

Seed quality of three native tomato varieties and a commercial one produced under high temperatures

Calidad de semillas de tres variedades nativas y una comercial de tomate producidas bajo temperaturas altas

Victoria A. Delgado-Vargas¹; J. Jesús Magdaleno-Villar²;
Óscar J. Ayala-Garay^{1*}; Diana Garfias-Sánchez¹

¹Colegio de Postgraduados, Postgrado de RGP-Fisiología Vegetal. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, México, C. P. 56230, MÉXICO.

²Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Fitotecnia. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, México, C. P. 56230, MÉXICO.

*Corresponding author: oayala@colpos.mx, tel. (595) 95 20 200 ext. 1594.

Abstract

One way to mitigate the negative effects of high temperatures (HT) on crops is the use of plant genetic resources, and Mexico, as a center of domestication of tomato (*Solanum lycopersicum* L.), has numerous native varieties. The objective of this study was to evaluate the physical and physiological quality of seeds of three native tomato varieties and a commercial one, from fruit produced under HT conditions. The native varieties used were 'Campeche (C-40)', 'Yucatán (Y-25)' and 'Malinalco (M-430)', and the commercial one was 'Moneymaker' (MM). For the production of the fruit, two greenhouses were used, one ventilated for the control treatment (C) (34.2 °C) and the other with heating for the HT (38 °C) treatment. The physical and physiological quality of the seeds of the fourth-cluster fruit of each treatment was evaluated. The values obtained for the weight of 1000 seeds, seed length and width, electrical conductivity (EC) and the rate of radicle emergence after accelerated aging were higher ($P \leq 0.05$) in the HT treatment, while the germination (G) percentage was higher ($P \leq 0.05$) with the C. The EC correlated inversely with G ($r^2 = -0.7^*$), which may indicate that HT affects membrane permeability and in turn G.

Keywords:

Solanum lycopersicum L.,
plant genetic resources,
physical quality,
physiological quality.

Resumen

Una manera de mitigar los efectos negativos de las temperaturas altas (TA) sobre los cultivos es el uso de recursos fitogenéticos, y México, como centro de domesticación del tomate (*Solanum lycopersicum* L.), cuenta con numerosas variedades nativas. El objetivo de este trabajo fue evaluar la calidad física y fisiológica de semillas de tres variedades nativas y una comercial de tomate, provenientes de frutos producidos bajo condiciones de TA. Las variedades nativas empleadas fueron 'Campeche (C-40)', 'Yucatán (Y-25)' y 'Malinalco (M-430)', y la comercial fue 'Moneymaker' (MM). Para la producción de los frutos, se utilizaron dos invernaderos, uno ventilado para el tratamiento control (TC) (34.2 °C) y otro con calefacción para el tratamiento de TA (38 °C). Se evaluó la calidad física y fisiológica de las semillas de los frutos del cuarto racimo de cada tratamiento. Los valores obtenidos del peso de 1000 semillas, el largo y ancho de las semillas, la conductividad eléctrica (CE) y la velocidad de emergencia de la radícula después del envejecimiento acelerado fueron superiores ($P \leq 0.05$) en el tratamiento de TA. Mientras que el porcentaje de germinación (G) fue mayor ($P \leq 0.05$) con el TC. La CE se correlacionó inversamente con la G ($r^2 = -0.7^*$), lo que puede indicar que la TA afecta la permeabilidad de las membranas y a su vez la G.

Palabras clave:

Solanum lycopersicum L.,
recursos fitogenéticos,
calidad física,
calidad fisiológica.



Introduction

The process called “climate change” includes a number of atmospheric instability phenomena, among which is the increase in global temperature. According to the Organization for Economic Cooperation and Development (OECD, 2012), the temperature will rise by up to 4 °C before the end of this century.

Agriculture is extremely vulnerable to climate change, so rising temperatures and changes in weather patterns will eventually reduce the production of desired crops; this will increase the likelihood of crop failure in the short term and reduce production in the long term (Food and Agriculture Organization [FAO], 2011). The vulnerability of crops to high temperatures may vary depending on the species and the phenological status of the plant. Some studies carried out on different crops agree that the flowering and seed filling stages are the most sensitive to temperature increase (Agandi et al., 2000; Erickson & Markhart, 2002), since they can cause low quality indices in fruits and jeopardize the availability of quality seeds. However, there is little research on the effect of high temperature on seed development and quality.

In species susceptible to high temperatures, such as tomato (*Solanum lycopersicum* L.), this factor can affect the physiological processes or modify the development pattern of the plant, negatively altering its morpho-anatomical and biochemical characteristics. Also, under conditions of extreme environmental changes, mainly of temperature and rainfall regimes, plant development, production and quality, both of fruit and seeds, may be affected, even resulting in total losses (Schwarz, Thompson, & Kläring, 2014). In the case of tomato, the optimum temperature for growth and production is between 23 and 26 °C (Adams, Cockshull, & Cave, 2001). At high temperatures, the levels of the enzymes involved in carbohydrate metabolism (glucokinase and fructokinase) may be reduced by an imbalance between their rate of formation and degradation (Biais et al., 2014; Gautier et al., 2008). The FAO (2015) mentions that one way to mitigate the negative effects of high temperatures, inherent in climate change, on crop production is the use of plant genetic resources, as the ability of plants to tolerate climate changes is given by their genetic diversity (FAO, 2015).

Mexico is considered the center of origin and domestication of the tomato, and has a great diversity of plant species. It is estimated that around 50 thousand ha are cultivated each year, and its per capita consumption is 14 kg. The main producing states of this vegetable are Sinaloa, San Luis Potosí and Michoacán (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2017). Wild and native tomato varieties represent an important source of genetic variability that can be included in crop

Introducción

El proceso denominado “cambio climático” incluye una serie de fenómenos de inestabilidad atmosférica, dentro de los que se encuentra el aumento de la temperatura global. De acuerdo con la *Organization for Economic Cooperation and Development* (OECD, 2012), la temperatura aumentará hasta 4 °C antes de finalizar el presente siglo.

La agricultura es extremadamente vulnerable al cambio climático, de modo que el aumento de las temperaturas y los cambios en los fenómenos meteorológicos terminarán por reducir la producción de los cultivos deseados; esto aumentará las probabilidades de fracaso de las cosechas a corto plazo y la reducción de la producción a largo plazo (Food and Agriculture Organization [FAO], 2011). La sensibilidad de los cultivos a temperaturas altas puede variar dependiendo de la especie y el estado fenológico de la planta. Algunos estudios realizados en diferentes cultivos coinciden en que las etapas de floración y llenado de la semilla son las más sensibles al incremento de temperatura (Agandi et al., 2000; Erickson & Markhart, 2002), ya que pueden ocasionar índices bajos de calidad en frutos y ponen en riesgo la disponibilidad de semillas de calidad. No obstante, existen pocas investigaciones del efecto de la temperatura alta durante el desarrollo de la semilla y su calidad.

En especies susceptibles a temperaturas altas, como el tomate (*Solanum lycopersicum* L.), este factor puede afectar los procesos fisiológicos o modificar el patrón de desarrollo de la planta, alterando negativamente sus características morfo-anatómicas y bioquímicas. Asimismo, bajo condiciones de cambios ambientales extremos, principalmente de temperatura y regímenes de lluvia, el desarrollo de la planta, su producción y calidad, tanto de frutos como de semillas, pueden verse afectados, inclusive pueden ocurrir pérdidas totales (Schwarz, Thompson, & Kläring, 2014). En el caso del tomate, la temperatura óptima para su crecimiento y producción oscila entre 23 y 26 °C (Adams, Cockshull, & Cave, 2001). Con temperaturas elevadas, los niveles de las enzimas implicadas en el metabolismo de los carbohidratos (glucoquinasas y fructoquinasas) pueden disminuir por un desequilibrio entre su velocidad de formación y de degradación (Biais et al., 2014; Gautier et al., 2008). La FAO (2015) menciona que una manera para mitigar los efectos negativos de las temperaturas altas, inherentes al cambio climático, sobre la producción de cultivos es el uso de recursos fitogenéticos; ya que la capacidad de las plantas para tolerar los cambios del clima está dada por su diversidad genética (FAO, 2015).

México es considerado como el centro de origen y domesticación del tomate, y posee una gran diversidad de especies vegetales. Se estima que se cultivan alrededor de

breeding programs. In addition, they have fruit of high nutritional quality, with smaller size and lower weight than commercial varieties, attractive physical characteristics (color and shape) and many fruit per cluster; however, their fruit have a short shelf life or are very soft (Sim, Robbins, Van Deynze, Michel, & Francis, 2011).

The use of native tomato varieties that tolerate environmental changes caused by global warming is feasible, so it is necessary to study in detail the growth and reproduction of these plants. Therefore, the objective of this research was to evaluate the physical and physiological quality of seeds of three native varieties and a commercial one of tomato (*Solanum lycopersicum* L.), from fruit produced under high temperature conditions.

Materials and methods

Location of the experimental site and plant material

The experiment was carried out during spring 2016, in two greenhouses located in Texcoco, Mexico (19° 27' 51" North latitude and 98° 54' 15" West longitude, at 2,250 masl). The commercial variety used was 'Moneymaker' (MM), considered a worldwide reference in tomato studies (Biais et al., 2014; Luengwilai & Beckles, 2009), and the three native varieties were 'Campeche' (C-40), 'Yucatán' (Y-25) and 'Malinalco' (M-430), which belong to the *Colegio de Postgraduados* breeding program. MM and M-430 are from temperate climates, while Y-25 and C-40 are from warm climates.

Crop management and experimental conditions

Sowing was carried out in 200-cavity polystyrene trays, and the seedlings were transplanted 30 days after sowing (das) in polyethylene bags (40 x 50 cm) containing a mixture of peat moss (Sunshine® No. 3) and tezontle (30:70 v/v). The nutrient solutions used during crop development were: Hoagland and Arnon (1950) in the vegetative stage, Steiner (1984) in the flowering and fruit set stage, and Resh (1981) in the fruit ripening stage. In all cases, the solution was maintained at a pH between 5.5 and 6.0.

In total, 20 plants of each genotype were established in a tunnel-type greenhouse with overhead ventilation and covered with milky white polyethylene, which was subsequently used for the control temperature condition (C). The plants remained in this greenhouse from sowing until anthesis of the fourth cluster; at that time, half of the plants were moved to another similar greenhouse, but equipped with heating to generate the high temperature (HT) condition and obtain a higher daytime (from 7:00 h to 19:00 h) temperature. The average maximum temperature was 38 °C for HT and 34.2 °C for C (Figure 1). The air temperature inside the

50 mil ha cada año, y su consumo per cápita es de 14 kg. Los principales estados productores de esta hortaliza son Sinaloa, San Luis Potosí y Michoacán (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2017). Los tipos silvestres y las variedades nativas de tomate representan una importante fuente de variabilidad genética que puede incluirse en los programas de mejoramiento del cultivo. Además, presentan frutos de alta calidad nutritiva, con menor tamaño y peso que las variedades comerciales, características físicas atractivas (color y forma) y muchos frutos por racimo; sin embargo, presentan corta vida de anaquel o frutos muy blandos (Sim, Robbins, Van Deynze, Michel, & Francis, 2011).

El uso de variedades nativas de tomate que toleran los cambios ambientales provocados por el calentamiento global es factible; por lo que es necesario estudiar detalladamente el crecimiento y reproducción de estas plantas. Por lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue evaluar la calidad física y fisiológica de semillas de tres variedades nativas y una comercial de tomate (*Solanum lycopersicum* L.), provenientes de frutos producidos bajo condiciones de temperatura alta.

Materiales y métodos

Ubicación del sitio experimental y material vegetal

El experimento se llevó a cabo durante el ciclo primavera-verano 2016, en dos invernaderos ubicados en Texcoco, México (19° 27' 51" latitud norte y 98° 54' 15" longitud oeste, a 2,250 msnm). La variedad comercial empleada fue 'Moneymaker' (MM), considerada como referencia mundial en estudios de tomate (Biais et al., 2014; Luengwilai & Beckles, 2009), y las tres variedades nativas fueron 'Campeche' (C-40), 'Yucatán' (Y-25) y 'Malinalco' (M-430); las cuales pertenecen al Programa de Mejoramiento Genético del Colegio de Postgraduados. MM y M-430 son originarias de climas templados, mientras que Y-25 y C-40 son de climas cálidos.

Manejo del cultivo y condiciones experimentales

La siembra se realizó en charolas de poliestireno de 200 cavidades, y las plántulas se trasplantaron a los 30 días después de la siembra (dds) en bolsas de polietileno (40 x 50 cm) que contenían una mezcla de *peat moss* (Sunshine® núm. 3) y tezontle (30:70 v/v). Las soluciones nutritivas empleadas durante el desarrollo del cultivo fueron la de Hoagland y Arnon (1950) durante la etapa vegetativa, la de Steiner (1984) en la floración y amarre de fruto, y la de Resh (1981) en la etapa de maduración de fruto. En todos los casos, la solución se mantuvo a un pH entre 5.5 y 6.0.

En total se establecieron 20 plantas de cada genotipo en un invernadero tipo túnel con ventila cenital y cubierta

greenhouses was recorded with Hobo® sensors (Onset Computer Corporation, USA).

The flower clusters were pruned to have only six fruit in each plant. The seeds were obtained from the fourth-cluster fruit. Fruit harvesting was carried out at maturity level 6 (where more than 90 % of the fruit surface is red) (Wan, Toudeshki, Tan, & Ehsani, 2018). Seed separation was done manually in 20 fruit of each genotype taken at random, for which the fruit were left to ferment for 48 h, washed with running water to remove mucilage residues and allowed to dry at room temperature (25 °C) until constant weight. They were then safeguarded in hermetically-sealed bags and stored in a jar with silica gel beads at room temperature (25 °C) for two months.

The experiment was carried out based on a factorial arrangement by means of a completely random design. The factors studied were temperature (34.2 and 38 °C) and genotype (MM, M-430, Y-25 and C-40), giving a total of eight treatments, and the variables evaluated were: number of seeds per fruit (NSF), moisture content, weight of 1000 seeds (W1000S), seed length (SL), seed width (SW), germination (G) percentage, rate of radicle

de polietileno blanco lechoso, el cual posteriormente se empleó para la condición de temperatura control (TC). En dicho invernadero las plantas permanecieron desde la siembra hasta la antesis del cuarto racimo; en ese momento, la mitad de las plantas se trasladaron a otro invernadero similar, pero equipado con calefacción para generar la condición de temperatura alta (TA) y obtener mayor temperatura diurna (de 7:00 a 19:00 h). La temperatura máxima promedio fue de 38 °C para TA y 34.2 °C para TC (Figura 1). La temperatura del aire dentro de los invernaderos se registró con sensores Hobo® (Onset Computer Corporation, USA).

Los racimos florales se podaron para tener únicamente seis frutos en cada planta. Las semillas se obtuvieron de los frutos del cuarto racimo. La cosecha de frutos se realizó en grado de madurez 6 (donde más de 90 % de la superficie del fruto es color rojo) (Wan, Toudeshki, Tan, & Ehsani, 2018). La separación de las semillas se hizo de forma manual en 20 frutos de cada genotipo tomados al azar; para lo cual, los frutos se dejaron fermentar por 48 h, se lavaron con agua corriente para retirar restos de mucílago y se dejaron secar a temperatura ambiente (25 °C) hasta peso constante. Posteriormente,

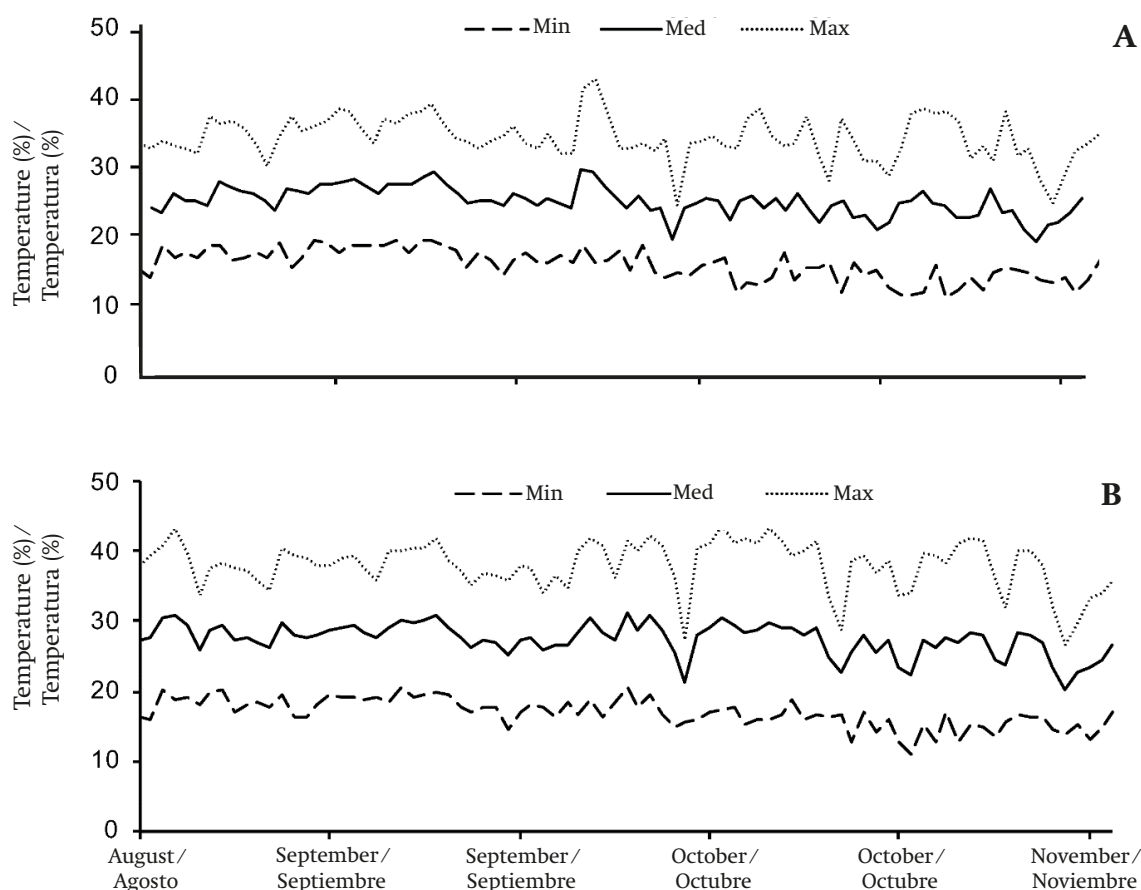


Figure 1. Daytime (7:00 to 19:00 h) temperature behavior within greenhouses for control (A) and high temperature (B) treatments during development of the fourth-cluster fruit.

Figura 1. Comportamiento de la temperatura diurna (7:00 a 19:00 h) dentro de los invernaderos para los tratamientos control (A) y temperatura alta (B) durante el desarrollo de los frutos del cuarto racimo.

emergence after accelerated aging (REAAA), electrical conductivity (EC) and percentage of empty seeds (ES).

Physical seed quality variables

A fruit was taken from the fourth cluster of six randomly-selected plants and the NSF was counted. After the seed storage period, laboratory tests were performed. The moisture content was determined in a sample of 0.5 g. The seeds were dried in a conventional oven (3480, Thelco®, USA) at 103 °C for 17 ± 1 h and the moisture content was determined by the difference between the initial and final weight.

The W1000S was estimated in four replicates consisting of eight samples (corresponding to each treatment) of 100 seeds (International Seed Testing Association [ISTA], 2012). The replicates of each treatment were averaged and the result was multiplied by 10; the result was expressed in g. To determine this variable, an analytical balance (PA2202, Ohaus®, China) with 0.001-g accuracy was used.

The SL and SW were measured in four replicates of 100 seeds by image processing with the Image J® program; for this, the seeds were scanned in a multifunction printer (HP2200, Hewlett Packard, USA), where 1200 dpi images were captured. Both variables were expressed in mm.

Seed physiological quality variables

To determine the G percentage, four replicates of 25 seeds (of each treatment) were sown in plastic boxes (11 x 11 x 3.5 cm) on a layer of paper towels, and placed in a germination chamber (SD8900, Seedburo®, USA) at 25 °C and constant light. After 14 days, the G percentage was calculated, for which the number of normal, healthy seedlings without malformations was taken into account; with this, the ES percentage was also estimated (ISTA, 2012).

The EC was determined from the average of four replicates of 50 previously-weighed seeds, which were immersed in 50 mL of deionized water for 24 h at 25 °C. After imbibition, the EC of the solution was measured with a conductivity meter (72729, Oakton®, Singapore). The measured values were expressed in $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ of seed, to standardize the weight.

The accelerated aging test (Delouche & Baskin, 1973) was established with four replicates of 25 seeds that were placed in plastic boxes (11 x 11 x 3.5 cm) containing 120 mL of distilled water, and then subjected to 45 °C and 100 % relative humidity for 72 h in a conventional oven (3480, Thelco®, USA). After this period, the seeds were sown in sterile river sand. At

se resguardaron en bolsas con cierre hermético y se guardaron en un frasco con perlas de sílica gel a temperatura ambiente (25 °C) durante dos meses.

El experimento se llevó a cabo con base en un arreglo factorial mediante un diseño completamente al azar. Los factores estudiados fueron temperatura (34.2 y 38 °C) y genotipo (MM, M-430, Y-25 y C-40), dando un total de ocho tratamientos, y las variables evaluadas fueron: número de semillas por fruto (NSF), contenido de humedad, peso de 1000 semillas (P1000S), largo de semilla (LS), ancho de semilla (AS), porcentaje de germinación (G), velocidad de emergencia de la radícula después del envejecimiento acelerado (VEDEA), conductividad eléctrica (CE) y porcentaje de semillas vanas (SV).

Variables de calidad física de la semilla

De seis plantas seleccionadas al azar se tomó de cada una un fruto del cuarto racimo y se contó el NSF. Después del periodo de almacenamiento de las semillas, se realizaron las pruebas de laboratorio. El contenido de humedad se determinó en una muestra de 0.5 g. Las semillas se secaron en una estufa convencional (3480, Thelco®, USA) a 103 °C durante 17 ± 1 h, y el contenido de humedad se determinó mediante la diferencia del peso inicial menos el final.

El P1000S se estimó en cuatro repeticiones conformadas por ocho muestras (correspondientes a cada tratamiento) de 100 semillas (International Seed Testing Association [ISTA], 2012). Se promediaron las repeticiones de cada tratamiento y el resultado se multiplicó por 10; el resultado se expresó en g. Para determinar esta variable se empleó una balanza analítica (PA2202, Ohaus®, China) con precisión de 0.001 g.

El LS y AS se midieron en cuatro repeticiones de 100 semillas mediante procesamiento de imágenes con el programa Image J®; para ello, las semillas se escanearon en una impresora multifuncional (HP2200, Hewlett Packard, USA), donde se capturaron imágenes de 1200 dpi. Ambas variables se expresaron en mm.

Variables de calidad fisiológica de la semilla

Para determinar el porcentaje G se sembraron cuatro repeticiones de 25 semillas (de cada tratamiento) en cajas de plástico (11 x 11 x 3.5 cm) sobre una capa de toallas de papel, y se colocaron en una cámara de germinación (SD8900, Seedburo®, USA) a 25 °C y luz constante. Después de 14 días, se calculó el porcentaje G, para lo cual se tomó en cuenta el número de plántulas normales, sanas y sin malformaciones; con ello además se estimó el porcentaje de SV (ISTA, 2012).

the beginning of emergence, daily counts were made. With the values obtained, the seedling emergence rate index (seedlings·d⁻¹) was calculated at 6 das (REAAA6) and at 14 das (REAAA14), according to Maguire's formula (1962).

Statistical analysis

With the data obtained, an analysis of variance and Tukey's test ($P \leq 0.05$) were performed for the main factors and their interaction. For this, Statistical Analysis System software (SAS Institute, 2003) was used. Finally, in order to normalize the data of the variables measured in percentage, prior to the analysis of variance, the results were transformed by the arc sine function $\sqrt{X}/100$.

Results and discussion

Physical characteristics of the seed produced

Seed moisture content averaged 7.3 ± 0.3 % (data not shown) in all varieties, a value that does not interfere with the rest of the physical, physiological and biochemical variables, since in dry seeds the biological processes are slower than in wet ones (Ayala-Villegas, Ayala-Garay, Aguilar-Rincón, & Corona-Torres, 2014). After harvesting, seed moisture content decreases until it is in dynamic equilibrium with the surrounding environment (Rodríguez-Burgos, Ayala-Garay, Hernández-Livera, Leal-León, & Cortez-Mondaca, 2011).

The NSF showed differences ($P \leq 0.01$) between genotypes and temperature conditions, as well as in their interaction ($P \leq 0.05$). For the other physical quality variables, the results of the analysis of variance showed highly significant effects on the part of the genotypes, temperatures and their interaction (Table 1).

The MM and M-430 varieties had the highest NSF (145 and 116 seeds·fruit⁻¹, respectively), while Y-25 had only 50 seeds·fruit⁻¹. The HT treatment was statistically higher in the NFS (133 seeds·fruit⁻¹) than the C (77 seeds·fruit⁻¹) (Table 2).

The W1000S was statistically different in all genotypes, where the heaviest seed was that of M-430 (3.94 g) and the lightest was that of MM (3.12 g). As for temperature, the W1000S was 0.16 g higher in the HT condition than in the C. As for SL, the MM (3.93 mm), M-430 (3.80 mm) and Y-25 (3.99 mm) varieties did not differ statistically and were superior ($P \leq 0.05$) to C-40 (3.68 mm). This last variety had the smallest seed, and it also had the smallest ($P \leq 0.05$) SW (2.84 mm) together with the MM variety (2.92 mm). Also, SW was 0.2 mm longer in the HT condition than in the C (Table 2).

La CE se determinó a partir del promedio de cuatro repeticiones de 50 semillas previamente pesadas, las cuales se sumergieron en 50 mL de agua desionizada por 24 h a 25 °C. Después de la imbibición, se midió la CE de la solución con un conductímetro (72729, Oakton®, Singapur). Los valores medidos se expresaron en $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ de semilla, para estandarizar el peso.

La prueba de envejecimiento acelerado (Delouche & Baskin, 1973) se estableció con cuatro repeticiones de 25 semillas colocadas en cajas de plástico (11 x 11 x 3.5 cm) que contenían 120 mL de agua destilada, y se sometieron a 45 °C y 100 % de humedad relativa por 72 h en estufa convencional (3480, Thelco®, USA). Después de este periodo, las semillas se sembraron en arena de río esterilizada. Al iniciar la emergencia, se hicieron conteos diarios. Con los valores obtenidos se calculó el índice de velocidad de emergencia de plántulas (plántulas·d⁻¹) a los 6 dds (VEDEA6) y a los 14 dds (VEDEA14), de acuerdo con la fórmula de Maguire (1962).

Análisis estadístico

Con los datos obtenidos se realizó un análisis de varianza y una prueba de comparación múltiple de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) para los factores principales y su interacción. Para lo anterior se utilizó el paquete estadístico *Statistical Analysis System* (SAS Institute, 2003). Finalmente, con el objetivo de normalizar los datos de las variables medidas en porcentaje, previo al análisis de varianza, se transformaron los resultados mediante la función arco seno $\sqrt{X}/100$.

Resultados y discusión

Características físicas de la semilla producida

El contenido de humedad de las semillas fue en promedio de 7.3 ± 0.3 % (datos no mostrados) en todas las variedades, valor que no interfiere con el resto de variables físicas, fisiológicas y bioquímicas, ya que en semillas secas los procesos biológicos son más lentos que en las húmedas (Ayala-Villegas, Ayala-Garay, Aguilar-Rincón, & Corona-Torres, 2014). Después de la cosecha, el contenido de humedad de la semilla disminuye hasta ponerse en equilibrio dinámico con el ambiente que lo rodea (Rodríguez-Burgos, Ayala-Garay, Hernández-Livera, Leal-León, & Cortez-Mondaca, 2011).

Por su parte, el NSF mostró diferencias ($P \leq 0.01$) entre genotipos y condiciones de temperatura, así como en su interacción ($P \leq 0.05$). Para el resto de variables de calidad física, los resultados del análisis de varianza mostraron efectos altamente significativos por parte de los genotipos, temperaturas y su interacción (Cuadro 1).

Table 1. Mean squares and level of statistical significance of the analysis of variance of the physical and physiological quality variables of the seeds of three native tomato varieties and one commercial one, produced under two contrasting temperatures.

Cuadro 1. Cuadrados medios y nivel de significancia estadística del análisis de varianza de las variables de calidad física y fisiológica de las semillas de tres variedades nativas y una comercial de tomate, producidas bajo dos temperaturas contrastantes.

| SV ¹ / FV ¹ | DF/ GL | NSF/ NSF | W1000S/ P1000S | SL/LS | SW/AS | G | ES/SV | EC/CE | REAAA6/ VEDEA6 | REAAA14/ VEDEA14 |
|--------------------------------------|-----------|-------------|-------------------|--------|--------|---------|---------|---------|-------------------|---------------------|
| V | 3 | 22751.8** | 1.46** | 0.17** | 0.29** | 121.8** | 17.8 ns | 110.4** | 1.84 * | 2.9 * |
| T | 1 | 31161.5** | 0.19** | 0.56** | 0.31** | 144.5** | 0.5 ns | 37.4** | 3.42 * | 2.33 ns |
| VxT | 3 | 5054.3* | 0.07** | 0.08** | 0.11** | 92.5** | 5.8 ns | 56.8** | 0.19 ** | 0.34 ns |
| Error | 24 | 1517.2 | 0.004 | 0.01 | 0.01 | 22.5 | 7.5 | 5.9 | 0.17 | 0.64 |
| CV | | 38.8 | 1.9 | 2.2 | 2.8 | 5.2 | 115.3 | 14.2 | 39.21 | 22.93 |

¹SV = source of variation; DF = degrees of freedom; V = variety; T = temperature; CV = coefficient of variation; NSF = number of seeds per fruit; W1000S = weight of a thousand seeds; SL = seed length; SW = seed width; G = germination; ES = empty seeds; EC = electrical conductivity of the imbibition solution; REAAA = rate of radicle emergence after accelerated aging at 6 and 14 days; ** = highly significant ($P \leq 0.01$); * = significant ($P \leq 0.05$); ns = not significant.

¹FV = fuente de variación; GL = grados de libertad; V = variedad; T = temperatura; CV = coeficiente de variación; NSF = número de semillas por fruto; P1000S = peso de mil semillas; LS = largo de semilla; AS = ancho de semilla; G = germinación; SV = semillas vanas; CE = conductividad eléctrica de la solución de imbibición; VEDEA = velocidad de emergencia de la radícula después del envejecimiento acelerado a los 6 y 14 días; ** = altamente significativo ($P \leq 0.01$); * = significativo ($P \leq 0.05$); ns = no significativo.

Table 2. Comparison of means by independent study factor for number of seeds per fruit, and physical and physiological quality variables of the seeds of three native tomato varieties (M-430, Y-25 and C-40) and one commercial one (MM), produced in two contrasting temperatures.

Cuadro 2. Comparación de medias por factor independiente de estudio para número de semillas por fruto, variables de calidad física y fisiológica de las semillas de tres variedades nativas (M-430, Y-25 y C-40) y una comercial (MM) de tomate, producidas en dos temperaturas contrastantes.

| SV ¹ /FV ¹ | NSF (seeds·fruit ⁻¹)/ NSF (semillas·fruto ⁻¹) | W1000S (g)/ P1000S (g) | SL (mm)/ LS (mm) | SW (mm)/ AS (mm) | G (%) | EC ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$) / CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$) | REAAA6 (seedlings·d ⁻¹)/ VEDEA6 (plántulas·d ⁻¹) | REAAA14 (seedlings·d ⁻¹)/ VEDEA14 (plántulas·d ⁻¹) |
|----------------------------------|--|---------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------|--|---|---|
| Variety/ Variedad | | | | | | | | |
| MM | 145.0 a ² | 3.12 c | 3.93 a | 2.92 c | 89.0 b | 17.96 a | 0.25 b | 2.76 b |
| M-430 | 115.6 ab | 3.94 a | 3.80 a | 3.12 b | 92.5 ab | 20.13 a | 1.25 a | 3.72 ab |
| Y-25 | 49.7 c | 3.20 b | 3.99 a | 3.26 a | 89.5 b | 18.40 a | 1.52 a | 3.15 ab |
| C-40 | 91.1 b | 2.97 d | 3.68 b | 2.84 c | 97.5 a | 11.64 b | 1.18 a | 4.36 a |
| LSD/DMSH | 39.3 | 0.087 | 0.119 | 0.118 | 6.54 | 3.337 | 0.681 | 1.324 |
| Temperature/ Temperatura | | | | | | | | |
| C/TC | 76.75 b | 3.25 b | 3.76 b | 2.93 b | 94.3 a | 15.96 b | 0.68 b | 3.19 a |
| HT/TA | 132.93 a | 3.41 a | 4.02 a | 3.13 a | 90.0 b | 18.11 a | 1.43 a | 3.81 a |
| LSD/DMSH | 20.93 | 0.046 | 0.063 | 0.062 | 3.461 | 1.465 | 0.357 | 0.694 |

¹SV = source of variation; NSF = number of seeds per fruit; W1000W = weight of a thousand seeds; SL = seed length; SW = seed width; G = germination; EC = electrical conductivity of the imbibition solution; REAAA = rate of radicle emergence speed after accelerated ageing at 6 and 14 days; C = control temperature; HT = high temperature; LSD = least significant difference.

²Means with the same letter within each column do not differ statistically ($P \leq 0.05$).

¹FV = fuente de variación; NSF = número de semillas por fruto; P1000S = peso de mil semillas; LS = largo de semilla; AS = ancho de semilla; G = germinación; CE = conductividad eléctrica de la solución de imbibición; VEDEA = velocidad de emergencia de la radícula después del envejecimiento acelerado a los 6 y 14 días; TC = temperatura control; TA = temperatura alta; DMSH = diferencia mínima significativa honesta.

²Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren estadísticamente ($P \leq 0.05$).

Seeds produced under HT conditions showed, on average, an increase in W1000S in most genotypes. Similarly, under this condition a longer SL ($P \leq 0.05$) was observed, with the exception of C-40 (Table 3). Only in the C-40 and Y-25 native varieties did SL not suffer statistically significant effects due to the temperature treatments. In general, this variable is considered to be an important characteristic for assessing seed quality. In some species it can be a parameter to measure vigor, as bigger, bulkier seeds are considered to contain more reserves, so they are likely to express greater germinative power than smaller seeds (Pepper, Corbett, & Kang, 2002).

Seed size has sometimes been shown to affect germination, emergence rate, and the success of plant establishment, growth, and development (Bewley & Black, 1994). However, larger seeds do not necessarily produce more vigorous seedlings. In general, there

Las variedades MM y M-430 tuvieron el mayor NSF (145 y 116 semillas-fruto⁻¹, respectivamente), en contraste, mientras que Y-25 presentó tan solo 50 semillas-fruto⁻¹. Por su parte, el tratamiento de TA fue estadísticamente mayor en el NFS (133 semillas-fruto⁻¹) que el TC (77 semillas-fruto⁻¹) (Cuadro 2).

El P1000S fue diferente estadísticamente en todos los genotipos, donde la semilla más pesada fue la de M-430 (3.94 g) y la menos pesada fue la de MM (3.12 g). En la temperatura, el P1000S fue 0.16 g superior en la condición de TA que en la TC. En cuanto al LS, las variedades MM (3.93 mm), M-430 (3.80 mm) y Y-25 (3.99 mm) no difirieron estadísticamente y fueron superiores ($P \leq 0.05$) a C-40 (3.68 mm). Esta última variedad presentó la semilla más pequeña, además, fue inferior ($P \leq 0.05$) en cuanto al AS (2.84 mm) junto con la variedad MM (2.92 mm). En el AS, la condición de TA fue 0.2 mm mayor que la de TC (Cuadro 2).

Table 3. Comparison of means in the varieties x temperature interaction for the physical and physiological quality variables of the seeds of three native tomato varieties (M-430, Y-25 and C-40) and one commercial one (MM), produced under two temperatures contrasting.

Cuadro 3. Comparación de medias en la interacción variedades x temperatura para las variables de calidad física y fisiológica de las semillas de tres variedades nativas (M-430, Y-25 y C-40) y una comercial (MM) de tomate, producidas bajo dos temperaturas contrastantes.

| Treatment/ Tratamiento | NSF ¹ (seeds-fruit ⁻¹)/ NSF ¹ (semillas-fruto ⁻¹) | W1000S (g)/ P1000S (g) | SL (mm)/ LS (mm) | SW (mm)/ AS (mm) | EC ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$)/ CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$) | REAAA6 (seedlings-d ⁻¹)/ VEDEA6 (plántulas-d ⁻¹) | REAAA14 (seedlings-d ⁻¹)/ VEDEA14 (plántulas-d ⁻¹) |
|---------------------------|--|---------------------------------|---------------------|---------------------|---|---|---|
| MM C/ MM TC | 123.0 ab ^z | 3.03 de | 3.69 d | 2.68 d | 15.50 bcd | 0.50 bc | 2.50 b |
| MM HT/ MM TA | 167.0 a | 3.22 c | 4.16 a | 3.15 ab | 20.43 ab | 0.0 c | 3.02 ab |
| M-430 C/ M-430 TC | 97.9 bc | 4.00 a | 3.78 cd | 2.98 bc | 15.98 bcd | 1.47 ab | 3.56 ab |
| M-430 HT/ M-430 TA | 133.3 ab | 3.89 a | 4.18 a | 3.27 a | 24.28 a | 1.04 ab | 3.89 ab |
| Y-25 C/ Y-25 TC | 46.0 c | 3.11 cd | 3.92 bc | 3.20 a | 19.73 ab | 2.11 a | 2.99 ab |
| Y-25 HT/ Y-25 TA | 53.4 c | 3.46 b | 4.06 ab | 3.31 a | 17.08 bc | 0.93 bc | 3.31 ab |
| C-40 C/ C-40 TC | 40.1 c | 2.88 e | 3.65 d | 2.88 cd | 12.60 cd | 1.64 a | 3.70 ab |
| C-40 HT/ C-40 TA | 142.0 ab | 3.07 d | 3.7 d | 2.80 cd | 10.68 d | 0.73 bc | 5.02 a |
| LSD/DMSH | 65.9 | 0.148 | 0.202 | 0.201 | 5.60 | 1.16 | 2.26 |

¹NSF = Number of seeds per fruit; W1000W = weight of a thousand seeds; SL = seed length; SW = seed width; G = germination; EC = electrical conductivity of the imbibition solution; REAAA = rate of radicle emergence after accelerated ageing at 6 and 14 days; C = control temperature; HT = high temperature; MM = Moneymaker; M-430 = Malinalco; Y-25 = Yucatán; C-40 = Campeche; LSD = least significant difference.

²Means with the same letter within each column do not differ statistically ($P \leq 0.05$).

¹NSF = número de semillas por fruto; P1000S = peso de mil semillas; LS = largo de semilla; AS = ancho de semilla; G = germinación; CE = conductividad eléctrica de la solución de imbibición; VEDEA = velocidad de emergencia de la radícula después del envejecimiento acelerado a los 6 y 14 días; TC = temperatura control; TA = temperatura alta; MM = Moneymaker; M-430 = Malinalco; Y-25 = Yucatán; C-40 = Campeche; DMSH = diferencia mínima significativa honesta.

²Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren estadísticamente ($P \leq 0.05$).

are more accumulated reserves in the seed than are necessary to germinate. When the germination process concludes, the cotyledons or endosperm leave reserves that would only be used in stressful or severe germination conditions (Baskin & Baskin, 2014). That is why small seeds can produce seedlings as vigorous as those of large seeds (Ayala-Garay, Pichardo-González, Estrada-Gómez, Carrillo-Salazar, & Hernández-Livera, 2006).

The variables seed weight and seed size are closely related, which could be observed in the HT condition. According to Taiz, Zeiger, Møller, and Murphy (2015), the speed and magnitude of physiological processes in plants increase as the temperature rises to a maximum, after which they tend to decrease; this is called the maximum physiological temperature, and its value may be different for each plant process. It is possible that in the present experiment the temperature was not high enough to exceed the physiological maximum and cause damage to the seed formation and growth processes; therefore, there was no decrease in physical attributes, including NSF, but it caused an increase with respect to the C. On the other hand, according to Gautier *et al.* (2008) and Florido-Bacallao and Álvarez-Gil (2015), plants exposed to moderately high temperatures in an initial stage acquire a certain tolerance, which is known as acquired thermotolerance. It is possible that in this research there was a period of acclimatization that caused thermotolerance in the plants.

Physiological seed quality

The analysis of variance showed that the G percentage and EC were highly significant due to the effect of genotype, temperature and their combination, whereas in REAAA6 only the effect of the genotype x temperature interaction was highly significant; the opposite occurred in REAAA14, where the effect of this interaction was not significant (Table 1). On the other hand, the effect of the treatments and their interaction was not significant for the ES percentage.

The G percentage was statistically higher under the C than in the HT condition (Table 2). The MM (89 %) and Y-25 (89.5 %) varieties had the lowest values and C-40 had the highest value (97.5 %). The C-40 G value was statistically similar to the M-430 one.

In Figure 2, it can be seen that the MM, M-430 and Y-25 genotypes, produced under HT, had G percentages lower than 90 %, while in the seeds of the C-40 native variety, the HT did not affect germination. This may be due to the fact that the C-40 variety is native to a warm-humid region (Campeche) in southeastern Mexico, so it can adapt to HT conditions, although the same did not happen with the Y-25 native variety, which is also native to tropical regions.

Las semillas producidas en condiciones de TA mostraron, en promedio, un aumento en el P1000S en la mayoría de los genotipos. Del mismo modo, bajo esta condición se observó una mayor LS ($P \leq 0.05$), con excepción de C-40 (Cuadro 3). Únicamente en las variedades nativas C-40 y Y-25, el AS no sufrieron efectos estadísticamente significativos por los tratamientos de temperatura. En general, esta variable se considera como una característica importante para evaluar la calidad de las semillas. En algunas especies puede ser un parámetro para medir vigor, ya que se considera que semillas más grandes y voluminosas contienen más reservas, por lo que es probable que expresen mayor poder germinativo que las semillas más pequeñas (Pepper, Corbett, & Kang, 2002).

Se ha demostrado que en algunas ocasiones el tamaño de la semilla afecta la germinación, la tasa de emergencia, y el éxito del establecimiento, crecimiento y desarrollo de la planta (Bewley & Black, 1994). Sin embargo, semillas más grandes no necesariamente producen plántulas más vigorosas. En general, en la semilla hay reservas acumuladas en mayor cantidad que las necesarias para germinar. Cuando el proceso de germinación concluye, en los cotiledones o el endospermo, quedan reservas que solo se utilizarían en condiciones estresantes o severas de germinación (Baskin & Baskin, 2014). Es por ello que semillas pequeñas pueden producir plántulas igualmente vigorosas que semillas grandes (Ayala-Garay, Pichardo-González, Estrada-Gómez, Carrillo-Salazar, & Hernández-Livera, 2006).

Las variables peso y tamaño de semilla están muy relacionadas, lo que se pudo observar en la condición de TA. De acuerdo con Taiz, Zeiger, Møller, y Murphy (2015), la velocidad y magnitud de los procesos fisiológicos en las plantas incrementan conforme la temperatura aumenta hasta llegar a un máximo, después del cual tienden a disminuir, a ésta se le denomina temperatura máxima fisiológica, y su valor puede ser diferente para cada proceso vegetal. Es posible que en el presente experimento la temperatura no fue lo suficientemente alta como para superar la máxima fisiológica y provocar daños en los procesos de formación y crecimiento de la semilla; por lo que no se presentó una disminución de los atributos físicos, incluyendo el NSF, sino que ocasionó un aumento respecto a la TC. Por otra parte, de acuerdo con Gautier *et al.* (2008) y Florido-Bacallao y Álvarez-Gil (2015), las plantas expuestas a temperaturas moderadamente altas en una etapa inicial adquieren cierta tolerancia; a esto se le conoce como termotolerancia adquirida. Es posible que en esta investigación haya existido un periodo de tiempo de aclimatación que provocara la termotolerancia en las plantas.

Calidad fisiológica de la semilla

El análisis de varianza mostró que el porcentaje de G y la CE fueron altamente significativos por efecto del

The above results show that the variability found in plant genetic resources, in this case represented by the three native varieties, can mitigate the effects of global climate change, as indicated by the FAO (2015). The only genotype in which neither its physical characteristics (Table 3) nor its germination were altered was the native variety C-40 (Figure 2), so it would be recommended as a candidate to resist HT.

When considering the effect of HT on the physical quality variables (weight and size) of the seeds and their behavior in G, an opposite effect is shown. In general, the HT increases the value of the physical characteristics of the seed, but decreases that of G. As mentioned earlier, each plant process could have a different maximum physiological temperature (Taiz et al., 2015). Therefore, here it would be shown that the reserve accumulation process, which results in the weight of the seed, is less susceptible to HT than the acquisition of germinative capacity. According to Otho, Stone, and Harada (2007), seed development is divided into three main phases: histodifferentiation, reserve accumulation and acquisition of tolerance to drying, and to achieve the highest seed quality the three phases must proceed optimally (Bewley, Bradford, Hilhorst, & Nonogaki, 2013).

In this work, the value of the correlation between the W1000S and G values was -0.15^{ns} (data not shown), which indicates null correlation between these variables. On the other hand, the EC of the MM and M-430 genotype seeds produced under HT had higher values compared

genotipo, la temperatura y la combinación de éstos. Mientras que en la VEDEA6 únicamente el efecto de la interacción genotipo x temperatura fue altamente significativo; lo contrario a lo ocurrido en la VEDEA14, donde el efecto de dicha interacción no fue significativo (Cuadro 1). Por otro lado, el efecto de los tratamientos y su interacción no fue significativo para el porcentaje de SV.

El porcentaje de G fue estadísticamente superior con el TC que en la condición de TA (Cuadro 2). Las variedades MM (89 %) y Y-25 (89.5 %) tuvieron los valores más bajos y C-40 tuvo el valor más alto (97.5 %). Esta última fue estadísticamente similar al valor de germinación de M-430.

En la Figura 2, se puede observar que los genotipos MM, M-430 y Y-25, producidos bajo TA, presentaron porcentajes de G inferiores a 90 %, mientras que en las semillas de la variedad nativa C-40, la TA no afectó la germinación. Lo anterior se puede deber a que la variedad C-40 es originaria de una región cálido-húmeda (Campeche), al sur-este de México, por lo que puede adaptarse a condiciones de TA; aunque no ocurrió lo mismo con la variedad nativa Y-25, que también es originaria de regiones tropicales.

Los resultados anteriores muestran que la variabilidad encontrada en los recursos genéticos vegetales, en este caso representados por las tres variedades nativas, puede mitigar los efectos del cambio climático global, como lo indicó la FAO (2015). El único genotipo en el que no se

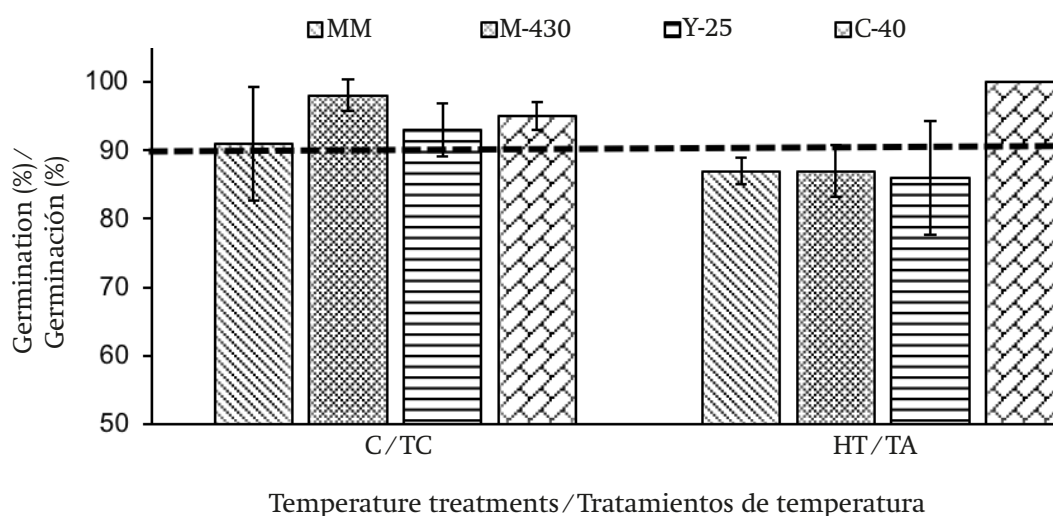


Figure 2. Germination percentage of three native varieties and one commercial one, produced under two temperature conditions. C = control temperature (34.2 °C), HA = high temperature (38 °C). MM = 'Moneymaker', M-430 = 'Malinalco 430', Y-25 = 'Yucatán 25', C-40 = 'Campeche 40'. The vertical bars represent the standard deviation (n = 4).

Figura 2. Porcentaje de germinación de tres variedades nativas y una comercial, producidas bajo dos condiciones de temperatura. TC = temperatura control (34.2 °C), TA = temperatura alta (38 °C). MM = 'Moneymaker', M-430 = 'Malinalco 430', Y-25 = 'Yucatán 25', C-40 = 'Campeche 40'. Las barras verticales representan la desviación estándar (n = 4).

to those obtained with the C (Table 3). This means that these seeds had greater membrane permeability, which is equivalent to a lower physiological potential (Soto-González & Valiengo-Valeri, 2011), and would explain the low germination potential of the other varieties compared to C-40, which showed lower membrane permeability, both in the HT ($10.68 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$) and C ($12.60 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$) treatments. Likewise, this genotype was one of those with the highest germinative power (Figure 2), revealing the inverse relationship between the seed's EC and its germinative power.

Low germination values can be explained by the loss of membrane permeability. Dumas, Dadomo, Di Lucca, and Grolier (2003) mention that the antioxidant activity inside fruit developed in HT increases, which affects the stability of cell membranes. As a result of the lower structure and selectivity of these membranes, seeds of lower physiological potential release a greater concentration of leached ions (Filho, Carvalho, Cícero, & Demétrio, 1987). The value of the correlation (r^2) between the G and EC values was -0.73^* ; this could be due to the fact that the HT influenced the structure of the seed membranes, which altered the EC and reduced the germinative capacity (data not shown).

Regarding seed vigor, in the REAAA variable there were differences ($P \leq 0.05$) between genotypes (Table 2). The MM variety germinated slower than the rest, and its values are lower at both 6 and 14 days, although on the second date the value obtained is statistically similar to that of Y-25 and M-430. According to the recommendations published by ISTA (2012), the duration of the germination test in tomato should be 14 days; however, in the present experiment, when performing the daily counts, differences were observed that were lost over time. When comparing the results of REAAA6 and REAAA14, it was observed that the HT caused a statistically higher value in the first determination (Table 2).

Thus, the seeds of the genotypes that grew in HT germinated faster, which could indicate that, under this condition, the seeds acquire greater tolerance to extreme temperature conditions, although this aspect will have to be studied in later research. Although the germination process is an event that is highly related to internal (state of maturity) and external seed factors, it is said that a seed is mature when it reaches its full development, both morphological and physiological (Taiz et al., 2015). Relative humidity and temperature are among the external factors involved in germination (Bewley et al., 2013), as was the case in this study.

Conclusions

The average maximum temperature of 38°C favored the physical characteristics (number of seeds per fruit,

alteraron ni sus características físicas (Cuadro 3) ni su germinación fue la variedad nativa C-40 (Figura 2), por lo que se recomendaría como un candidato para resistir TA.

Al considerar el efecto de TA sobre las variables de calidad física (peso y tamaño) de las semillas y su comportamiento en la G se muestra un efecto contrario. De manera general, la TA incrementa el valor de las características físicas de la semilla, pero disminuye el de G. Como ya se mencionó, cada proceso vegetal podría tener una temperatura máxima fisiológica diferente (Taiz et al., 2015). Por lo que aquí se demostraría que el proceso de acumulación de reservas, que da como resultado el peso de la semilla, es menos susceptible a la TA que el de la adquisición de la capacidad germinativa. De acuerdo con Otho, Stone, y Harada (2007), el desarrollo de la semilla se divide en tres fases principales: histodiferenciación, acumulación de reservas y adquisición de la tolerancia a la desecación, y para lograr la máxima calidad de semillas las tres fases deben transcurrir de manera óptima (Bewley, Bradford, Hilhorst, & Nonogaki, 2013).

En este trabajo, el valor de la correlación entre los valores del P1000S y G fue de -0.15^{ns} (datos no mostrados), lo que indica la nula correlación entre estas variables. Por su parte, la CE de las semillas de los genotipos MM y M-430 producidos bajo TA presentaron valores más altos comparados con los obtenidos con el TC (Cuadro 3). Lo anterior significa que dichas semillas tuvieron mayor permeabilidad de membrana, lo que equivale a un menor potencial fisiológico (Soto-González & Valiengo-Valeri, 2011), y explicaría el bajo potencial germinativo de las otras variedades comparadas con C-40, la cual mostró menor permeabilidad de membrana, tanto en TA ($10.68 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$) como en TC ($12.60 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$). Asimismo, este genotipo fue uno de los que presentó mayor poder germinativo (Figura 2), dejando ver la relación inversa entre la CE de la semilla y su poder germinativo.

Los valores de germinación bajos se pueden explicar por la pérdida de permeabilidad de la membrana. Dumas, Dadomo, Di Lucca, y Grolier (2003) mencionan que la actividad antioxidante en el interior del fruto desarrollado en TA aumenta, lo que afecta la estabilidad de las membranas celulares. Como consecuencia de una menor estructura y selectividad de dichas membranas, las semillas de menor potencial fisiológico liberan mayor concentración de iones lixiviados (Filho, Carvalho, Cícero, & Demétrio, 1987). El valor de la correlación (r^2) entre los valores de G y CE fue de -0.73^* ; lo cual pudo deberse a que la TA influyó en la estructura de las membranas de las semillas, lo que alteró la CE y redujo la capacidad germinativa (datos no mostrados).

En cuanto al vigor de la semilla, en la variable VEDEA se observaron diferencias ($P \leq 0.05$) entre genotipos

weight of 1000 seeds, and seed length and width), as well as the emergence rate at seven days. However, this treatment increased the electrical conductivity by 13 % and showed germination percentages below 90 %; that is, there is an inverse correlation between the latter two.

End of English version

References / Referencias

- Adams, S. R., Cockshull, K. E., & Cave, C. R. J. (2001). Effect of temperature on the growth and development of tomato fruits. *Annals of Botany*, 88(5), 869-877. doi: 10.1006/anbo.2001.1524
- Agandi, S. V., Cutforth, H. W., Miller, P. R., McConkey, B. G., Entz, M. H., Brandt, S. A., & Volkmar, K. M. (2000). Response of three Brassica species to high temperature stress during reproductive growth. *Canadian Journal of Plant Science*, 80(4), 693-701. doi: 10.4141/P99-152 10.4141/P99-152
- Ayala-Garay, O. J., Pichardo-González, J. M., Estrada-Gómez, J. A., Carrillo-Salazar, J. A., & Hernández-Livera, A. (2006). Rendimiento y calidad de semillas de frijol ayocote *Phaseolus coccineus* L. *Agricultura Técnica en México*, 32(3), 287-295. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0568-25172006000300007
- Ayala-Villegas, M. J., Ayala-Garay, O. J., Aguilar-Rincón, V. H., & Corona-Torres, T. (2014). Evolución de la calidad de semilla de *Capsicum annuum* L. durante su desarrollo en el fruto. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 37(1), 79-87. Retrieved from <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/37-1/8a.pdf>
- Baskin, C. C., & Baskin, J. M. (2014). *Seeds. Ecology, biogeography, and evolution of dormancy and germination*. California, USA: Academic Press-Elsevier.
- Bewley, J. D., & Black, M. (1994). *Seeds: Physiology of development and germination*. New York, USA: Plenum Press.
- Bewley, J. D., Bradford, K. J., Hillhorst, W. H. M., & Nonogaki, H. (2013). *Seeds. Physiology of development, germination and dormancy*. New York, USA: Springer.
- Biais, B., Bénard, C., Beauvoit, B., Colombié, S., Prodhomme, D., Ménard, G., Bernillon, S., Gehl, B., Gautier, H., Ballias, P., Mazat, J. P., Sweetlove, L., Genard, M., & Gibon, Y. (2014). Remarkable reproducibility of enzyme activity profiles in tomato fruits grown under contrasting environments provides a roadmap for studies of fruit metabolism. *Plant Physiology*, 164(3), 1204-1221. doi: 10.1104/pp.113.231241
- Delouche, J. C., & Baskin, C. C. (1973). Accelerated aging technique for predicting the relative storability of seed lots. *Seed Science and Technology*, 1, 421-452. Retrieved from: <http://ir.library.msstate.edu/bitstream/handle/11668/13316/F-4.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Dumas, Y., Dadomo, M., Di Lucca, G., & Grolier, P. (2003). Effect of environmental factors and agricultural techniques on antioxidant content of tomatoes. *Journal of the Science and Food and Agriculture*, 83(5), 369-382. doi: 10.1002/jsfa.1370
- Erickson, A. N., & Markhart, A. H. (2002). Flower developmental stage and organ sensitivity of bell pepper (*Capsicum annuum* L.) to elevated temperature. *Plant Cell and Environment*, 25, 123-130. doi: 10.1046/j.0016-8025.2001.00807.x
- Filho, M. J., Carvalho, R. V., Cícero, S. M., & Demétrio, C. G. B. (1987). Qualidade fisiológica e

(Cuadro 2). La variedad MM germinó más lento que el resto, y sus valores son inferiores tanto a los 6 días como a los 14 días; aunque en la segunda fecha, el valor obtenido es estadísticamente similar a Y-25 y M-430. De acuerdo con las recomendaciones de la ISTA (2012), la duración de la prueba de germinación en tomate debe ser de 14 días; sin embargo, en el presente experimento, al realizar el conteo diario se observaron diferencias que con el tiempo se perdieron. Al comparar los resultados de VEDEA6 y VEDEA14, se pudo observar que la TA provocó un valor estadísticamente mayor en la primera determinación (Cuadro 2).

Así entonces, las semillas de los genotipos que crecieron en TA germinaron más rápido, lo que podría indicar que, bajo esta condición, las semillas adquieren mayor tolerancia a condiciones extremas de temperatura, aunque este aspecto tendrá que ser estudiado en investigaciones posteriores. Pese a que, el proceso de germinación es un evento que está altamente relacionado con factores internos (estado de madurez) y externos de la semilla, se dice que una semilla es madura cuando alcanza su desarrollo completo, tanto morfológico como fisiológico (Taiz et al., 2015). Entre los factores externos que intervienen en la germinación se encuentra la humedad y la temperatura (Bewley et al., 2013), como fue el caso.

Conclusiones

La temperatura máxima promedio de 38 °C favoreció las características físicas (número de semillas por fruto, peso de 1000 semillas, y largo y ancho de semilla), además de la velocidad de emergencia a los seis días. No obstante, este tratamiento incrementó la conductividad eléctrica en 13 % y mostró porcentajes de germinación por debajo de 90 %; es decir, hay una correlación inversa entre estos dos últimos.

Fin de la versión en español

- comportamento de sementes de soja (*Glycine max* L.) no armazenamento e no campo. *Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz*, 42(1), 195-249. doi: 10.1590/S0071-12761985000100015
- Florido-Bacallao, M., & Álvarez-Gil, M. (2015). Aspectos relacionados con el estrés de calor en tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Cultivos Tropicales*, 36(1), 77-95. Retrieved from http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362015000500008
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2015). *La diversidad genética: una herramienta secreta para luchar contra el cambio climático*. Retrieved from <http://www.fao.org/news/story/es/item/275178/icode/>
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2011). *Global Agro-ecological zones*. Rome, Italy: International Institute for Applied Systems Analysis – Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved from http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/gaez/docs/GAEZ_Model_Documentation.pdf
- Gautier, H., Diakou-Verdin, V., Benard, C., Reich, M., Buret, M., Bourgaud, F., Posëssel, J. L., Caris-Veyrat, C., & Génard, M. (2008). How does tomato quality (sugar, acid, and nutritional quality) vary with ripening stage, temperature, and irradiance?. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(4), 1241-1250. doi: 10.1021/jf072196t
- Hoagland, D. R., & Arnon, D. I. (1950). The water-culture method for growing plants without soil. *California Agricultural Experiment Station, Circular-347*. Retrieved from <https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=54aefd7ed4c118b6358b45db&assetKey=AS%3A273668901408776%401442259158553>
- International Seed Testing Association (ISTA). (2012). *International rules for seed testing*. Retrieved from https://www.seedtest.org/upload/cms/user/STI_143_April_2012_webwitherrata.pdf
- Luengwilai, K., & Beckles, D. M. (2009). Starch granules in tomato fruit show a complex pattern of degradation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(18), 8480-8487. doi: 10.1021/jf901593m
- Maguire, J. (1962). Speed of germination-aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Science*, 2, 176-177. doi: 10.2135/cropsci1962.001183X000200020033x
- Organization for Economic Cooperation and Development (OECD). (2012). *OECD Environmental Outlook to 2050*. Paris: OECD Publishing. doi: 10.1787/9789264122246-en
- Otho, M. A., Stone, S. L., & Harada, J. J. (2007). Genetic control of seed development and seed mass. In: Bradford, K. J., & Nonogaki, H. (Eds), *Seed development, dormancy and germination* (pp. 1-49). Iowa, USA: Blackwell Publishing.
- Pepper, A. E., Corbett, R. W., & Kang, N. (2002). Natural variation in *Arabidopsis* seedling photomorphogenesis reveals a likely role for TED1 in phytochrome signalling. *Plant Cell & Environment*, 25(4), 591-600. doi: 10.1046/j.1365-3040.2002.00840.x
- Resh, H. M. (1981). *Hydroponic food production*. California, USA: Woodbridge Press Publishing Co.
- Rodríguez-Burgos, A., Ayala-Garay, O. J., Hernández-Livera, A., Leal-León, V. M., & Cortez-Mondaca, E. (2011). Desarrollo de fruto y semilla de cinco variedades de tomate de cáscara en Sinaloa. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(5), 673-687. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v2n5/v2n5a4.pdf>
- Schwarz, D., Thompson, A. J., & Kläring, A. J. (2014). Guidelines to use tomato in experiments with a controlled environment. *Frontiers in Plant Science*, 5, 625. doi: 10.3389/fpls.2014.00625
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2017). *Anuario del Sistema Integral de Información Agroalimentaria y Pesquera*. México: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación - OEIDRUS. Retrieved from <http://www.siap.gob.mx>
- Sim, S. C., Robbins, M. D., Van Deynze, A., Michel, A. P., & Francis, D. M. (2011). Population structure and genetic differentiation associated with breeding history and selection in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Heredity*, 106, 927-935. doi: 10.1038/hdy.2010.139
- Soto-González, L. J., & Valiengo-Valeri, S. (2011). Prueba de la conductividad eléctrica en la evaluación fisiológica de la calidad de semillas en *Zeyheria tuberculosa*. *Bosque*, 32(2), 197-202. doi: 10.4067/S0717-92002011000200010
- Statistical Analysis System (SAS Institute). (2003). *SAS/STAT user's guide version 9.1.3*. Cary: Author.
- Steiner, A. A. (1984). The universal nutrient solution. In: *Proceedings of 6th International Congress on Soilless Culture* (pp. 633-650). Netherlands: Lunteren Wageningen.
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant physiology and development*. Sunderland, Massachusetts: Sinauer Associates, Inc., Publishers.
- Wan, P., Toudeshki, A., Tan, H., & Ehsani, R. (2018). A methodology for fresh tomato maturity detection using computer vision. *Computers and Electronics in Agriculture*, 146, 43-50. doi: 10.1016/j.compag.2018.01.011