

Fruit quality and postharvest physiology in three variants of dry-season *Spondias purpurea* L.

Calidad de fruto y fisiología poscosecha de tres variantes de *Spondias purpurea* L. de temporada seca

Samuel Cancino-Labra¹; Iran Alia-Tejacal^{1*}; Gloria Alicia Pérez-Arias¹; Benito Terán-Erazo²; Clara Pelayo-Zaldívar³

¹Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Av. Universidad núm. 1001, Chamilpa, Cuernavaca, Morelos, C. P. 62210, MÉXICO.

²Centro de Estudios Técnicos, CSAEGRO. Carr. Iguala-Atenango del Río km 21.5, Huitzuco, Guerrero, C. P. 40130, MÉXICO.

³Universidad Autónoma Metropolitana. San Rafael Atlixco núm. 186, Col.

Vicentina, Iztapalapa, Ciudad de México, C. P. 09340, MÉXICO.

*Corresponding author: iran.alia@uaem.mx

Abstract

Despite the wide distribution of *Spondias purpurea* L. across tropical America, its fruit remains relatively unknown and is consumed mostly regionally; this is largely because several aspects of its postharvest quality and physiology remain unknown. The objective of this work was to address these issues in three variants of *S. purpurea* L. (Roja, Morada, and Amarilla) and to propose improvements to their postharvest management and conservation. For this, fruit from each variant was harvested at ½ and ¾ maturity, stored at 25 ± 2 °C (60 % relative humidity), and evaluated according to several physical, chemical, and physiological parameters. Weight loss, respiration, and ethylene production were highest in Roja; however, postharvest life was the shortest (5-6 d). Firmness was highest in Morada, while respiration and postharvest life were the lowest and longest (6-8 d), respectively. During ripening, total soluble solids and titratable acidity increased in all three varieties, though they did so to a much lesser extent in Amarilla. Total phenolics increased in Roja and Morada during the first stage of ripening (d 2-4) while flavonoids only did so during the second stage. In Amarilla, however, the levels of both remained relatively low. FRAP-determined antioxidant activity was therefore higher in the first two which, together with all other results, indicate important differences in the quality of these variants of *S. purpurea* L., and thus, in the resulting management and conservation strategies.

Keywords: respiration, ethylene, phenolics, flavonoids, DPPH, ABTS, FRAP.

Resumen

A pesar de la amplia distribución de *Spondias purpurea* L. en los trópicos de América, su fruto permanece relativamente desconocido y, prácticamente, se consume solo de manera regional debido a que muchos aspectos de su calidad y fisiología poscosecha permanecen desconocidos. El objetivo de este trabajo fue evaluar dichos aspectos en tres variantes de *S. purpurea* L. (Roja, Morada y Amarilla) y proponer mejoras para su manejo poscosecha y conservación. Se cosecharon frutos de cada variante a ½ y ¾ de maduración, se almacenaron a 25 ± 2 °C (60 % humedad relativa) y se evaluaron conforme a varios parámetros físicos, químicos y fisiológicos. La pérdida de peso, respiración y producción de etileno más altas se presentaron en Roja; su vida poscosecha fue la más breve (5 a 6 días). Morada mostró la mayor firmeza y vida poscosecha (6 a 8 días), así como menor tasa de respiración. Durante la maduración, los sólidos solubles totales y la acidez titulable aumentaron en las tres variedades, aunque en una escala menor en Amarilla. Los fenoles totales incrementaron en Roja y Morada durante la primera etapa de maduración (día 2 a 4), mientras que los flavonoides sólo aumentaron durante la segunda. En Amarilla, los niveles de ambos parámetros permanecieron relativamente bajos. La actividad antioxidante determinada mediante FRAP fue mayor en Roja y Morada, lo cual, junto con los otros resultados, indica diferencias importantes en la calidad de estas variantes de *S. purpurea* L., así como en las estrategias de manejo y conservación.

Palabras clave: respiración, etileno, fenoles, flavonoides, DPPH, ABTS, FRAP.

Please cite this article as follows (APA 7): Cancino-Labra, S., Alia-Tejacal, I., Pérez-Arias, G. A., Terán-Erazo, B., & Pelayo-Zaldívar, C. (2024). Fruit quality and postharvest physiology in three variants of dry-season *Spondias purpurea* L. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 30(3) 3-19. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2023.07.006>



Revista Chapingo
Serie Horticultura

Introduction

The fruit of *Spondias purpurea* L. is a 10-30 g drupe that can be green, yellow, orange, red, or purple when fully ripe, and may be consumed fresh or processed (Maldonado-Astudillo et al., 2014). Its flavor can also vary –from sour to sweet-sour (or even to very sweet)– depending on the content of sugars and organic acids (Cancino-Labra et al., 2023a). At the same time, different minerals, vitamins, and antioxidants render the fruit nutritious and with many potential health benefits (Ferrer et al., 2022).

Members of this species can be classified into either wet- or dry-season variants, depending on their growth time, harvest season, and duration of postharvest life (e.g. wet-season variants last 7-8 d at room temperature; dry-season ones less than 5 d) (Avitia-García et al., 2003; Álvarez-Vargas et al., 2019; Cancino-Labra et al., 2023a). However, many of the changes that occur during ripening are better understood in wet-season fruit (e.g. an increase in total soluble solids, carotenoids, and antioxidant activity; a decrease in firmness and acidity; important changes in the content of phenolics and flavonoids; etc.) (Bautista-Baños et al., 2003; Maldonado-Astudillo et al., 2014; Suárez-Vargas et al., 2017).

Although countries like Mexico still harbor a considerable diversity of *S. purpurea* L. (Avitia-García et al., 2003; Cruz-León & Rodríguez-Haros, 2012), most variants are consumed only regionally during the fruit's annual production period (i.e. during the wet or dry season). This is largely because several aspects of their physiology remain relatively unknown, thus contributing to a lack of suitable postharvest technologies for this species. In addition, many changes that take place during ripening (especially in dry-season fruit) are difficult to generalize due to the absence of a suitable harvest index, which is why *S. purpurea* L. is usually harvested at the physiological mature, mature, or ripe stages, especially for fresh consumption (Martins et al., 2003; Pérez-López et al., 2004; Osuna-García et al., 2011; Romero-Hinojosa et al., 2021; Maldonado-Astudillo et al., 2023).

Because of these aforementioned gaps in our knowledge, essential quality characteristics such as TSS, TA, epidermal color change, respiration, and ethylene production have all been studied previously (Pérez-López et al., 2004; Romero-Hinojosa et al., 2021; Maldonado-Astudillo et al., 2023); however, changes in phenols, flavonoids, and antioxidant activity, as well as other changes in color (e.g. in the pulp), remain unclear. As well, the many variants of *S. purpurea* L. in Mexico make it imperative to study each individually in order to select the most suitable postharvest treatment, and thus extend their useful life.

Introducción

El fruto de *Spondias purpurea* L. es una drupa de entre 10 y 30 g que puede ser verde, amarillo, anaranjado, rojo o morado cuando está completamente maduro, y se puede consumir fresco o procesado (Maldonado-Astudillo et al., 2014). Su sabor puede variar –desde ácido hasta agridulce (o incluso hasta muy dulce)– en función del contenido de azúcares y ácidos orgánicos (Cancino-Labra et al., 2023a). Adicionalmente, diferentes minerales, vitaminas y antioxidantes hacen al fruto nutritivo y con muchos beneficios potenciales para la salud (Ferrer et al., 2022).

Los miembros de esta especie se pueden clasificar de temporada seca o húmeda, dependiendo de su tiempo de crecimiento, temporada de cosecha y duración de la vida poscosecha (por ejemplo, las variantes de temporada húmeda duran de 7 a 8 días a temperatura ambiente, y las de temporada seca, menos de 5 días) (Avitia-García et al., 2003; Álvarez-Vargas et al., 2019; Cancino-Labra et al., 2023a). Sin embargo, muchos de los cambios que ocurren durante la maduración son más conocidos en frutos de temporada húmeda (como el aumento de sólidos solubles totales [SST], carotenoides y actividad antioxidante, disminución en firmeza y acidez titulable [AT], y cambios importantes en los contenidos de fenoles y flavonoides, entre otros) (Bautista-Baños et al., 2003; Maldonado-Astudillo et al., 2014; Suárez-Vargas et al., 2017).

Aunque México mantiene una diversidad considerable de *S. purpurea* L. (Avitia-García et al., 2003; Cruz-León & Rodríguez-Haros, 2012), casi todas las variantes se consumen únicamente a nivel regional durante el periodo anual de producción de la fruta (es decir, durante la temporada húmeda o la seca). Esto se debe, en gran medida, a que muchos aspectos de su fisiología permanecen inciertos, lo cual contribuye a la falta de tecnologías poscosecha adecuadas para esta especie. Asimismo, muchos cambios que ocurren durante la maduración (especialmente en frutos de temporada seca) son difíciles de generalizar debido a la ausencia de un índice de cosecha confiable; por ello, *S. purpurea* L. se cosecha usualmente en las etapas de madurez fisiológica, sazón o madurez de consumo, en especial para consumo en fresco (Martins et al., 2003; Pérez-López et al., 2004; Osuna-García et al., 2011; Romero-Hinojosa et al., 2021; Maldonado-Astudillo et al., 2023).

Debido a los vacíos en el conocimiento sobre *S. purpurea* L., se han estudiado, previamente, características esenciales de calidad, como SST, AT, cambio de color de la epidermis, respiración y producción de etileno (Pérez-López et al., 2004; Romero-Hinojosa et al., 2021; Maldonado-Astudillo et al., 2023); sin embargo, los cambios en fenoles, flavonoides y actividad antioxidante, así como variaciones en el color (como en la pulpa),

For these reasons, the objective of this study was to evaluate essential quality characteristics in *S. purpurea* L. (including the content of antioxidants such as phenolics and flavonoids) during the ripening process in three variants of dry-season fruit (harvested at the $\frac{1}{2}$ and $\frac{3}{4}$ mature stages). Such information should help discern optimal postharvest treatments for these variants.

Materials and methods

Experimental procedure

The fruit of *S. purpurea* L. used originated from 40-year-old trees that were present in an orchard located in the municipality of Tepalcingo, State of Morelos, Mexico ($18^{\circ} 39' 42''$ NL and $98^{\circ} 55' 28''$ WL, at 1,160 m a. s. l.). This region has a warm sub-humid climate (García, 2004), with an average temperature of 22.5°C and an annual precipitation of 840 mm (Díaz-Padilla et al., 2008). The variants Roja, Morada, and Amarilla were chosen as they are the most actively cultivated in this area and are all well adapted to its conditions (Cancino-Labra et al., 2023b).

During the 2021 production season, three trees from each variety were selected and their fruit picked. Those from variants Roja and Morada were picked in April; those from Amarilla were picked in June. The maturity stages chosen were the ' $\frac{1}{2}$ mature' (50 % green and 50 % final coloration) and ' $\frac{3}{4}$ mature' (25 % green and 75 % final coloration).

The fruit was then transported unrefrigerated and by vehicle to UAEM's Laboratory of Agricultural Production (Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Faculty of Agricultural and Livestock Sciences), where they were acclimatized to laboratory conditions before being screened for uniform maturity and lack of observable defects, disinfected (30-60 s immersion in $0.2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ of sodium hypochloride), and dried using absorbent paper. To evaluate destructive variables, the fruit was randomly sorted into five groups consisting of six fruits each. A sixth group of ten fruits was also formed to evaluate non-destructive variables (this was repeated for each variety). The fruit was then stored for 10 d at $22 \pm 2^{\circ}\text{C}$ (60 % relative humidity [RH]) in order for ripening to proceed.

Measured variables

Non-destructive variables were evaluated daily (experimental unit = one fruit), with 10 repetitions for each determination of weight loss (WL), skin color, and fruit appearance, and six for respiration rate and ethylene production. Destructive variables, on the other hand, were evaluated every two days (experimental unit = one fruit), with six repetitions for each determination of pulp color, firmness, TSS, TA, total phenolics,

permanecen poco claros. Además, la gran diversidad de *S. purpurea* L. en México hace imperativo estudiar cada variante con el fin de seleccionar el tratamiento poscosecha más efectivo, y así prolongar su vida útil.

Por estas razones, el objetivo de este estudio fue evaluar las características de calidad esenciales en *S. purpurea* L. (incluyendo el contenido de antioxidantes, como fenoles y flavonoides) durante el proceso de maduración en tres variantes de fruta de temporada seca (cosechada en las etapas de $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ de maduración). Esta información ayudará a discernir tratamientos poscosecha óptimos para dichas variantes.

Materiales y métodos

Procedimiento experimental

Los frutos de *S. purpurea* L. analizados provinieron de árboles de 40 años localizados en un huerto del municipio de Tepalcingo, Morelos, México ($18^{\circ} 39' 42''$ N y $98^{\circ} 55' 28''$ O, a 1,160 m s. n. m.). Esta región tiene un clima cálido sub-húmedo (García, 2004), temperatura promedio anual de 22.5°C y precipitación media anual de 840 mm (Díaz-Padilla et al., 2008). Las variantes Roja, Morada y Amarilla se eligieron debido a que son las más cultivadas en esta área, y a que están adaptadas a estas condiciones (Cancino-Labra et al., 2023b).

Durante la temporada productiva 2021, se seleccionaron tres árboles de cada variedad y se recolectaron sus frutos. Los frutos de las variantes Roja y Morada se cosecharon en abril, y los de Amarilla, en junio. Las etapas de maduración elegidas fueron $\frac{1}{2}$ (50 % verde y 50 % coloración final) y $\frac{3}{4}$ (25 % verde y 75 % coloración final).

La fruta se trasladó sin refrigeración y en automóvil hacia el Laboratorio de Producción Agrícola de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Facultad de Ciencias Agropecuarias, en donde se aclimataron a las condiciones del laboratorio antes de ser examinadas para determinar su madurez uniforme y la ausencia de defectos observables, se desinfectaron mediante inmersión (30 a 60 s en $0.2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ de hipoclorito de sodio) y se secaron con papel absorbente. Con el fin de evaluar las variables destructivas, las frutas se distribuyeron aleatoriamente en cinco grupos, conformados por seis frutos cada uno. Además, se formó un sexto grupo con 10 frutos para evaluar las variables no destructivas. Esto se realizó en cada variedad. La fruta se almacenó durante 10 días a $22 \pm 2^{\circ}\text{C}$ (60 % humedad relativa [HR]) para que ocurriera la maduración.

Variables evaluadas

Las variables no destructivas se evaluaron diariamente (unidad experimental = un fruto), con 10 repeticiones para cada determinación de pérdida de peso (PP),

flavonoids, and antioxidant activity. Fruits were always randomly selected, and the experimental design followed consisted of six treatments (three varieties of *S. purpurea* L. and two maturity stages).

WL was calculated from the difference between the initial and final weight of each fruit (CQ100LW digital scale, Ohaus®, USA) and was expressed as a percentage. The chromatic parameters L^* , C^* , and h were determined from spectroscopic readings of the epicarp and pulp (SP64 spectrophotometer, X-Rite®, USA); these were taken from opposite sides of a fruit's transverse diameter (Kasajima, 2019). Fruit appearance was photographically recorded and classified as either "marketable" (i.e. hydrated and of the characteristic varietal color) or "non-marketable" (i.e. dehydrated and with loss of the characteristic varietal color). Firmness (Chatillon DF250 [0.6 mm height x 0.7 mm cone tip base], AMETEK®, USA) was measured as the force required to penetrate the epicarp from opposite sides of a fruit's equatorial diameter; these results were expressed in Newtons (N) (Maldonado-Astudillo et al., 2023).

Rates of respiration and of ethylene production were determined using a static method (Saltveit, 2016) along with gas chromatography (GC-TCD for CO_2 ; GC-FID for ethylene). For this, a single fruit was placed inside a 120 mL sealed container for 3 h, after which a 1 mL sample of headspace air was extracted and injected into an Agilent 7890A system (Agilent Technologies, USA). Injector, oven, and detector temperatures were 150, 80, and 170 °C, respectively (N_2 carrier gas; 2 mL·min⁻¹ flow rate). The absolute calibration method was used to quantify both CO_2 and ethylene using 460 and 100 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ standards, respectively (Praxair®, Mexico).

The content of TSS was determined in 1 g of fruit tissue. For this, a sample was first homogenized for 40 s along with 12 mL of dH_2O (T-25 Ultra-Turrax®, IKA, Germany). The homogenate was then filtered, and three drops of the supernatant placed in a refractometer (PAL-1, Atago™, Japan). The readings were recorded as percentage of TSS (%) and corrected for the dilution made (1 g of tissue in 12 mL of H_2O). On the other hand, TA was determined in 5 mL of the supernatant using 0.1 N sodium hydroxide and two drops of phenolphthalein (1 %, w/v) as an indicator dye (Association of Official Analytical Chemists [AOAC], 1990); the results were expressed as % citric acid. The taste index (TI) was obtained by calculating the TSS/TA ratio (Erkan & Dogan, 2020).

Total phenolics and antioxidant activity (as determined by the DPPH, ABTS, and FRAP methods) were evaluated in aqueous extracts of the fruit pulp; total flavonoids, on the other hand, were determined using methanolic extracts. In all of these assays, well-known colorimetric

color de la piel y apariencia de fruto, y seis para tasa de respiración y producción de etileno. Por otro lado, las variables destructivas se evaluaron cada dos días (unidad experimental = un fruto), con seis repeticiones para cada determinación de color de la pulpa, firmeza, SST, AT, fenoles totales, flavonoides y actividad antioxidante. En todos los casos, los frutos se seleccionaron aleatoriamente, y el diseño experimental empleado consistió en seis tratamientos (tres variedades de *S. purpurea* L. y dos estados de madurez).

La PP se calculó a partir de la diferencia entre el peso inicial y el final de cada fruto (báscula digital CQ100LW, Ohaus®, EUA), y se expresó como porcentaje. Los parámetros cromáticos L^* , C^* y h se determinaron a partir de lecturas del epicarpio y la pulpa con un espectrofotómetro (SP64, X-Rite®, EUA); éstas se tomaron de los lados opuestos del diámetro polar de un fruto (Kasajima, 2019). La apariencia del fruto se registró fotográficamente, y se clasificó como "comercializable" (es decir, hidratada y del color característico de la variedad) o como "no comercializable" (es decir, deshidratada y con pérdida del color característico de la variedad). La firmeza se midió como la fuerza requerida para penetrar el epicarpio de los lados opuestos del diámetro ecuatorial de un fruto (Chatillon DF250 [0.6 mm altura x 0.7 mm puntal cónico], AMETEK®, EUA); estos resultados se expresaron en Newtons (N) (Maldonado-Astudillo et al., 2023).

Las tasas de respiración y de producción de etileno se determinaron utilizando un método estático (Saltveit, 2016) y cromatografía de gases (CG-DCT para CO_2 ; CG-DIF para etileno). Para ello, se colocó un fruto dentro de un contenedor sellado de 120 mL durante 3 h, después se extrajo una muestra de 1 mL de aire del espacio de cabeza y se inyectó a un sistema Agilent 7890A (Agilent Technologies, EUA). Las temperaturas del inyector, horno y detector fueron 150, 80 y 170 °C, respectivamente. Se empleó N_2 como gas acarreador a una tasa de flujo de 2 mL·min⁻¹. Para cuantificar el CO_2 y el etileno, se usó el método de calibración absoluta, con 460 y 100 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$, respectivamente, de estándares (Praxair®, México).

El contenido de SST se determinó en 1 g de tejido de fruto. Para esto, se homogenizó una muestra por 40 s, junto con 12 mL de dH_2O (T-25 Ultra-Turrax®, IKA, Alemania). Subsecuentemente, el homogenizado se filtró y se colocaron tres gotas del sobrenadante en el refractómetro (PAL-1, Atago™, Japón). Las lecturas se registraron como % de SST y se corrigieron para la dilución (1 g de tejido en 12 mL de H_2O). Por otro lado, la AT se determinó en 5 mL de sobrenadante con 0.1 N de hidróxido de sodio y dos gotas de fenolftaleína (1 %, p/v) como un indicador de tinción (Association of Official Analytical Chemists [AOAC], 1990); los resultados se expresaron como % de ácido cítrico. El índice de sabor (IS) se obtuvo al calcular la relación SST/AT (Erkan & Dogan, 2020).

methods were applied (Singleton et al., 1999; Benzie & Strain, 1996; Brand-Williams et al., 1995; Arvouet-Grand et al., 1994); all have also been validated for use in wet-season *S. purpurea* L. (Suárez-Vargas et al., 2017). Total phenolics were expressed as mg of gallic acid equivalents (GAE), antioxidant activity as mg of ascorbic acid equivalents (AAE), and total flavonoids as mg of quercetin equivalents (QE) (in all cases, per 100 g of fruit pulp).

Statistical analysis

All variables measured were analyzed by ANOVA at different storage times. A comparison of Tukey means ($P \leq 0.05$) was also made between varieties and maturity stages during those times. The software used for these analyses, as well as for the subsequent creation of graphs, was Sigma Plot ver. 14 (Systat Software Inc., USA).

Results and discussion

Weight loss and appearance

WL did not differ significantly between fruit picked at $\frac{1}{2}$ and $\frac{3}{4}$ maturity; it did so, however, between variants ($P \leq 0.05$) (Figure 1a). Values were always highest in Roja (24-62 % on d 5-10) followed by those in Morada (18-42 % on d 5-10) and Amarilla (10-22 % on d 5-7). This was additionally reflected in their appearance, which remained marketable until d 5-6 in Roja, and until d 5-8 in Morada and Amarilla (Table 1; Figures 2, 3, and 4). This contrasts with the usual behavior of most fruit, where appearance deteriorates after just 5-10 % WL (Wills & Golding, 2016). Still, their useful life is estimated to be rather short (approx. 3 d for Roja and Morada, and 5 d for Amarilla) as most merchants will only accept a 10 % WL for the aforementioned reason. In this case, better storage conditions during refrigeration (such as optimal temperature and RH), together with postharvest techniques (like the use of edible coatings, clam-shell containers, or of modified atmosphere packaging), could further extend these times, provided they do not negatively impact fruit quality.

Remarkably, maturity stage did not influence WL, something which, again, runs contrary to what is usually reported. Sousa et al. (1998) and Pérez-López et al. (2004) describe higher values of WL among ripe specimens of *S. purpurea* L., whereas Mohammed et al. (2019) do so only in unripe fruit. They both, however, agree that cuticle thickness and composition account for most of the variation observed.

Firmness

Again, values did not differ significantly between fruit picked at $\frac{1}{2}$ and $\frac{3}{4}$ maturity; rather, differences were

Los fenoles totales y la actividad antioxidante (determinada por los métodos DPPH, ABTS y FRAP) se evaluaron en extractos acuosos de la pulpa del fruto. Por su parte, los flavonoides totales se determinaron utilizando extractos metanólicos. En todos estos ensayos, se aplicaron métodos colorimétricos ampliamente conocidos (Singleton et al., 1999; Benzie & Strain, 1996; Brand-Williams et al., 1995; Arvouet-Grand et al., 1994), y validados para su uso en *S. purpurea* L. de temporada húmeda (Suárez-Vargas et al., 2017). Los fenoles totales se expresaron como mg equivalentes de ácido gálico (EAG), la actividad antioxidante como mg equivalentes de ácido ascórbico (EAA) y los flavonoides totales como mg equivalentes de quercetina (EQ); en todos los casos por 100 g de pulpa de fruta.

Análisis estadístico

Los resultados obtenidos en todas las variables medidas se sometieron a un análisis de varianza a distintos tiempos de almacenamiento. Adicionalmente, se realizó una comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) entre las variantes y las etapas de maduración durante dichos tiempos. El programa utilizado para estos análisis, así como para la elaboración de gráficos, fue Sigma Plot ver. 14 (Software Inc., EUA).

Resultados y discusión

Pérdida de peso y apariencia

La PP no presentó diferencias significativas entre frutos recolectados a $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ de maduración, pero sí entre variantes ($P \leq 0.05$) (Figura 1a). Los valores mayores se presentaron en Roja (24-62 % entre los días 5 y 10), seguidos por los de Morada (18-42 % entre los días 5 y 10) y Amarilla (10-22 % entre los días 5 y 7). Esto se reflejó en su apariencia, la cual permaneció comercializable hasta los 5 a 6 días en Roja, y hasta los 5 a 8 días en Morada y Amarilla (Cuadro 1; Figuras 2, 3 y 4). Lo anterior contrasta con el comportamiento habitual de la mayoría de los frutos, donde la apariencia se deteriora después del 5 al 10 % de PP (Wills & Golding, 2016). Incluso así, se estima que su vida útil es bastante breve (aproximadamente 3 días para Roja y Morada, y 5 días para Amarilla), ya que la mayoría de los comerciantes aceptan sólo 10 % de PP. En este caso, mejores condiciones de almacenamiento durante la refrigeración (como temperatura y HR óptimas), junto con técnicas poscosecha (como el uso de recubrimientos comestibles, envases tipo almeja o de atmósfera modificada), podrían ampliar estos plazos, mientras no repercutan negativamente en la calidad de la fruta.

Sorprendentemente, el estado de madurez no influyó en la PP, algo que, nuevamente, va en contra de lo que se suele reportar. Sousa et al. (1998) y Pérez-López et al. (2004) describen valores más altos de PP

Table 1. Length of marketable appearance (in days) in three variants of *S. purpurea* L. harvested at ½ and ¾ maturity, and stored at 25 ± 2 °C (60 % relative humidity).

Cuadro 1. Duración de la apariencia comercializable (en días) de tres variantes de *S. purpurea* L. cosechadas a ½ y ¾ de maduración ,y almacenadas a 25 ± 2 °C (60 % humedad relativa).

Variety / Variedad	Stage of maturity / Etapa de maduración	
	½ mature / ½ maduración	¾ mature /¾ de maduración
Morada	7 - 8	6 - 7
Roja	6	5
Amarilla	6 - 7	5 - 6

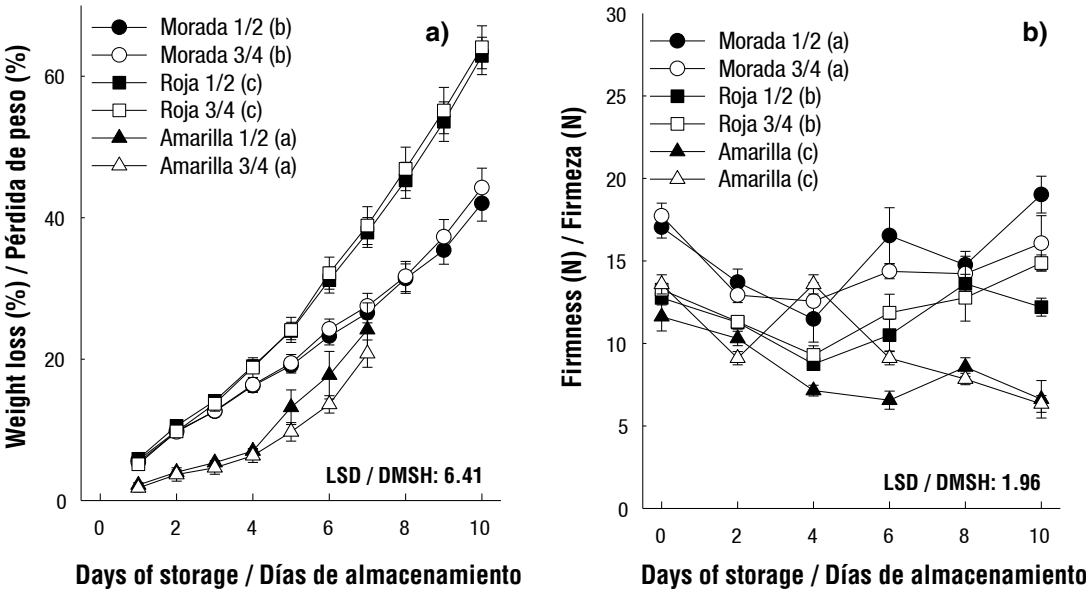


Figure 1. Weight loss (WL) and firmness in three variants of *S. purpurea* L. harvested at ½ and ¾ maturity, and stored at 25 ± 2 °C (60 % relative humidity). Each point represents the mean of six to ten measurements ± standard error. LSD = least significant difference. The same letters within parentheses indicate that the variants do not differ statistically (Tukey, $P \leq 0.05$).

Figura 1. Pérdida de peso (PP) y firmeza en tres variantes de *S. purpurea* L. cosechadas a ½ y ¾ de maduración, y almacenadas a 25 ± 2 °C (60 % humedad relativa). Cada punto representa la media de seis a diez mediciones ± el error estándar. DMSH = diferencia mínima significativa honesta. Letras iguales entre paréntesis indican que las variantes no difieren estadísticamente (Tukey, $P \leq 0.05$).

only evident across variants ($P \leq 0.05$). Firmness was thus greatest in Morada (11-19 N), followed by values in Roja (8-15 N) and Amarilla (6.2-14 N) (Figure 1b). A noticeable decrease on d 0-4 in Roja and Morada, and throughout all of storage in Amarilla, was likely due to the action of pectin-degrading enzymes such as pectin methylesterase and polygalacturonase, whose activities increase during ripening (Maldonado-Astudillo et al., 2014). On the other hand, WL-induced changes in skin texture (more specifically, an increased toughness or hardness in the epidermis) were likely responsible for the rising values of firmness in Roja and Morada from d 4 onwards. Thus, excessive WL (in this case around 18 %) can also trigger important epicarp changes that derive in increased resistance to the action of piercing forces (e.g. like those of a texturometer) (Figure 1b).

entre variedades maduras de *S. purpurea* L., mientras que Mohammed et al. (2019) lo hacen sólo en frutos no maduros. Sin embargo, todos coinciden en que el espesor y la composición de la cutícula explican la mayor parte de la variación observada.

Firmeza

Nuevamente, los valores de firmeza no presentaron diferencias estadísticas significativas entre los frutos recolectados a ½ y ¾ de maduración, pero muestran diferencias significativas entre las variantes ($P \leq 0.05$). La mayor firmeza se obtuvo en Morada (11-19 N), seguida por Roja (8-15 N) y Amarilla (6.2-14 N) (Figura 1b). La disminución evidente entre el día 0 y 4 en Roja y Morada, y durante todo el almacenamiento en Amarilla,

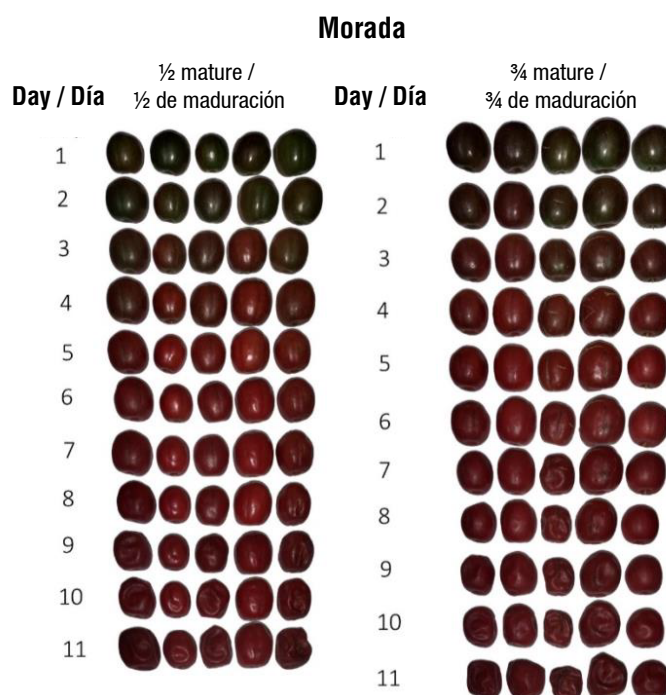


Figure 2. Visual appearance of *S. purpurea* L., variant Morada, harvested at ½ and ¾ maturity, and stored at 25 ± 2 °C (60 % relative humidity).

Figura 2. Apariencia visual de *S. purpurea* L., variante Morada, cosechada a ½ y ¾ de maduración, y almacenada a 25 ± 2 °C (60 % humedad relativa).

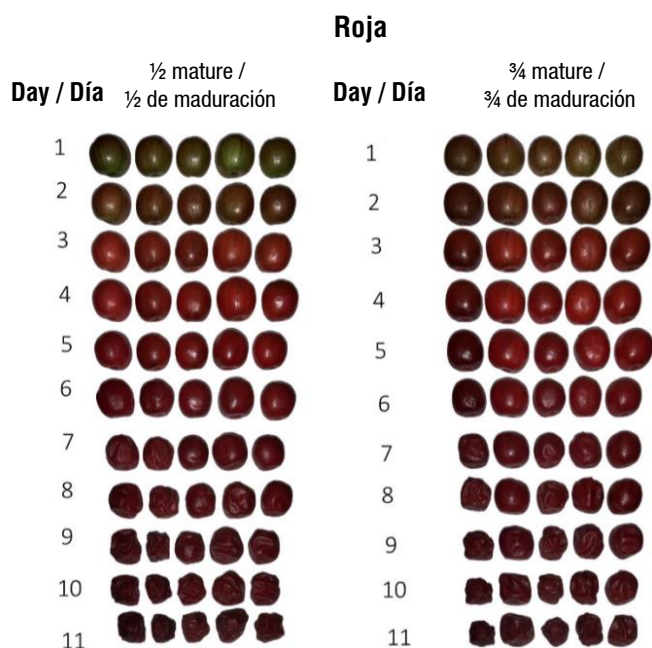


Figure 3. Visual appearance of *S. purpurea* L., variant Roja, harvested at ½ and ¾ maturity, and stored at 25 ± 2 °C (60 % relative humidity).

Figura 3. Apariencia visual de *S. purpurea* L., variante Roja, cosechada a ½ y ¾ de maduración, y almacenada a 25 ± 2 °C (60 % humedad relativa).

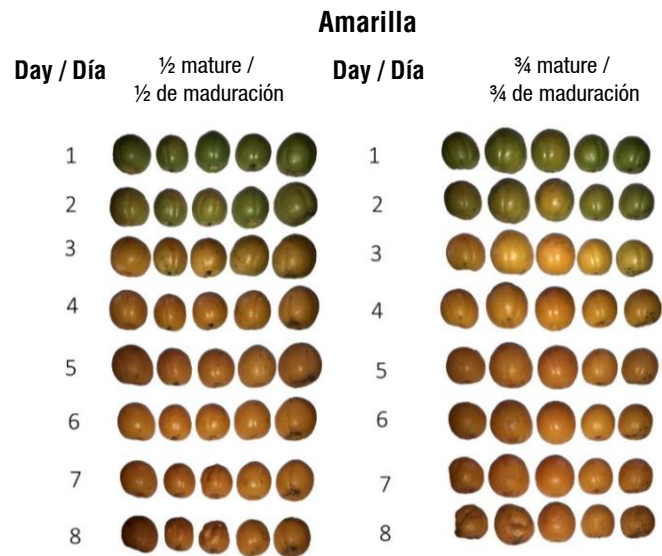


Figure 4. Visual appearance of *S. purpurea* L., variant Amarilla, harvested at 1/2 and 3/4 maturity, and stored at 25 ± 2 °C (60 % relative humidity).
Figura 4. Apariencia visual de *S. purpurea* L., variante Amarilla, cosechada a 1/2 y 3/4 de maduración, y almacenada a 25 ± 2 °C (60 % humedad relativa).

Fruit color

Epicarp color

Again, there was no relationship between maturity stage at harvest and color development in the epicarp ($P \geq 0.05$). Generally, Amarilla had the highest values of luminosity (L^*), chromaticity (C^*), and hue (h), while Morada and Roja differed only in terms of h ($P \leq 0.05$) (i.e. their L^* and C^* were very similar) (Figure 5a, 5b and 5c). In Amarilla, L^* increased during the first 3 d of ripening, only to decline later on d 4-7; values in Morada and Roja, on the other hand, decreased continuously (Figure 5a). Although C^* increased in all variants during the first 3 d of ripening, values either decreased slightly (Amarilla) or remained unchanged (Roja and Morada) for the remainder of storage (Figure 5c). Lastly, h decreased more or less continuously in all fruit (Figure 5b).

Skin color in Roja transitioned from dark green ($h = 80$, d 0) to purple-red ($h = 26.4$ to 28.9 , d 4) without any notable changes thereafter ($h = 22$ - 24 , d 6-10), whereas in Morada, color first transitioned from dark green ($h = 91$, d 0) to a tone closer to purple ($h = 30$ to 34 , d 4), then to actual purple ($h = 26$, d 5-10) (Figure 5b). Additionally, luminosity declined (i.e. colors became darker) while chromaticity increased (i.e. colors became more vivid), and this applied to both variants during storage (Figures 5a and 5c). In Amarilla, on the other hand, skin color first changed from yellow-green ($h = 91$ - 93 , d 0) to yellow ($h = 70$,

probablemente se debió a la acción de enzimas degradadoras de pectina, como la pectin-metilesterasa y poligalacturonasa, cuyas actividades incrementan durante la maduración (Maldonado-Astudillo et al., 2014). Por otro lado, los cambios inducidos por la PP en la textura de la piel (específicamente el aumento de la rugosidad y la dureza en la epidermis) probablemente fueron responsables de los valores ascendentes de firmeza en Roja y Morada del día 4 en adelante. En este sentido, la PP excesiva (cerca de 18 % en el día 4) puede ocasionar cambios importantes en el epicarpio, los cuales derivan en una resistencia incrementada a la acción de fuerzas punzantes (como las del texturómetro) (Figura 1b).

Color del fruto

Color del epicarpio

Una vez más, no hubo relación entre la etapa de maduración a la cosecha y el desarrollo de color en el epicarpio ($P \geq 0.05$). Amarilla presentó valores significativamente mayores de luminosidad (L^*), cromaticidad (C^*) y matiz (h), mientras que Morada y Roja difirieron sólo en términos de h ($P \leq 0.05$) (es decir, su L^* y C^* fueron muy similares) (Figura 5a, 5b y 5c). En Amarilla, la L^* incrementó durante los primeros 3 días de maduración y descendió del día 4 al 7. Por su parte, los valores de Morada y Roja disminuyeron constantemente (Figura 5a). Aunque la C^* aumentó en todas las variantes durante los primeros 3 días de maduración, después los valores disminuyeron ligeramente (Amarilla) o permanecieron sin cambios (Roja y Morada) por el

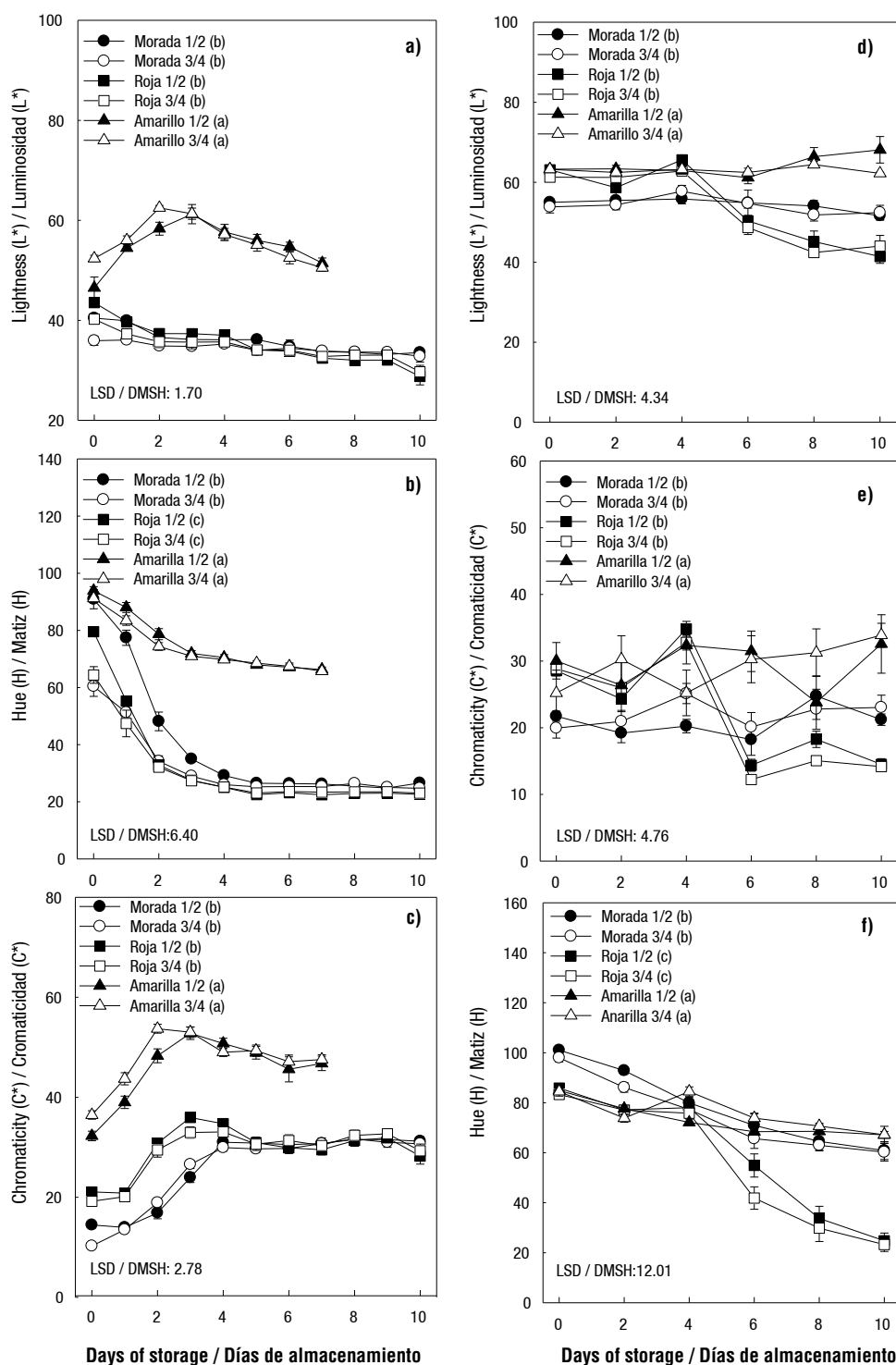


Figure 5. Epicarp (left) and pulp (right) color in three variants of *S. purpurea* L. harvested at $\frac{1}{2}$ and $\frac{3}{4}$ maturity, and stored at 25 ± 2 °C (60 % relative humidity). Each point represents the mean of six to ten measurements $\pm$ standard error. LSD = least significant difference. The same letters within parentheses indicate that the variants do not differ statistically (Tukey, $P \leq 0.05$).

Figura 5. Color del epicarpio (izquierda) y pulpa (derecha) de tres variantes de *S. purpurea* L. cosechadas a $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ de maduración, y almacenadas a 25 ± 2 °C (60 % humedad relativa). Cada punto representa la media de 6 a 10 mediciones $\pm$ el error estándar. DMSH = diferencia mínima significativa honesta. Letras iguales entre paréntesis indican que las variantes no difieren estadísticamente (Tukey, $P \leq 0.05$).

d 3-4), before arriving at yellow-orange ($h = 65$, d 7). In this case, luminosity increased (transition to yellow) only to decline later (transition to yellow-orange), whereas chromaticity rose steadily like it did in Roja and Morada (Figures 5a and 5c).

While some studies report similar values for h in other red- ($h = 32$ to 59), purple- ($h = 22$ to 25), and yellow- ($h = 73$ to 76) pigmented ecotypes (Pérez-Arias et al., 2008), others contradict our findings regarding maturity stage at harvest, noting instead a significant effect on color development during ripening (Romero-Hinojosa et al., 2021). Still, the influence is slight in those cases, and only becomes apparent when the fruit is harvested earlier; e.g., yellow ecotypes develop an orange color when harvested $\frac{3}{4}$ mature but a yellow-orange one if picked $\frac{1}{2}$ mature. Similar results are also reported in *S. purpurea* L. from Brazil. In this case, fruit harvested when the color is just starting to turn fail to develop the characteristic tone of the variety (Silva et al., 2001). Equally important is the influence of light. Montalvo-González et al. (2011) find that dry-season *S. purpurea* L. accumulates more pigments with continuous light exposure (24 h) than with either continuous darkness or alternating 12 h-cycles of light and dark.

Pulp color

The fruit's flesh was yellow-orange in both Morada and Amarilla ($h = 85$ –100), with little observable changes during ripening. This differed significantly from Roja ($P \leq 0.05$) whose flesh was reddish-orange ($h = 85$) and endured more noticeable changes. Such inter-variants differences were also more noticeable in fruit that was $\frac{3}{4}$ mature. In addition, flesh color in Amarilla was generally brighter and more vivid (i.e. had higher values of L^* and C^*) than in Roja or Morada (Figure 5d, 5e and 5f).

To our knowledge, there are no reports that discuss color change in the pulp of dry- or wet-season *S. purpurea* L. during ripening. In terms of h , however, the only values that changed significantly were the ones in Roja (Figure 5f). Coincidentally, this was also the variety with the biggest WL (Figure 1a). It is thus imperative to study if these changes are either: 1) the result of excessive water loss, or 2) due to the enzymatic oxidation of the pulp. After all, L^* did decrease after d 6, contributing to a darker tone (Figure 5d).

Respiration and ethylene production

In all variants, respiration decreased initially (from between 2.48 and 5.22 mL $\text{CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ on d 0, to between 1.8 and 2.8 mL $\text{CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ on d 1), only to increase progressively from d 2 onwards – reaching

resto del almacenamiento (Figura 5c). Por último, el h disminuyó constantemente en todos los frutos (Figura 5b).

El color de la piel en Roja presentó una transición desde verde oscuro (h de 80, día 0) hasta rojo-morado (h de 26.4 a 28.9, día 4), sin cambios perceptibles a partir de entonces (h de 22 a 24, día 6 a 10). En Morada, el color pasó de verde oscuro (h de 91, día 0) a un tono cercano al morado (h de 30 a 34, día 4), y luego a morado (h de 26, día 5) (Figura 5b). Asimismo, la luminosidad declinó (los colores se volvieron más oscuros), mientras que la cromaticidad incrementó (los colores se volvieron más vívidos); esto se verificó en ambas variantes durante el almacenamiento (Figuras 5a y 5c). Por otro lado, en Amarilla el color de piel cambió de amarillo-verde (h de 91 a 93, día 0) a amarillo (h de 70, día 3 a 4), antes de llegar a amarillo-anaranjado (h de 65, día 7). En este caso, la luminosidad incrementó (transición a amarillo) y, posteriormente, declinó (transición a amarillo-anaranjado), mientras que la cromaticidad aumentó como lo hizo en Roja y Morada (Figuras 5a y 5c).

Aunque algunos estudios reportan valores similares para h en otros ecotipos pigmentados en rojo (h de 32 a 59), morado (h de 22 a 25) y amarillo (h de 73 a 76) (Pérez-Arias et al., 2008), otros contradicen los hallazgos del presente trabajo en cuanto a la etapa de maduración a la cosecha, al destacar un efecto significativo sobre el desarrollo de color durante la maduración (Romero-Hinojosa et al., 2021). Incluso así, la influencia es ligera en esos casos, y sólo se vuelve aparente cuando el fruto se recolecta con antelación; por ejemplo, los ecotipos amarillos desarrollan un color anaranjado cuando se cosechan a $\frac{3}{4}$ de maduración, pero uno amarillo-anaranjado si se recolectan a $\frac{1}{2}$ de maduración. Silva et al. (2001) reportan resultados similares en *S. purpurea* L. de Brasil, quienes cosecharon frutos cuando el color estaba iniciando a cambiar y no lograron desarrollar el tono característico de la variedad. En este sentido, la influencia de la luz es igualmente importante. Montalvo-González et al. (2011) encontraron que la *S. purpurea* L. de temporada seca acumula más pigmentos con exposición continua a la luz (24 h) que con oscuridad continua o ciclos alternos de 12 h de luz y oscuridad.

Color de la pulpa

La pulpa del fruto resultó entre amarillo y anaranjado, tanto en Morada como en Amarilla (h de 85 a 100), con pequeños cambios observables durante la maduración. Esto fue significativamente diferente a la Roja ($P \leq 0.05$), cuya pulpa fue anaranjada-rojiza (h de 85) y sufrió cambios más notorios. Dichas diferencias inter-variantes también fueron perceptibles en la fruta que estaba a $\frac{3}{4}$ de maduración. En general, el color de la pulpa en Amarilla fue más brillante y vívida (con valores más altos de L^* y C^*), que en Roja o Morada (Figura 5d, 5e y 5f).

6.4-7.2 mL CO₂·kg⁻¹·h⁻¹ in Amarilla (d 7), and either 5.3-5.6 mL CO₂·kg⁻¹·h⁻¹ or 13.2-13.3 mL CO₂·kg⁻¹·h⁻¹ in Morada and Roja, respectively (d 10) (Figure 6a). During this period, Roja had the highest rates, which were nearly double those of Amarilla or Morada ($P \leq 0.05$) (Figure 6a). Ethylene, on the other hand, increased continuously from d 4 onwards – reaching peak values on d 7-9 in Morada and Roja (and before similar respiration maxima in these variants). Conversely, peak ethylene was not as readily apparent in Amarilla (Figure 6b). As with respiration, the highest rates were present in Roja (approx. 800 $\mu\text{L C}_2\text{H}_4\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) followed by those in Morada (approx. 400 $\mu\text{L C}_2\text{H}_4\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) and Amarilla (approx. 200 $\mu\text{L C}_2\text{H}_4\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) (Figure 6b).

These respiratory patterns strongly suggest that *S. purpurea* L. is indeed climacteric, agreeing with the findings of Osuna-García et al. (2011), Montalvo-González et al. (2011), and Maldonado-Astudillo et al. (2023), who also find respiratory peaks on d 3 and 9 after harvest in both cv Lutea and another yellow-pigmented variant from southern Mexico. On the other hand, Pérez-López et al. (2004) fail to notice climacteric behavior in a similarly-pigmented ecotype from Oaxaca. Regarding ethylene, Montalvo-González et al. (2011) report maximum production 5 d after harvest (again, in cv. Lutea from Nayarit), whereas Álvarez-Vargas et al. (2017) find great variability in the production of this hormone in 102 accessions of dry- and wet-season fruit (all *S. purpurea* L. at the ripe stage).

As respiration rate and ethylene production are both excellent indicators of a fruit's metabolic activity and storage potential (Kader, 2002; Wills & Golding, 2016), it is not surprising that the biggest WL and shortest marketable appearance (5-6 d) occurred in Roja, the variant with the highest values in these two parameters. Sampaio et al. (2008) likewise describe a shorter shelf-life in fruit with high respiratory activities (less than 2 d, compared to the almost 6 d of varieties with low rates), citing both climactic conditions and genetic variability as the likely causes (in this case, the *S. purpurea* L. used were cultivated in northern Brazil).

In the present study, however, there was no effect of maturity stage at harvest on respiratory activity ($P \geq 0.05$; Figure 6a), something which conflicts with reports like those of Pérez-López et al. (2004), who do find higher rates of CO₂ production in fruit harvested $\frac{3}{4}$ mature compared to those harvested $\frac{1}{2}$ mature (at least in the yellow-pigmented ecotype evaluated). Still, no effect on ethylene production was found in that study also.

Total soluble solids

The content of these differed in Amarilla ($P \leq 0.05$) compared to those in Roja and Morada, with maturity

Hasta donde se sabe, no hay reportes que aborden el cambio de color en la pulpa de *S. purpurea* L. de temporada seca o húmeda durante la maduración. No obstante, en términos de los únicos valores que cambiaron significativamente fueron los de Roja (Figura 5f). Coincidentemente, ésta también fue la variedad con la mayor PP (Figura 1a); por ello, resulta imperativo estudiar si estos cambios son: 1) resultado de la pérdida excesiva de agua o 2) debidos a la oxidación enzimática de la pulpa. Después de todo, la L* disminuyó a partir del día 6, lo cual contribuyó a la presencia de un tono más oscuro (Figura 5d).

Respiración y producción de etileno

En todas las variantes, la respiración disminuyó al inicio (desde un rango de 2.48 a 5.22 mL CO₂·kg⁻¹·h⁻¹ en el día 0, hasta entre 1.8 y 2.8 mL CO₂·kg⁻¹·h⁻¹ el día 1), y después incrementó progresivamente del día 2 en adelante, al alcanzar valores de 6.4 a 7.2 mL CO₂·kg⁻¹·h⁻¹ en Amarilla (día 7), de 5.3 a 5.6 mL CO₂·kg⁻¹·h⁻¹ en Morada y de 13.2 a 13.3 mL CO₂·kg⁻¹·h⁻¹ en Roja (día 10) (Figura 6a). Durante este periodo, Roja presentó las tasas de respiración más altas, las cuales fueron cerca del doble de las de Amarilla y Morada ($P \leq 0.05$) (Figura 6a). Por otro lado, el etileno incrementó continuamente a partir del día 4, hasta alcanzar los valores más altos entre el día 7 y 9 en Morada y Roja (antes de la máxima respiración en estas variantes). En cambio, el pico máximo de etileno no fue tan perceptible en Amarilla (Figura 6b). Como en el caso de la respiración, los valores más altos de etileno correspondieron a Roja (aproximadamente 800 $\mu\text{L C}_2\text{H}_4\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$), seguidos por los de Morada (aproximadamente 400 $\mu\text{L C}_2\text{H}_4\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) y Amarilla (aproximadamente 200 $\mu\text{L C}_2\text{H}_4\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) (Figura 6b).

Los patrones de respiración observados sugieren que *S. purpurea* L. es climatérica, lo cual concuerda con los hallazgos de Osuna-García et al. (2011), Montalvo-González et al. (2011), y Maldonado-Astudillo et al. (2023), quienes encontraron picos respiratorios a los 3 y 9 días después de la cosecha en el cv. Lutea y otra variante pigmentada de amarillo del sur de México. Por otra parte, Pérez-López et al. (2004) no notaron comportamiento climatérico en un ecotipo amarillo de Oaxaca. En cuanto al etileno, Montalvo-González et al. (2011) reportan producción máxima a los 5 días después de la cosecha (en el cv. Lutea de Nayarit), mientras que Álvarez-Vargas et al. (2017) obtuvieron una gran variabilidad en la producción de esta hormona en 102 recolectas de fruta de temporadas seca y húmeda (todas de *S. purpurea* L. en etapa de madurez).

Debido a que la tasa de respiración y la producción de etileno son indicadores de la actividad metabólica de un fruto y del potencial de almacenamiento (Kader, 2002; Wills & Golding, 2016), era de esperarse que la mayor PP y la apariencia comercializable más corta (5 a

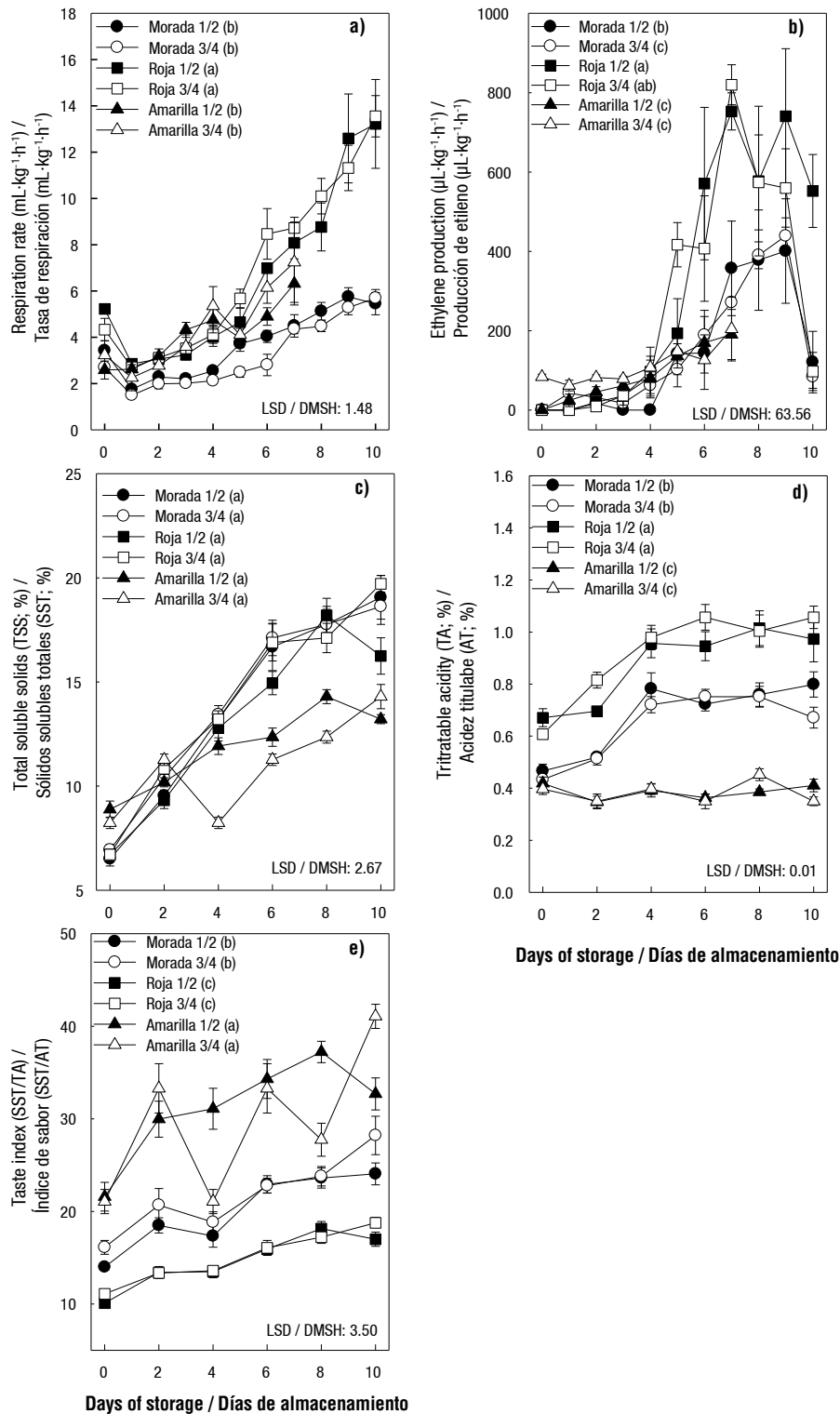


Figure 6. Physiological and chemical changes in three variants of *S. purpurea* L. harvested at $\frac{1}{2}$ and $\frac{3}{4}$ maturity, and stored at $25 \pm 2^\circ\text{C}$ (60 % relative humidity). Each point represents the mean of six to ten measurements $\pm$ standard error. LSD = least significant difference. The same letters within parentheses indicate that the variants do not differ statistically (Tukey, $P \leq 0.05$).

Figura 6. Cambios fisiológicos y químicos de tres variantes de *S. purpurea* L. cosechadas a $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ de maduración, y almacenadas a $25 \pm 2^\circ\text{C}$ (60 % humedad relativa). Cada punto representa la media de seis a diez mediciones $\pm$ el error estándar. DMSH = diferencia mínima significativa honesta. Letras iguales entre paréntesis indican que las variantes no difieren estadísticamente (Tukey, $P \leq 0.05$).

stage having no influence on any of them (Figure 6c). Values initially fluctuated between 6.3 and 8.9 % (all variants considered), eventually reaching 13.2-14.3 % in Amarilla, 18 % in Morada, and 16.2-18.9 % in Roja (Figure 6c).

The active degradation of starch was likely the main reason behind the increments in TSS that were recorded. After all, from the roughly 9 % present in the mesocarp of *S. purpurea* L., a majority (approx. 80 %) becomes hydrolyzed during ripening (Cunha et al., 2001). Similar findings are also reported in *S. purpurea* L. from the same region; e.g., in a red-pigmented ecotype from Nayarit, TSS increases from 7.7 % on d 0, to 15-15.7 % on d 6-8 (Osuna-García et al., 2011). However, other studies like that of Osuna-García et al. (2011) describe an influence of maturity stage at harvest on the final content of TSS in these fruits, when comparing the green-mature (13.0-14.4 % TSS) and $\frac{3}{4}$ mature (12.5-13.8 % TSS) stages of a yellow-pigmented variant from Nayarit.

Titrateable acidity

Values were clearly different in all three variants of *S. purpurea* L. evaluated ($P \leq 0.05$) (Figure 6d). Initially, they were 0.41 % in Amarilla, 0.44 % in Morada, and 0.63 % in Roja, which then increased to 0.74 and 1.0 % respectively in the latter two (d 4-6); these then remained constant until the end of storage. Values in Amarilla, on the other hand, remained essentially the same throughout ripening (0.42 % on average). As in all previous cases, maturity stage had no influence on this parameter (Figure 6d).

Large inter-variants differences like the ones detected are not infrequent. For instance, in 102 accessions of dry- and wet-season *S. purpurea* L., TA varied between 0.1 and 0.74 % (Álvarez-Vargas et al., 2017). The authors attribute this to a combination of different factors, including genetic and environmental ones. In addition, developing fruit have a great capacity to synthesize organic acids *in situ* (Bollard, 1978; Atkinson et al., 2017) and this was clearly observed in variants Roja and Morada. Despite this, Sampaio et al. (2008) find that TA is higher at the beginning of ripening before decreasing slightly (to 1.1-1.0 % after 6-8 d in the green-mature fruits of a red-pigmented variant from Brazil), while Montalvo-González et al. (2011) report only a steady increase in cv. Lutea.

Taste index (TI)

The TSS/TA ratio or TI increased in all fruit, with obvious differences between variants; however, there was again no clear effect of maturity stage at harvest (Figure 6e). In this case, the highest values were present in Amarilla (initial = 21, final = 32-40), followed by

6 días) ocurriera en Roja, que fue la variante con los valores más altos en estos dos parámetros. Sampaio et al. (2008) describen una vida de anaquel más corta en frutos con actividades respiratorias altas (menos de 2 días, comparado con los casi 6 días en las variedades con tasas bajas), y señalan a las condiciones climáticas y a la variabilidad genética como las causas probables (en este caso, las variedades de *S. purpurea* L. utilizadas fueron cultivadas en el norte de Brasil).

En el presente estudio, no se observaron efectos de la etapa de maduración sobre la actividad respiratoria ($P \geq 0.05$; Figura 6a), lo cual contradice lo reportado por Pérez-López et al. (2004), quienes obtuvieron tasas más altas de producción de CO₂ en frutos cosechados a $\frac{3}{4}$ de maduración comparados con los de $\frac{1}{2}$ de maduración (al menos en el ecotipo amarillo evaluado); aun así, no encontraron efecto significativo en la producción de etileno.

Sólidos solubles totales

El contenido de SST difirió en Amarilla ($P \leq 0.05$), comparado con el de Roja y Morada, sin que la etapa de maduración influyera en ninguna variante (Figura 6c). Inicialmente, los valores fluctuaron entre 6.3 y 8.9 % (en todas las variantes), y alcanzaron de 13.2 a 14.3 % en Amarilla, 18 % en Morada y de 16.2 a 18.9 % en Roja (Figura 6c).

Probablemente, la degradación activa de almidón fue la razón principal de los incrementos registrados en SST. Después de todo, de los cerca de 9 % presentes en el mesocarpio de *S. purpurea* L., una mayoría (aproximadamente 80 %) se hidroliza durante la maduración (Cunha et al., 2001). Osuna-García et al. (2011) reportan resultados similares en una variante pigmentada de rojo de Nayarit, donde los SST incrementaron de 7.7 % en el día 0, hasta 15 a 15.7 % en los días 6 a 8. No obstante, estos autores describen la influencia de la etapa de maduración en la cosecha sobre el contenido final de SST, al comparar las etapas de maduración verde (13.0 a 14.4 % SST) y $\frac{3}{4}$ (12.5 a 13.8 % SST) de una variante pigmentada de amarillo de Nayarit.

Acidez titulable

Los valores fueron claramente diferentes en las tres variantes evaluadas de *S. purpurea* L. ($P \leq 0.05$) (Figura 6d). Inicialmente, fueron de 0.41 % en Amarilla, 0.44 % en Morada y 0.63 % en Roja, e incrementaron a 0.74 y 1.0 %, respectivamente, en las dos últimas (día 4 a 6), y permanecieron constante hasta el final del almacenamiento. Por su parte, los valores en Amarilla, permanecieron similares a lo largo de la maduración (0.42 % en promedio). Como en los casos previos, la etapa de maduración no influyó sobre este parámetro (Figura 6d).

those in Morada (initial = 13.8-15.9, final = 24-28) and Roja (initial = 9.8-10.9, final = 16.8-18.2). Such behavior is mainly attributable to a faster rise in TSS compared to TA (with acidity remaining constant in variety Amarilla) something which differs from the usual decline seen in many fruits during ripening (Wills & Golding, 2016). In this context, it is likely that Amarilla will be perceived as the sweetest, given that it has the highest TI out of the three varieties. Still, other factors such as the sugar-acid balance (which was better in Roja and Morada) also influence consumer acceptance, and thus need to be considered carefully. Finally, only one other report that we know of discusses TI in *S. purpurea* L. (Sampaio et al., 2008), but it presents similar trends as those in this study (e.g. values of 6.7 and 15-15.7 in fruits at the green-mature and ripe stages, respectively).

Total phenolic compounds and flavonoids

Total phenolics increased after 2-4 d of ripening, though this was not as clear in Amarilla (40-50 $\text{mg}_{\text{GAE}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ compared to the 85-130 $\text{mg}_{\text{GAE}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ of both Roja and Morada) (Figure 7a). Concentrations subsequently declined on d 4-6 (to 45-70 $\text{mg}_{\text{GAE}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) before stabilizing until d 10. Flavonoids, on the other hand, experienced little change until d 4, after which they increased significantly in both Morada and Roja (49-66 $\text{mg}_{\text{QE}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ combined). The opposite was true for Amarilla, where values first declined (to 22 $\text{mg}_{\text{QE}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) before remaining constant (Figure 7b).

The increase in phenolics (first ripening stage, d 2-4) and flavonoids (second ripening stage, d 6-10) observed in Roja and Morada can be attributed to the synthesis of anthocyanins (pigments from the flavonoid group) during the process of ripening. Indeed, Sollano-Mendieta et al. (2011) report concentrations of 2-14 mg equivalents of cyanidin 3-glucoside in 100 g in 12 varieties of red- and purple-pigmented *S. purpurea* L. In terms of total phenolics, however, intervals of 90-570 $\text{mg}_{\text{GAE}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ (in 12 variants from the state of Guerrero; Solorzano-Morán et al., 2015), 40.1-221.6 $\text{mg}_{\text{GAE}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ (in 102 dry- and wet-season accessions; Álvarez-Vargas et al., 2017), 91-190 $\text{mg}_{\text{GAE}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ (in the variant Cuernavaca; Suárez-Vargas et al., 2017), and 123 $\text{mg}_{\text{GAE}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ (in *S. purpurea* L. from Brazil; Barreiros et al., 2018) have all been reported thus far. Hence, moderate concentrations of these compounds are likely the norm in fruits of this species, making them important dietary sources of antioxidants. Regarding flavonoids, intervals of 196-369 $\text{mg}_{\text{QE}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ (in 12 varieties of dry-season *S. purpurea* L.; Sollano-Mendieta et al., 2011) and 109-215 $\text{mg}_{\text{QE}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ (in four maturity stages of the ecotype Cuernavaca; Suárez-Vargas et al., 2017) are described in the literature, much higher than those obtained in the present work. Thus, genetics and environmental conditions must undoubtedly play a role also.

Las grandes diferencias inter-variantes detectadas no son frecuentes. En 102 colectas de *S. purpurea* L. de etapas seca y húmeda, la AT varió entre 0.1 y 0.74 % (Álvarez-Vargas et al., 2017). Los autores atribuyen esto a la combinación de diferentes factores, incluyendo los genéticos y los ambientales. Además, la fruta en desarrollo tiene una gran capacidad para sintetizar ácidos orgánicos *in situ* (Bollard, 1978; Atkinson et al., 2017), lo cual se observó claramente en las variantes Roja y Morada. A pesar de esto, Sampaio et al. (2008) mencionan que la AT es más alta al principio de la maduración, antes de disminuir ligeramente (de 1.1 a 1.0 % después de 6 a 8 días en frutos en madurez fisiológica de una variante Roja de Brasil), mientras que Montalvo-González et al. (2011) reportan únicamente un incremento estable en el cv. Lutea.

Índice de sabor (IS)

La relación SST/AT o IS incrementó en todos los frutos, con diferencias evidentes entre variantes; sin embargo, no hubo un efecto claro en la etapa de maduración en la cosecha (Figura 6e). Los valores más altos estuvieron presentes en Amarilla (inicial de 21 y final de 32 a 40), seguidos por los de Morada (inicial de 13.8 a 15.9 y final de 24 a 28) y Roja (inicial de 9.8 a 10.9 y final de 16.8 a 18.2). Este comportamiento se atribuye, principalmente, a un incremento más rápido en SST comparado con la AT (en Amarilla la AT permaneció constante), algo que difiere de la declinación usual observada en muchos frutos durante la maduración (Wills & Golding, 2016). En este contexto, es probable que Amarilla sea percibida como la más dulce, ya que tiene el IS más alto. Otros factores como el balance azúcar-acidez (que fue mejor en Roja y Morada) también influyen en la aceptación del consumidor, y por ello es necesario considerarlo cuidadosamente. Únicamente algunos reportes abordan el IS en *S. purpurea* L. (Sampaio et al., 2008), pero presentan tendencias similares a las de este estudio (valores de 6.7 y de 15 a 15.7 en frutos en las etapas de madurez fisiológica y madurez de consumo, respectivamente).

Compuestos fenólicos totales y flavonoides

Los fenoles totales incrementaron después de 2 a 4 días de maduración, aunque esto no fue tan notorio en Amarilla (40 a 50 $\text{mg}_{\text{EAG}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$, comparado con 85 a 130 $\text{mg}_{\text{EAG}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ de Roja y Morada) (Figura 7a). Después, las concentraciones disminuyeron en los días 4 a 6 (45 a 70 $\text{mg}_{\text{EAG}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$), antes de estabilizarse hasta el día 10. Por otro lado, los flavonoides experimentaron un cambio pequeño hasta el día 4, para después incrementar significativamente tanto en Morada como en Roja (49 a 66 $\text{mg}_{\text{EQ}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ en ambas). Lo opuesto ocurrió en Amarilla, donde los valores primero disminuyeron (a 22 $\text{mg}_{\text{EQ}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) y luego permanecieron constantes (Figura 7b).

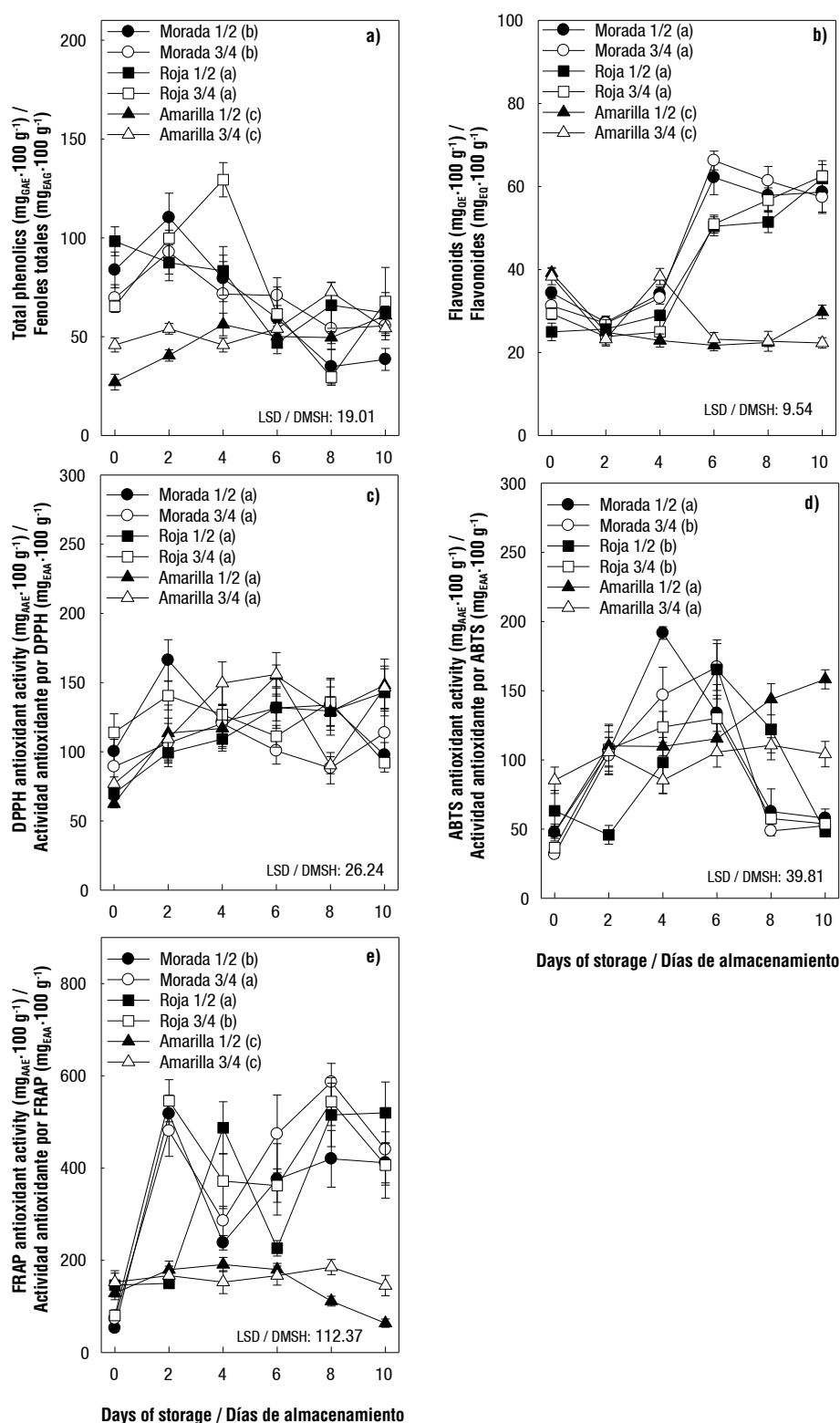


Figure 7. Phenolics, flavonoids, and antioxidant activity in three variants of *S. purpurea* L. harvested at ½ and ¾ maturity, and stored at 25 ± 2 °C (60 % relative humidity). Each point represents the mean of six to ten measurements ± standard error. LSD = least significant difference. The same letters within parentheses indicate that the variants do not differ statistically (Tukey, $P \leq 0.05$).

Figura 7. Fenoles, flavonoides y actividad antioxidante de tres variantes de *S. purpurea* L. cosechadas a ½ y ¾ de maduración, y almacenadas a 25 ± 2 °C (60 % humedad relativa). Cada punto representa la media de seis a diez mediciones ± el error estándar. DMSH = diferencia mínima significativa honesta. Letras iguales entre paréntesis indican que las variantes no difieren estadísticamente (Tukey, $P \leq 0.05$).

Antioxidant activity

There were no inter-variants differences in DPPH-determined antioxidant activities (initial = 62-113 $\text{mg}_{\text{AAE}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$, final = 95-145 $\text{mg}_{\text{AAE}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) as well as no discernable trend (Figure 7c). However, when using the ABTS method, $\frac{3}{4}$ mature Roja (50 $\text{mg}_{\text{AAE}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) and Amarilla (100 $\text{mg}_{\text{AAE}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) fruits differed from all the rest on d 8-10 (Figure 7d). A more discernable trend appeared using the FRAP method; in this case, antioxidant activities increased both in Roja and Morada (initial = 50-151 $\text{mg}_{\text{AAE}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$, final = 400-500 $\text{mg}_{\text{AAE}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ on d 8-10), albeit with moderate fluctuations. On the other hand, values hardly changed in Amarilla (150-190 $\text{mg}_{\text{AAE}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ during the longest ripening period), although they did decrease more noticeably after d 6, eventually reaching 62-141 $\text{mg}_{\text{AAE}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ on d 10 d (Figure 7e).

Only FRAP-determined antioxidant activities were consistent with the levels of secondary metabolites in each variety. For instance, activities in Roja and Morada coincided with color development (i.e. with the production of anthocyanins) and with the rise and fall of both phenolics (peak levels on d 2-4) and flavonoids (peak levels on d 6-10). Conversely, variety Amarilla presented the least amount of activity due to the small quantities of these compounds throughout all of ripening. FRAP-determined antioxidant activities were also higher than those obtained by either the ABTS or DPPH methods. In fact, the results of these two assays were very similar – something which contradicts prior reports that find ABTS-determined activities to be greater than those obtained by the DPPH method. This is presumably because in the former (ABTS method), both aqueous and lipid molecules react (Sollano-Mendieta et al., 2011).

Conclusions

Inter-variants differences in the fruit of *S. purpurea* L. make general recommendations on postharvest management difficult. However, adequate control of temperature, relative humidity, and transpiration-associated WL (e.g. the application of edible coatings or of modified atmosphere packaging) is essential in all three variants. Apart from this, the use of refrigeration to increase postharvest life is perhaps more relevant for Roja, whereas handling and transportation will likely cause less physical damage to Morada. On the other hand, Amarilla will almost certainly be perceived as the sweetest given its specific content of TSS, TA, and TI (though the actual sugar-acid balance is much better in Roja and Morada). Roja and Morada are also more likely to be accepted by the health-conscious consumer given their higher content of phenolics and flavonoids (which result in higher antioxidant activities) compared to Amarilla.

Los incrementos en fenoles (primera etapa de maduración, días 2 a 4) y flavonoides (segunda etapa de maduración, días 6 a 10) observados en Roja y Morada se pueden atribuir a la síntesis de antocianinas (pigmentos del grupo flavonoide) durante el proceso de maduración. Sollano-Mendieta et al. (2011) reportan concentraciones de 2 a 14 mg equivalentes de cianidina 3-glucosido en 100 g en 12 variantes de *S. purpurea* L. pigmentadas de rojo y morado. Sin embargo, en términos de fenoles totales, se han reportado intervalos de 90 a 570 $\text{mg}_{\text{EAG}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ (en 12 variantes del estado de Guerrero; Solorzano-Morán et al., 2015), de 40.1 a 221.6 $\text{mg}_{\text{EAG}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ (en 102 recolectas de temporadas seca y húmeda; Álvarez-Vargas et al., 2017), de 91 a 190 $\text{mg}_{\text{EAG}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ (en la variante Cuernavaqueña; Suárez-Vargas et al., 2017) y 123 $\text{mg}_{\text{EAG}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ (en *S. purpurea* L. de Brasil; Barreiros et al., 2018). Por lo tanto, es probable que concentraciones moderadas de estos compuestos sean lo normal en frutos de esta especie, lo cual los convierte en importantes fuentes de antioxidantes. En cuanto a los flavonoides, en la literatura se describen intervalos de 196 a 369 $\text{mg}_{\text{EQ}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ (en 12 variedades de *S. purpurea* L. de temporada seca; Sollano-Mendieta et al., 2011) y de 109 a 215 $\text{mg}_{\text{EQ}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ (en cuatro etapas de maduración del ecotipo Cuernavaqueña; Suárez-Vargas et al., 2017), mucho más altos que los obtenidos en este estudio. Así, la genética y las condiciones medioambientales indudablemente también juegan un papel.

Actividad antioxidante

No se detectaron diferencias inter-variantes en las actividades antioxidantes determinadas mediante DPPH (inicial de 62 a 113 $\text{mg}_{\text{EAA}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ y final de 95 a 145 $\text{mg}_{\text{EAA}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$), ni alguna tendencia distinguible (Figura 7c). No obstante, con el método ABTS, los frutos de Roja (50 $\text{mg}_{\text{EAA}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) y Amarilla (100 $\text{mg}_{\text{EAA}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) de $\frac{3}{4}$ de maduración difirieron significativamente en los días 8 a 10 (Figura 7d). Una tendencia más perceptible se observó con el método FRAP, donde las actividades antioxidantes incrementaron tanto en Roja como en Morada (inicial de 50 a 151 $\text{mg}_{\text{EAA}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ y final de 400 a 500 $\text{mg}_{\text{EAA}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ en los días 8 a 10), aunque con fluctuaciones moderadas. Por su parte, los valores cambiaron poco en Amarilla (de 150 a 190 $\text{mg}_{\text{EAA}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ durante el periodo más largo de maduración), aunque disminuyeron más visiblemente después del día 6 y alcanzaron de 62 a 141 $\text{mg}_{\text{EAA}} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ el día 10 (Figura 7e).

Solo las actividades antioxidantes determinadas mediante FRAP fueron consistentes con los niveles de metabolitos secundarios en cada variedad. Las actividades en Roja y Morada coincidieron con el desarrollo de color (es decir, con la producción de antocianinas), así como con el incremento y disminución de fenoles (niveles máximos entre los días 2 y 4) y flavonoides (niveles máximos entre

Acknowledgements

The authors would like to thank the Mexican Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) for the scholarship awarded to Samuel Cancino-Labra (no. 772691), as well as SEP-PRODEP and the Mexican *S. purpurea* L. network (“Red de Ciruelas Mexicanas” or SADER, for funding this research. We would also like to thank B. Sci. (Hons.) Leonardo Castillo Pelayo for his assistance during the drafting of the English-language version of this manuscript.

End of English version

References / Referencias

- Álvarez-Vargas, J. E., Alia-Tejagal, I., Chávez-Franco, S. H., Colinas-León, M. T., Nieto-Ángel, I., Rivera-Cabrera, F., & Aguilar-Pérez, L. A. (2017). Ciruelas mexicanas (*Spondias purpurea* L.) de clima húmedo y seco: calidad, metabolitos funcionales y actividad antioxidante. *Interciencia*, 42(10), 653-660. <https://www.redalyc.org/pdf/339/33953313005.pdf>
- Álvarez-Vargas, J. E., Alia-Tejagal, I., Chávez-Franco, S. H., Colinas-León, M. T., Rivera-Cabrera, D., Nieto-Ángel, A., Cruz, L., Aguilar-Pérez, L. A., & Pelayo, C. Z. (2019). Phenological stages and fruit development in the Mexican plum ecotype ‘Cuernavaqueña’ (*Spondias purpurea* L.). *Fruits*, 74(4), 194-200. <https://doi.org/10.17660/th2019/74.4.6>
- Arvouet-Grand, A., Vennat, B., Pourrat, A., & Legret, P. (1994). Standardisation d'un extrait de propolis et identification des principaux constituants. *Journal de Pharmacie de Belgique*, 49(6), 462-468.
- Association of Official Analytical Chemists (AOAC) (1990). *Official Methods of Analysis*. <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/002/aoac.methods.1.1990.pdf>
- Atkinson, R. G., Brummell, D. A., Burdon, J. N., Patterson, K. J., & Schaffe, R. J. (2017). Fruit growth, ripening and post-harvest physiology. In: Brummell, D. A. (ed.), *Plants in action*. Australian Society of Plant Scientist. <https://www.asps.org.au/wp-content/uploads/Chapter-11-Fruit-growth-ripening-and-post-harvest-physiology.pdf>
- Avitia-García, E., Castillo-González, A. M., & Pimienta-Barrioc, E. (2003). *Ciruela mexicana y otras especies del género Spondias* L. Universidad Autónoma Chapingo.
- Barreiros, M. L., de Jesús, R. A., Barreiros, A. L., Sandes, T. S., Ramalho, S. A., & Narain, N. (2018). Evaluation of the antioxidant activity of eight tropical fruits by DPPH method. *Acta Horticulturae*, 1198, 185-192. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1198.29>
- Bautista-Baños, S., Díaz-Pérez, J. C., Barrera-Necha, L. L., & Bravo-Luna, L. (2003). Postharvest study of red-mombin (*Spondias purpurea* L.) fruit during storage. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 5(2), 82-85. <https://readlyc.org/pdf/813/81350203.pdf>
- los días 6 y 10). Por el contrario, Amarilla presentó la menor actividad debido a las pequeñas cantidades de compuestos a lo largo de la maduración. Las actividades antioxidantes determinadas mediante FRAP también fueron más altas que las obtenidas mediante ABTS o DPPH. De hecho, los resultados de estos dos ensayos fueron muy parecidos, lo cual contradice reportes anteriores donde encontraron que las actividades determinadas mediante ABTS son mayores que las obtenidas con DPPH. Presuntamente, esto es debido a que en el primero (ABTS) reaccionan las moléculas acuosas y lipídicas (Sollano-Mendieta et al., 2011).

Conclusiones

Las diferencias inter-variantes en los frutos de *S. purpurea* L. dificultan las recomendaciones generales en el manejo poscosecha. Sin embargo, el control adecuado de la temperatura, humedad relativa y transpiración asociada con la PP (como la aplicación de coberturas comestibles o el uso de empaques de atmósfera modificada) es esencial en las tres variantes. Más allá de esto, el uso de refrigeración para prolongar la vida poscosecha puede ser más relevante para Roja, mientras que el manejo y transporte probablemente causarían menos daños físicos a Morada. Por otra parte, Amarilla, seguramente, sería percibida como la más dulce debido a sus contenidos específicos de SST, AT e IS (a pesar de que el balance azúcar-ácido real es mucho mejor en Roja y Morada). Roja y Morada tienen más probabilidad de aceptación por parte de consumidores preocupados por la salud dado su mayor contenido de fenoles y flavonoides (que derivan en mayores actividades antioxidantes) en comparación con la Amarilla.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) por la beca otorgada a Samuel Cancino-Labra (Núm. 772691), así como a SEP-PRODEP y a la red mexicana de *S. purpurea* L. (“Red de Ciruelas Mexicanas” o SADER), por auspiciar esta investigación. También desean agradecer al ingeniero (con honores) Leonardo Castillo Pelayo por su ayuda durante la escritura de la versión en inglés de este manuscrito.

Fin de la versión en español

- Benzie, I. F., & Strain, J. J. (1996). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of "Antioxidant Power": The FRAP assay. *Analytical Biochemistry*, 239(1), 70-76. <https://doi.org/10.1006/abio.1996.0292>
- Bollard, E. G. (1978). The physiology and nutrition of developing fruits. In: Hulme, A. C. (ed.), *The biochemistry of fruits and their products* (pp. 387-425). Academic Press.
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology*, 28(1), 25-30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- Cancino-Labra, S., Alia-Tejagal, I., López-Martínez, V., & Juárez-López, P. (2023a). Fruit growth in three ecotypes of dry-season *Spondias purpurea* L. *Acta Universitaria*, 33, 3768. <http://doi.org/10.15174.au.2023.3768>
- Cancino-Labra, S., Alia-Tejagal, I., Pérez-Arias, G. A., & Villarreal-Fuentes, J. M. (2023b). Phenophase description in dry season *Spondias purpurea* L. using a modified version of the BBCH scale. *Scientia Horticulturae*, 318, 112086. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112086>
- Cruz-León, A., & Rodríguez-Haros, B. (2012). Cultivo. In: Cruz, L. A., Pita, D. Á., & Rodríguez, H. B. (eds.), *Jocotes, jobos, abales o ciruelas mexicanas* (pp. 77-101). Universidad Autónoma Chapingo. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/232189/jocotes_jobos_abales_o_ciruelas_mexicanas.pdf
- Cunha, H. A., Elesbao, R. A., Cordeiro, A. O., Herbster, C. F., & Costa, N. C. (2001). Calidad de frutas nativas de Latinoamérica para industria: Ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.). *Proceedings of Interamerican Society for Tropical Horticulture*, 43, 72-76. <http://www.pubhort.org/iassth/43/0015.htm>
- Díaz-Padilla, G., Serrano-Altamirano, V., Ruíz-Corral, J. U., Ambriz-Cervantes, R., & Cano-García, M. G. (2008). *Estadísticas climatológicas básicas del Estado de Morelos (período 1961-2003)*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Erkan, M., & Dogan, A. (2020). Harvesting of horticultural commodities. In: Yahia, E. M. (ed.), *Postharvest technology of perishable horticultural commodities* (pp. 120-159). Elsevier-Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813276-0.00005-5>
- Ferrer, M. M., Ruenes-Morales, R., Montañez-Escalante, P. I., & Estrada-Medina, H. (2022). Mexican plum (*Spondias purpurea* L.). In: Sivakumar, D., Sultanbawa, Y., & Netzel, M. (ed.), *Handbook of phytonutrients in indigenous fruits and vegetables* (pp. 405-420). CAB International. <https://doi.org/10.1079/9781789248067.0028>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Universidad Nacional Autónoma de México. <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/83/82/251-1>
- Kader, A. (2002). Postharvest biology and technology: An overview. In: Kader (ed.), *Postharvest technology of horticultural crops* (pp. 39-47). University of California/Agricultural and Natural Resources.
- Kasajima, I. (2019). Measuring plant colors. *Plant Biotechnology*, 36(2), 63-75. <https://doi.org/10.5511/plantbiotechnology.19.0322a>
- Maldonado-Astudillo, Y. I., Alia-Tejagal, I., Núñez-Colín, C. A., Jiménez-Hernández, J., Pelayo-Zaldívar, C., López-Martínez, V., Andrade-Rodríguez, M., Bautista-Baños, S., & Valle-Guadarrama, S. (2014). Postharvest physiology and technology of *Spondias purpurea* L. and *S. mombin* L. *Scientia Horticulturae*, 174(1), 193-206. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.05.016>
- Maldonado-Astudillo, Y. I., Alia-Tejagal, I., Jiménez-Hernández, J., & Núñez-Colín, C. A. (2023). Postharvest quality and physiological changes in five ecotypes of *Spondias purpurea* L. harvested at three distinct maturity stages. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 45, 2-607. <https://doi.org/10.1590/0100-29452023607>
- Martins, L. P., Silva, S. M., Alves, R. E., & Filgueiras, H. A. (2003). Desenvolvimento de frutos de cirigueira (*Spondias purpurea* L.). *Revista Brasileira de Fruticultura*, 25(1), 11-14. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452003000100005>
- Mohammed, M., Bridgemohan, P., Graham, O., Wickham, L., Bridgemohan, R. S., & Mohammed, Z. (2019). Postharvest physiology, biochemistry and quality management of chili plum (*Spondias purpurea* var. Lutea): A review. *Journal of Food Research*, 8(3), 1-15. <https://doi.org/10.5539/jfr.v8n3p1>
- Montalvo-González, G. E., García, S. H., Mata-Montes, M., & Tovar-Gómez, B. (2011). Efecto de la luz en ciruela mexicana manejada en diferentes condiciones de almacenamiento. *CyTA - Journal Food*, 9(1), 65-70. <https://doi.org/10.1080/19476331003642562>
- Osuna-García, J. A., Pérez-Barraza, M. H., Vázquez-Valdivia, V., & Gómez-Jaimez, R. (2011). Aplicación de 1-Metilciclopropeno (1-MCP) y su efecto en ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 34(3), 197-2004. <https://doi.org/10.35196/rfm.2011.3.197>
- Pérez-Arias, G. A., Alia-Tejagal, I., Andrade-Rodríguez, M., López-Martínez, V., Pérez-López, A., Ariza-Flores, R., Otero-Sánchez, M. A., & Villarreal-Fuentes, J. M. (2008). Características físicas y químicas de ciruela mexicana (*Spondias purpurea*) en Guerrero. *Investigación Agropecuaria*, 52(2), 141-149.
- Pérez-López, A., Saucedo-Veloz, C., Arévalo-Galarza, M. L., & Muratalla-Lúa, A. (2004). Efecto del grado de madurez en la calidad y vida postcosecha de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 27(2), 133-139. <https://doi.org/10.35196/rfm.2004.2.133>
- Romero-Hinojosa, B. M., Arzate-Bolaños, J. J., Alia-Tejagal, I., Álvarez-Vargas, J. E., Pérez-Arias, G. A., Galindo-García, D. V., & Guillén-Sánchez, D. (2021). Postharvest of four ecotypes of Mexican plum (*Spondias purpurea* L.) grown in Morelos, Mexico. *Current Topics in Agronomic Science*, 1(1), 21-29. <https://doi.org/10.5154/r.ctasci.2021.08.02a>
- Saltveit, M. E. (2016). Respiratory metabolism. In: Pareek, S. (ed.), *Postharvest ripening physiology of crops* (pp. 139-156). CRC Press.
- Sampaio, S., Bora, P., & Holschuh, H. (2008). Postharvest respiration and maturation of some lesser-known exotic fruits from Brazil – ciriguela (*Spondias purpurea* L.). *Revista Ceres*, 55(2), 141-145. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=305226700002>
- Silva, S. M., Martins, L. P., Alves, R. E., & Filgueiras, A. C. (2001). Carbohydrate – related changes in red mombin (*Spondias purpurea*) fruit. *Proceedings of the Interamerican Society for*

- Tropical Horticulture*, 45, 38-41. <https://www.pubhort.org/iasth/45/0011.htm>
- Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventos, R. M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology*, 299, 152-178. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)99017-1](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1)
- Sollano-Mendieta, X. C., Meza-Márquez, O. G., Osorio-Revilla, G., & Téllez-Mendieta, D. I. (2021). Effect of *in vitro* digestion on the antioxidant compounds and antioxidant capacity of 12 plum (*Spondias purpurea* L.) ecotypes. *Foods*, 10(9), 1995. <https://doi.org/10.3390/foods10091995>
- Solorzano-Morán, S., Alia-Tejagal, I., Rivera-Cabrera, F., López-Martínez, V., Pérez-Flores, L. J., Pelayo-Zaldívar, C., Guillén-Sánchez, D., León-Sánchez, F. D., & Maldonado-Astudillo, Y. I. (2015). Quality attributes and functional compounds of Mexican plum (*Spondias purpurea* L.) fruit ecotypes. *Fruits*, 70(5), 261-270. <https://doi.org/10.1051/fruits/2015027>
- Sousa, R., Filgueiras, A. C., Alves, E., Costa, J. T., & Oliveira, C. (1998). Identification of the optimum harvest stage for red mombin (*Spondias purpurea* L.). *Proceedings of Interamerican Society for Tropical Horticulture*, 42, 319-324. <https://www.pubhort.org/iasth/42/0046.htm>
- Suárez-Vargas, A., Juárez-López, P., López-Martínez, V., Pérez-Flores, L. J., Guillén-Sánchez, D., & Alia-Tejagal, I. (2017). Antioxidant activity and physicochemical parameters in 'Cuernavaqueña' Mexican plum (*Spondias purpurea* L.) at different ripening stages. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 39(4), 787. <https://doi.org/10.1590/0100-29452017787>
- Wills, R. B., & Golding, J. B. (2016). *Postharvest. An introduction to the physiology and handling of fruit vegetables*. UNSW Press-CABI. <https://doi.org/10.1079/9781786391483.0000>