fruit development. *Food Chemistry*. 2005, 93, 319-324.
25. Mena P., García-Viguera C., Navarro-Rico J., Moreno D.A., Bartual J., Saura D. Phytochemical characterisation for industrial use of pomegranate (*Punica granatum* L.) cultivars grown in Spain. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2011, 91, 1893-1906
26. Zhao X., Yuan Z., Yin Y., Feng L. Patterns of pigment changes in pomegranate (*Punica granatum* L.) peel during fruit ripening. *Acta Horticulturae*. 2015, 1089, 83-89.
27. Gil M.I., García-Viguera C., Artés F., Tomás-Barberán F.A. Changes in pomegranate juice pigmentation during ripening. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 1995, 68, 77-81.
28. Yang C. H., Sun D.-W., Pu H., Wang N.N., Zhu Z. Rapid detection of anthocyanin content in lychee pericarp during storage using hyperspectral imaging coupled with model fusion. *Postharvest Biology and Technology*. 2015, 103, 55-65.
29. Nicolai B.M., Beullens K., Bobelyn E., Peirs A., Saeys W., Theron K.I., Jeroen L. Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review. *Postharvest Biology and Technology*. 2007, 46, 99-118.
30. Arendse E., Fawole O.A., Magwaza L.S., Nieuwoudt H., Opara, U.L. Fourier-transform near infrared diffuse reflectance spectroscopy and two spectral acquisition modes for evaluation of external and internal quality of intact pomegranate fruit. *Postharvest Biology and Technology*. 2018, 138, 91-98.
31. Arendse E., Fawole O.A., Magwaza L.S., Nieuwoudt H.H., Opara U.L. Development of calibration models for the evaluation of pomegranate aril quality by Fourier-transform near infrared spectroscopy combined with chemometrics. *Biosystems Engineering*. 2017, 159, 22-32.