

## Phenology of the 'Hass' avocado in the State of Mexico, Mexico

### Fenología del aguacate 'Hass' en el Estado de México, México

Juan Carlos Reyes-Alemán<sup>1\*</sup>; Jaime Mejía-Carranza<sup>1</sup>;  
Omar Ricardo Monteagudo-Rodríguez<sup>2</sup>; María Eugenia Valdez-Pérez<sup>1</sup>;  
Justino Gerardo González-Díaz<sup>1</sup>; María de la Cruz Espíndola-Barquera<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma del Estado de México. Carretera Tenancingo-Villa Guerrero km 1.5, Tenancingo, Estado de México, C. P. 52400, MÉXICO.

<sup>2</sup>Secretaría de Desarrollo Agropecuario. Rancho San Lorenzo s/n, San Lorenzo Coacalco, Metepec, Estado de México, C. P. 52140, MÉXICO.

<sup>3</sup>Fundación Salvador Sánchez Colín, CICTAMEX, S.C. Ignacio Zaragoza núm. 6, Coatepec Harinas, Estado de México, C. P. 51700, MÉXICO.

\*Corresponding author: jcreyesa@uaemex.mx, tel. 722 380 15 56.

#### Abstract

Avocado is the third most produced crop in the State of Mexico, with 11,296 ha, where the predominant variety is 'Hass.' Due to a lack of knowledge about its development in different environments, its agronomic management is highly heterogeneous, since it is based on experiences in other states. The objective of this study was to analyze, describe and quantify the phenological development of 'Hass' avocado in three environments in the State of Mexico. The vegetative, flowering, root and fruit development of 'Hass' avocado was recorded during the 2011-2012 cycle. Two periods were distinguished for vegetative growth (December-April and October-November), flowering (December-February and August-October), harvest (November-February and August-October) and root growth (April-July and October-December). The vegetative growth (0.40 and 0.06 cm increase in shoot length and diameter, respectively) and root growth (36 and 24 g fresh weight and dry matter, respectively) were lower than fruit growth (70.1 mm increase in diameter) in Coatepec Harinas (temperate with andosol soil and isotherms from 14-18 °C). In contrast, the same growth measurements were higher in the localities with cambisol-luvisol soil and isotherms from 16-20 °C: Ixtapan del Oro (temperate/semi-warm, with 0.69 and 0.12 cm in shoot, and 56 and 48.8 g in root) and Temascaltepec (semi-warm, with 0.78 and 0.23 cm in shoot, and 69.3 and 31.3 g in root), but lower increases in fruit (59.4 and 56.6 mm, respectively). The phenological differences observed among environments will be useful for the technical management of the crop.

**Keywords:** *Persea americana* Mill., climate, soil, phenological development.

#### Resumen

El cultivo de aguacate en el Estado de México representa el tercer lugar de producción en México con 11,296 ha, en donde la variedad predominante es 'Hass'. Por desconocimiento de su desarrollo, en los diferentes ambientes, su manejo agronómico resulta altamente heterogéneo, ya que se basa en experiencias de otros estados. El objetivo de este estudio fue analizar, describir y cuantificar el desarrollo fenológico de aguacate 'Hass' en tres ambientes del Estado de México. Se registró el desarrollo vegetativo, floración, raíz y fruto de aguacate 'Hass' durante el ciclo 2011-2012. Se distinguieron dos épocas de crecimiento vegetativo (diciembre-abril y octubre-noviembre), floración (diciembre-febrero y agosto-octubre), cosecha (noviembre-febrero y agosto-octubre) y crecimiento de raíz (abril-julio y octubre-diciembre). Los crecimientos vegetativo (0.40 y 0.06 cm de incremento en longitud y diámetro de brote, respectivamente) y de raíz (36 y 24 g de peso fresco y materia seca, respectivamente) fueron menores que el de fruto (70.1 mm de incremento en diámetro) en Coatepec Harinas (templada con suelo andosol e isoterma de 14-18 °C). En contraste, los mismos crecimientos fueron mayores en las localidades con suelo cambisol-luvisol e isoterma de 16 a 20 °C: Ixtapan del Oro (templada-semicálida, con 0.69 y 0.12 cm de brote, y 56 y 48.8 g en raíz) y Temascaltepec (semicálida, con 0.78 y 0.23 cm en brote, y 69.3 y 31.3 g en raíz), pero menores incrementos en fruto (59.4 y 56.6 mm, respectivamente). Las diferencias fenológicas observadas entre ambientes servirán para el manejo técnico del cultivo.

**Palabras clave:** *Persea americana* Mill., clima, suelo, desarrollo fenológico.

Please cite this article as follows (APA 6): Reyes-Alemán, J. C., Mejía-Carranza, J., Monteagudo-Rodríguez, O. R., Valdez-Pérez, M. E., González-Díaz, J. G., & Espíndola-Barquera, M. C. (2021). Phenology of the 'Hass' avocado in the State of Mexico, Mexico. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 27(2), 113-134 doi: 10.5154/r.rchsh.2020.09.020



Revista Chapingo  
Serie Horticultura

## Introduction

Avocado cultivation in the State of Mexico has increased considerably in recent years, having risen from 1,581 to 11,296 ha from 2003 to 2020. At present, this state ranks third in national production. This producing region comprises 31 municipalities, of which Coatepec Harinas (2,155 ha), Temascaltepec (1,558 ha), Donato Guerra (1,493 ha), Tenancingo (884 ha), Almoloya de Alquisiras (572 ha) and Villa de Allende (499 ha) account for 7,161 ha or 69.75 % of the cultivated area (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera - Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SIAP - SAGARPA], 2020). In the region, avocado thrives in different climates and soils, which has an impact on growth and development variables.

The avocado growth habit is monopodial, with indeterminate vegetative growth and shoots that predominantly end in a vegetative bud (Chanderbali, Soltis, Soltis, & Wolstenholme, 2013). Floral development produces both determinate and indeterminate inflorescences. The former arise when the primary axis ends in an inflorescence, and the latter, when a vegetative bud is formed at the end of the primary axis and continues the shoot growth (Schroeder, 1951; Salazar-García, Lord, & Lovatt, 1998). In the latter case, the vegetative bud of the inflorescence could develop a vegetative shoot and compete with the fruit (Wolstenholme, 2013). Thorp, Aspinnall, and Sedgley (1994) proposed the term “growth module” for the grouping of branches that make up the architecture and growth habit of the tree, and established two types of shoots: proleptic and sylleptic. The former are axillary shoots that grow from dormant buds on previously formed nodes, and can be either vegetative or reproductive. Sylleptic shoots originate from a shoot with no previous dormancy period and a “contemporary” development, i.e., they grew during the same cycle and are vegetative. The Hass (*Persea americana* var. *guatemalensis* x *Persea americana* var. *drymifolia*) variety presents a balance between proleptic and sylleptic shoots (Chanderbali et al., 2013).

Avocado development is rhythmic (Thorp et al., 1994), and the allocation of its assimilates generates competition between vegetative and reproductive growth (Whiley, Wolstenholme, & Faber, 2013). The root system of this crop is shallow and distributed in the canopy zone of the tree (Scora, Wolstenholme, & Lavi, 2002). Feeder roots are mostly found 30 to 40 cm deep, and are distinguished by a whitish unsubsized color with few or no absorbing hairs (Chanderbali et al., 2013). Roots can penetrate 60 cm or more in favorable soils (Chanderbali et al., 2013; Wolstenholme, 2013), with adequate oxygenation, porous and rich in organic matter (Wolstenholme, 2013), such as andosols (Ferreira et al., 2008).

## Introducción

El cultivo de aguacate en el Estado de México ha incrementado considerablemente en los últimos años, al pasar de 1,581 a 11,296 ha de 2003 a 2020. Actualmente, este estado ocupa el tercer lugar en producción nacional. La región productora comprende 31 municipios, en donde Coatepec Harinas (2,155 ha), Temascaltepec (1,558 ha), Donato Guerra (1,493 ha), Tenancingo (884 ha), Almoloya de Alquisiras (572 ha) y Villa de Allende (499 ha) representan el 69.75 %, correspondiente a 7,161 ha de superficie cultivada (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera - Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SIAP - SAGARPA], 2020). En la región, el aguacate prospera en diferentes climas y suelos, lo cual repercute en las variables de crecimiento y desarrollo.

El hábito de crecimiento del aguacate es monopodial, con crecimientos vegetativos indeterminados y cuyos brotes finalizan predominantemente en una yema vegetativa (Chanderbali, Soltis, Soltis, & Wolstenholme, 2013). El desarrollo floral produce inflorescencias determinadas e indeterminadas. Las primeras surgen cuando el eje primario finaliza en una inflorescencia, y las segundas, cuando al final del eje primario se forma una yema vegetativa que continúa el crecimiento del brote (Schroeder, 1951; Salazar-García, Lord, & Lovatt, 1998). En el último caso, la yema vegetativa de la inflorescencia podría desarrollar un brote vegetativo y competir con el fruto (Wolstenholme, 2013). Thorp, Aspinnall, y Sedgley, (1994) propusieron el término “módulo de crecimiento” para el agrupamiento de ramas que conforman la arquitectura y hábito de crecimiento del árbol, y establecieron dos tipos de brotes: prolépticos y silépticos. Los primeros son brotes axilares que crecen a partir de yemas inactivas en nudos que se formaron previamente y que pueden resultar vegetativos o reproductivos. Los silépticos provienen de un brote sin periodo previo de inactividad y de un desarrollo “contemporáneo”; es decir, creció durante el mismo ciclo y es vegetativo. La variedad Hass (*Persea americana* var. *guatemalensis* x *Persea americana* var. *drymifolia*) presenta un equilibrio entre brotes prolépticos y silépticos (Chanderbali et al., 2013).

El desarrollo del aguacate es rítmico (Thorp et al., 1994), y el destino de sus asimilados genera competencia entre el crecimiento vegetativo y el reproductivo (Whiley, Wolstenholme, & Faber, 2013). El sistema radicular de dicho cultivo es superficial y está distribuido en la zona de la copa del árbol (Scora, Wolstenholme, & Lavi, 2002). Las raíces alimentadoras se encuentran mayormente entre los primeros 30 a 40 cm de profundidad, y se distinguen por un color blanquecino sin subsizer con escasos o nulos pelos absorbentes (Chanderbali et al., 2013). Las raíces pueden penetrar

Vegetative growth precedes root growth, and its intensity decreases with the crop load on the tree (Arpaia, Witney, Robinson, & Mickelbart, 1995). Low day/night temperatures (18/15 °C) have been shown to reduce plant growth, but induce flowering (Chaikiattiyos, Menzel, & Rasmussen, 1994). Santos-García (2013) reported optimum temperatures of 16.2 to 21.2 °C for 'Hass' avocado development in the State of Mexico.

Knowing the phenology of the plant and the environment in each production zone has enabled the integration of phenological models in Colombia, Spain, and Mexico, and has made technical management more efficient (Rocha-Arroyo, Salazar-García, Bárcenas-Ortega, González-Durán, & Cossio-Vargas, 2011; Alcaraz, Thorp, & Hormaza, 2013; Bernal-Estrada, Vásquez-Gallo, & Cartagena-Valenzuela, 2017). Phenological avocado models have been useful for regulating the nutrient supply according to root growth, controlling *Phytophthora cinnamomi* (Whiley, Saranah, Cull, & Pegg, 1988; Whiley, Saranah, & Wolstenholme, 1995; Whiley et al., 2013) and managing water (Rocha-Arroyo et al., 2011; Tapia-Vargas, Vidales-Fernández, & Larios-Guzmán, 2015). In the State of Mexico, 'Hass' is the predominant variety (Rubí-Arriaga et al., 2013), but its development in different zones remains unknown.

The heterogeneity of climatic and soil conditions present in the main avocado producing areas within the State of Mexico influences the growth, development, yield and quality of avocado fruit. Therefore, the objective of this study was to analyze, describe and quantify the phenological development of 'Hass' avocado in three contrasting environments in the production region within the State of Mexico.

## Materials and methods

The study was carried out in three plots with different climatic and soil conditions, selected based on their differences in altitude, but with similar agronomic management. The plots are located in the municipalities of Coatepec Harinas, Temascaltepec and Ixtapan del Oro, within the producing zone in the State of Mexico (Table 1).

A total of 10 Hass avocado trees per plot, 5 to 8 years old and 3 to 5 m in height, were selected and marked from 1 to 10. Each tree was geo-positioned and divided into four sections according to the cardinal points: North, South, East and West. Vegetative growth was measured on one branch per cardinal section of each tree. Each branch was 1 m long, and five 30-cm vegetative shoots of indeterminate lateral growth were selected from it. Twenty-two samples were taken, at biweekly intervals, and each shoot was labeled and its length and diameter (both in cm) were measured.

60 cm o más en suelos favorables (Chanderbali et al., 2013; Wolstenholme, 2013), con adecuada oxigenación, porosos y ricos en materia orgánica (Wolstenholme, 2013), como los andosoles (Ferreira et al., 2008).

El crecimiento vegetativo precede al de raíz, y la intensidad del crecimiento vegetativo disminuye con la carga productiva del árbol (Arpaia, Witney, Robinson, & Mickelbart, 1995). Se ha demostrado que las temperaturas de 18 y 15 °C en el día y la noche, respectivamente, reducen el crecimiento de la planta, pero inducen floración (Chaikiattiyos, Menzel, & Rasmussen, 1994). Santos-García (2013) reportó como óptimo temperaturas de 16.2 a 21.2 °C para el desarrollo de aguacate 'Hass' en el Estado de México.

Conocer la fenología de la planta y el ambiente en cada zona de producción ha permitido integrar modelos fenológicos en Colombia, España y México, y ha hecho el manejo técnico más eficiente (Rocha-Arroyo, Salazar-García, Bárcenas-Ortega, González-Durán, & Cossio-Vargas, 2011; Alcaraz, Thorp, & Hormaza, 2013; Bernal-Estrada, Vásquez-Gallo, & Cartagena-Valenzuela, 2017). Los modelos fenológicos de aguacate han sido útiles para regular el abastecimiento nutricional acorde con el crecimiento radical, el control de *Phytophthora cinnamomi* (Whiley, Saranah, Cull, & Pegg, 1988; Whiley, Saranah, & Wolstenholme, 1995; Whiley et al., 2013) y el manejo de agua (Rocha-Arroyo et al., 2011; Tapia-Vargas, Vidales-Fernández, & Larios-Guzmán, 2015). En el Estado de México, la variedad predominante es 'Hass' (Rubí-Arriaga et al., 2013), pero se desconoce cómo se desarrolla en las distintas zonas.

La heterogeneidad de las características del clima y el suelo, existentes en las principales áreas productoras de aguacate en el Estado de México, influye en el crecimiento, desarrollo, rendimiento y calidad del fruto de aguacate. Por ello, el objetivo del presente estudio fue analizar, describir y cuantificar el desarrollo fenológico de aguacate 'Hass' en tres ambientes contrastantes de la región productora del Estado de México.

## Materiales y métodos

El estudio se realizó en tres parcelas con características climáticas y edáficas distintas, seleccionadas con base en su diferente altitud, aunque con manejo agronómico semejante. Las parcelas pertenecían a los municipios Coatepec Harinas, Temascaltepec e Ixtapan del Oro, comprendidos en la zona productora del Estado de México (Cuadro 1).

Se seleccionaron 10 árboles de aguacate variedad Hass por parcela, de 5 a 8 años de edad y altura de 3 a 5 m, y se marcaron del 1 al 10. Cada árbol se geo-posicionó y se dividió en cuatro secciones de acuerdo con los puntos

Table 1. Location, climatic and soil description of the studied plots in the State of Mexico, Mexico.

Cuadro 1. Localización, descripción climática y edáfica de las parcelas estudiadas en el Estado de México, México.

Locality/ Localidad	North latitude, West longitude, elevation/ Latitud norte, longitud oeste, altitud	Climate type/ Tipo climático	Precipitation coefficient – annual rainfall/ Coeficiente de precipitación – lluvia anual	Predominant soil/ Suelo predominante	Similar municipalities in terms of climate and soil/ Municipios afines por clima y suelo
Coatepec Harinas "La Javiela"	18° 58' 36.99", 99° 46' 18.87", 2,568 m	C(w2)(w)b(i)g: temperate, sub-humid with long summer and winter rainfall below 5%, isothermal/ C(w2)(w)b(i)g: templado, subhúmedo con verano largo y lluvia invernal inferior al 5 %, isoterma	Greater than 55 – 1,242 mm/ Mayor a 55 – 1,242 mm	Andosol	Coatepec Harinas, Villa de Allende, Donato Guerra, Tenancingo, Villa Guerrero, Ocuilan, Atlautla, Ecatzingo, Tepetlixpa, Ozumba, Joquicingo, Tenango del Valle, Amanalco, Almoloya de Alquisiras, Texcaltitlán, Temascaltepec, Ixtapan del Oro (upper side/ parte alta)
Ixtapan del Oro "El Salto"	19° 16' 58.86", 100° 14' 59.82", 1,764 m	(A)C(w"1)(wi)g: temperate/semi-warm, sub-humid, (moderate humidity), intra-summer drought, winter rainfall below 5 %, isothermal/ (A)C(w"1)(wi)g: templado semicálido, subhúmedo, (humedad moderada), sequía intra-estival, lluvia invernal menor a 5 %, isoterma	Greater than 55 – 1,300 mm/ Menor a 55 – 1,300 mm	Cambisol, luvisol, leptosol	Ixtapan del Oro (lower side/parte baja), Valle de Bravo, Santo Tomás de los Plátanos, Oztoloapan, Zacazonapan, Malinalco
Temascaltepec "Rancho La Labor"	19° 2' 39.73", 99° 58' 51.02", 2,059 m	A(C)w1(w)(i)g: semi- warm, sub-humid, (moderate humidity), intra-summer drought, winter rainfall below 5 %, low thermal fluctuation/ A(C)w1(w)(i)g: semicálido, subhúmedo, (humedad moderada), sequía intra-estival, lluvia invernal menor a 5 %, poca oscilación térmica	Greater than 55 – 1,400 mm/ Mayor a 55 – 1,400 mm	Cambisol, luvisol, vertisol/	Temascaltepec (lower side/parte baja), San Simón de Guerrero, Tejupilco, Zacualpan, Amatepec, Luvianos, Sultepec, Ixtapan de la Sal, Zumpahuacán

Floral development was measured in one branch of each tree per cardinal section. Five complete indeterminate inflorescences at anthesis were identified in each branch, and the length of the central axis (cm) was measured, and the number of lateral axes and the number of flowers were determined for each branch. To determine the percentage of intensity, the number of flowers per inflorescence, per branch and per tree was calculated. Similarly, the flowering periods were identified from bract opening and inflorescence emergence until flowering at anthesis, corresponding to stages 7 and 11 on the Salazar-García et al. (1998) scale.

Root growth was determined based on fresh and dry weight (g), by means of sampling in holes with a volume of 64 L in the drip zone (north and south side of each tree). For this procedure, a different tree was selected per sampling every 30 days and per location, for 12 months. Roots were separated from the soil, washed and dried in a forced air circulation oven (ov-484A, GS Blue M Electric, USA) at 110 °C. Afterwards, fresh and dry weights were recorded on an analytical balance (OHAUS®, Switzerland).

The increase in fruit growth was obtained from 10 fruits marked in the middle section of each tree by cardinal orientation (north and south). The equatorial diameter of each fruit was measured every 30 days, and the monthly increment was calculated. Environmental variables per plot were determined using a hygromograph (MOBO, USA). Air temperature, soil temperature and relative humidity were used as a reference for the occurrence of phenological events over time. The response variables for each parameter were: shoot length and diameter for vegetative growth; central axis length, number of lateral axes and flowers per inflorescence for flowering; dry and fresh weight for root, and equatorial diameter for fruit.

Flowering variables were analyzed using randomized blocks. Each location represented a block with 10 trees, each tree consisted of four cardinal sections (N, S, E, W) and each section was a treatment with 15 replicates, for a total of 60 replicates per tree. The shoot length, diameter and fruit diameter variables were analyzed using a split-plot design. The largest plot corresponded to the three locations, and the smallest plot to the four cardinal sections. Each plot had 10 blocks with one tree each.

Since the root fresh and dry weight variables were destructive, they were analyzed in a completely randomized design, in which the treatments were the locations and orientation (north and south). Each reading corresponded to one sampling per tree and per location, every 30 days. The information was analyzed with the SPSS Statistics 20 statistical software through

cardinales: norte, sur, este y oeste. El crecimiento vegetativo se midió en una rama por sección cardinal de cada árbol. Cada rama era de 1 m de longitud, y en ella se seleccionaron cinco brotes vegetativos de 30 cm de crecimiento lateral indeterminado. Se realizaron 22 muestreos, en intervalos quincenales, en donde se etiquetó cada brote y se midió su longitud y diámetro (ambos en cm).

El desarrollo floral se midió en una rama de cada árbol por sección cardinal. En cada rama se identificaron cinco inflorescencias indeterminadas completas en anthesis, y en cada una se midió la longitud del eje central (cm), el número de ejes laterales y el número de flores. Para determinar el porcentaje de intensidad, se calculó el número de flores por inflorescencia, por rama y por árbol. Asimismo, se identificaron los periodos de floración a partir de la apertura de brácteas y la emergencia de la inflorescencia hasta floración en anthesis, correspondiente a los estados 7 y 11 de la escala de Salazar-García et al. (1998).

El crecimiento de raíz se determinó mediante el peso fresco y seco (g), esto por medio de muestreos en cepas con un volumen de 64 L en la zona de goteo (lado norte y sur de cada árbol). Para esta determinación, se seleccionó un árbol distinto por muestreo cada 30 días y por localidad durante 12 meses. Las raíces se separaron del suelo, se lavaron y se secaron en un horno con circulación de aire forzado (ov-484A, GS Blue M Electric, EUA) a 110 °C. Posteriormente, se registró el peso fresco y seco en una balanza analítica (OHAUS®, Suiza).

El incremento del crecimiento de fruto se obtuvo de 10 frutos marcados en la parte media de cada árbol por orientación cardinal (norte y sur). A cada fruto se le midió el diámetro ecuatorial cada 30 días, y se determinó el incremento mensual. Las variables ambientales por parcela se determinaron mediante un higrotermógrafo (MOBO, EUA). La temperatura del aire, el suelo y la humedad relativa fueron referencia para la ocurrencia de eventos fenológicos a través del tiempo. Las variables respuesta de cada parámetro fueron: longitud y diámetro de brote para crecimiento vegetativo; longitud de eje central, número de ejes laterales y flores por inflorescencia para floración; peso seco y fresco para raíz, y diámetro ecuatorial para fruto.

Las variables de floración se analizaron mediante bloques al azar. Cada localidad representó un bloque con 10 árboles, cada árbol consistió de cuatro secciones cardinales (N, S, E, O) y cada sección fue un tratamiento con 15 repeticiones, lo cual dio un total de 60 repeticiones por árbol. Las variables longitud, diámetro de brote y diámetro de fruto se analizaron mediante un diseño en parcelas divididas. La parcela mayor correspondió a las tres localidades, y la parcela menor,

analysis of variance. Tukey's mean comparison test ( $P \leq 0.05$ ) was applied whenever there were statistical differences.

Production statistics were obtained from SIAP - SAGARPA (2020) and were spatially associated with the municipalities to represent them on a map according to the size of the planted area, from largest to smallest (Figure 1a). The climate (Figure 1b), isotherm (Figure 2a) and soil (Figure 2b) maps were generated from García and Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (1998a, 1998b), Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) - CONABIO (1995) and Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2016). The municipal level layer of the study area was carried out using the ArcMap software (ver. 10.2).

## Results and discussion

The localities studied have contrasting climates (Figure 1b) and soils (Figure 2b) (García and CONABIO, 1998a). "La Javiela" site (Coatepec Harinas) corresponds to a temperate climate C(w2)(w)b(i)g, which is present in 63.4 % of the total state area dedicated to avocado growing. On the other hand, "El Salto" (Ixtapan del Oro) has a temperate/semi-warm climate A(C(w)1)(wi)g (present in 12.85 % of the region) and "Rancho La Labor" (Temascaltepec) has a semi-warm climate A(C)w1(w)(w)(i)g (present in 12.37 % of the region) (Table 1).

The andosol, cambisol, luvisol and vertisol soils predominate in the localities under study, being distributed in 70, 15, 8 and 5 % of the production zone, respectively (INIFAP-CONABIO, 1995) (Figure 2b). A constraint on the crop in the semi-warm localities (Ixtapan del Oro and Temascaltepec) is the low prevalence of andosols, since the crop requires deep and drained soils (Wolstenholme & Whiley, 1999; Wolstenholme, 2013). However, cambisol, luvisol and vertisol soils predominate in these two localities (Figure 2b), characterized by being compact and thin, and having a clayey texture, *tepetate* outcrops, electrical conductivity of  $0.62 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ , high saturation of exchangeable cations (such as calcium [80.5 %] and sodium [27.1  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]), high calcium and magnesium contents (4373.7 and 482  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , respectively), and pH greater than 7.1 (Table 2).

## Vegetative development

Vegetative development had two outstanding growth periods; the first was vigorous in late winter and early spring (March-April), and the second one was less vigorous during November-December; however, moderate growth occurred during the rainy season from June to November. The highest growth was in

a las cuatro secciones cardinales. Cada parcela tuvo 10 bloques de un árbol cada uno.

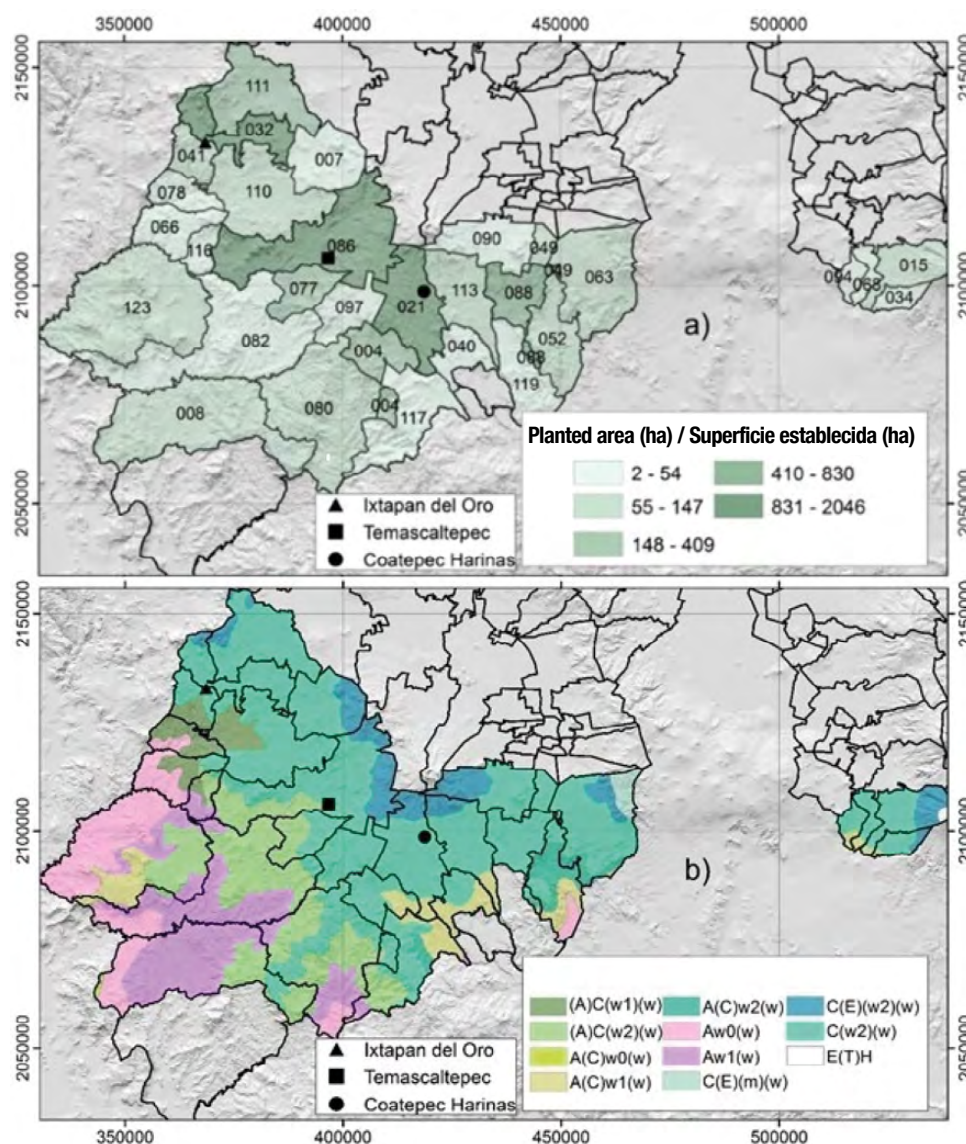
Las variables peso fresco y seco de raíz, al ser destructivas, correspondieron a un diseño completamente aleatorizado, donde los tratamientos fueron las localidades y la orientación (norte y sur). Cada lectura correspondió a un muestreo por árbol y por localidad cada 30 días. La información se analizó con el paquete estadístico SPSS Statistics 20 mediante análisis de varianza. Donde hubo diferencias estadísticas, se aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

La estadística de producción se obtuvo de SIAP - SAGARPA (2020), y se asoció espacialmente con los municipios para representarlos en un mapa de acuerdo con la superficie establecida de mayor a menor (Figura 1a). Los mapas de clima (Figura 1b), isotermas (Figura 2a) y suelo (Figura 2b) se generaron a partir de García y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (1998a, 1998b), Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) - CONABIO (1995) e Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2016). El corte a nivel municipal del área de estudio se realizó mediante el programa informático ArcMap (ver. 10.2).

## Resultados y discusión

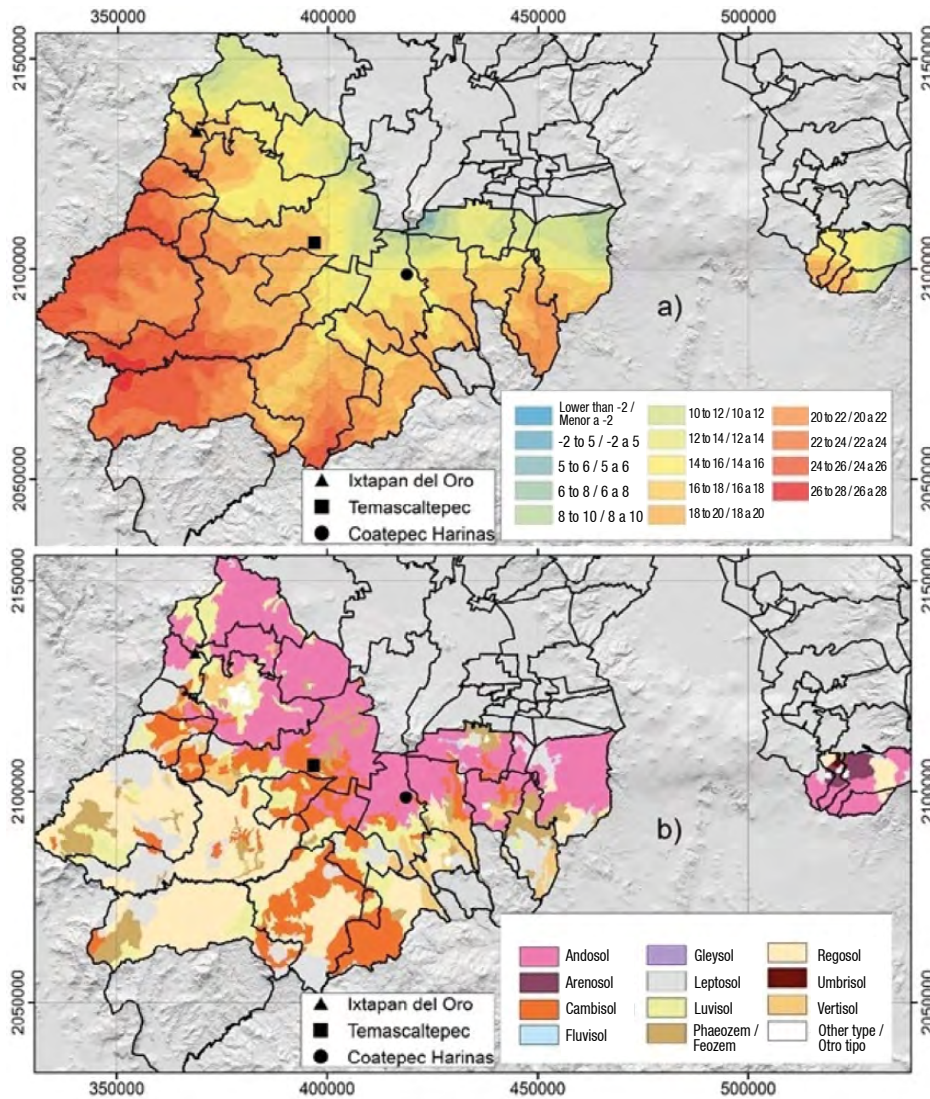
Las localidades de estudio contrastan en cuanto a clima (Figura 1b) y suelo (Figura 2b) (García y CONABIO, 1998a). El sitio "La Javiela" (Coatepec Harinas) corresponde al clima templado C(w2)(w)b(i)g, el cual se encuentra distribuido en el 63.4 % del total de la superficie estatal destinada al cultivo de aguacate. Por su parte, "El Salto" (Ixtapan del Oro) presenta un clima templado-semicálido A(C(w)1)(wi)g (distribuido en el 12.85 % de la región) y "Rancho La Labor" (Temascaltepec) cuenta con un clima semicálido A(C)w1(w)(w)(i)g (distribuido en el 12.37 % de la región) (Cuadro 1).

En las localidades estudiadas predominan los suelos andosol, cambisol, luvisol y vertisol, los cuales están distribuidos en 70, 15, 8 y 5 % de la zona productora, respectivamente (INIFAP-CONABIO, 1995) (Figura 2b). Una limitante para el cultivo en las localidades semicálidas (Ixtapan del Oro y Temascaltepec) es la baja prevalencia de suelo andosol, ya que el cultivo requiere suelos profundos y drenados (Wolstenholme & Whiley, 1999; Wolstenholme, 2013). Sin embargo, predominan los suelos cambisol, luvisol y vertisol (Figura 2b), distintivos por textura arcillosa, compactos, delgados, afloramientos de *tepetate*, conductividad eléctrica de  $0.62 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ , alta saturación de cationes intercambiables (como calcio [80.5 %] y sodio [27.1  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]), contenidos



**Figure 1.** Producing municipalities (a) and climates (b) of the avocado-growing region in the State of Mexico. 004 = Almoloya de Alquisiras; 007 = Amanalco; 008 = Amatepec; 015 = Atlautla; 021 = Coatepec Harinas; 032 = Donato Guerra; 034 = Ecatzingo; 040 = Ixtapan de la Sal; 041 = Ixtapan del Oro; 049 = Joquicingo; 052 = Malinalco; 063 = Ocuilan; 066 = Oztoloapan; 068 = Ozumba; 077 = San Simón de Guerrero; 078 = Santo Tomás; 080 = Sultepec; 082 = Tejupilco; 086 = Temascaltepec; 088 = Tenancingo; 090 = Tenango del Valle; 094 = Tepetlixpa; 097 = Texcaltitlán; 110 = Valle de Bravo; 111 = Villa de Allende; 113 = Villa Guerrero; 116 = Zacazonapan; 117 = Zacualpan; 123 = Luvianos. Source: self-made using data from García and Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (1998a), Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera – Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (2020) and Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2016).

**Figura 1.** Municipios productores (a) y climas (b) de la franja aguacatera del Estado de México. 004 = Almoloya de Alquisiras; 007 = Amanalco; 008 = Amatepec; 015 = Atlautla; 021 = Coatepec Harinas; 032 = Donato Guerra; 034 = Ecatzingo; 040 = Ixtapan de la Sal; 041 = Ixtapan del Oro; 049 = Joquicingo; 052 = Malinalco; 063 = Ocuilan; 066 = Oztoloapan; 068 = Ozumba; 077 = San Simón de Guerrero; 078 = Santo Tomás; 080 = Sultepec; 082 = Tejupilco; 086 = Temascaltepec; 088 = Tenancingo; 090 = Tenango del Valle; 094 = Tepetlixpa; 097 = Texcaltitlán; 110 = Valle de Bravo; 111 = Villa de Allende; 113 = Villa Guerrero; 116 = Zacazonapan; 117 = Zacualpan; 123 = Luvianos. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de García y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (1998a), Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera – Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (2020) e Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2016).



**Figure 2.** Isotherms (a) and soil units (b) in the avocado producing zone in the State of Mexico. Source: self-made using data from García and Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (1998b), Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias – Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (1995), Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera – Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (2020) and Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2016).

**Figura 2.** Isotermas (a) y unidades de suelo (b) de la franja aguacatera del Estado de México. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de García y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (1998b), Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias – Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (1995), Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera – Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (2020) e Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2016).

Temascaltepec (semi-warm) with a biweekly increase of 0.78 cm in shoot length and 0.23 cm in shoot diameter, followed by Ixtapan del Oro (temperate/semi-warm) with increases of 0.69 and 0.12 cm, respectively, and Coatepec Harinas (temperate) with increases of 0.40 and 0.06 cm, respectively (Figure 3).

When vegetative growth was related to temperature (Figure 4) and relative humidity, it was higher in the

elevados de calcio y magnesio (4373.7 y 482 mg·kg<sup>-1</sup>, respectivamente), y pH mayor a 7.1 (Cuadro 2).

### Desarrollo vegetativo

El desarrollo vegetativo tuvo dos crecimientos sobresalientes, el primero de manera vigorosa a finales de invierno y principios de primavera (marzo-abril), y el segundo de menor vigor durante noviembre-



**Table 2. Soil physicochemical characteristics in the studied localities in the State of Mexico, Mexico.****Cuadro 2. Características físico-químicas de suelo en las localidades estudiadas en el Estado de México, México.**

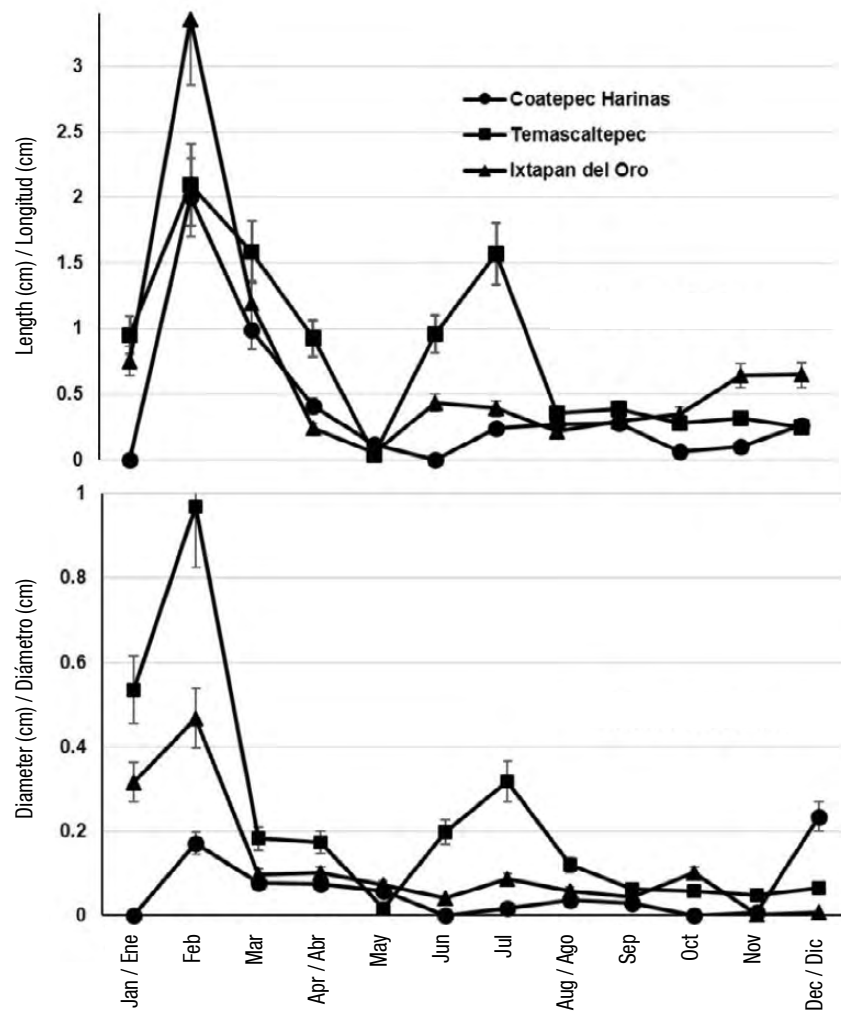
	Test /Prueba	Coatepec Harinas (La Javiela)	Temascaltepec (La Labor)	Ixtapan del Oro (El Salto)
Texture (%) /Textura (%)	Porosity /Porosidad	45.98	46.62	51.20
	Sand /Arena	52.04	51.12	54.04
	Silt /Limo	34.00	32.00	26.00
	Clay /Arcilla	13.96	16.88	19.96
Chemical /Químico	pH	5.35 (Ac)	5.35 (Ac)	7.11 (Ne)
	Hydraulic conductivity / Conductividad hidráulica	2.30 cm·h <sup>-1</sup> (Mo)	1.81 (Mo)	3.34 (Mo)
	Electrical conductivity / Conductividad eléctrica	0.10 dS·m <sup>-1</sup> (LS)	0.10 (LS)	0.62 (LS)
	Organic matter / Materia orgánica	6.16 % (M)	5.94 (M)	7.02 (M)
	CEC /CIC	4.54 cmol·kg <sup>-1</sup> (MuB)	4.26 (MuB)	27.12 (A)
Macronutrients (mg·kg <sup>-1</sup> ) / Macronutrientes (mg·kg <sup>-1</sup> )	Organic nitrogen / Nitrógeno orgánico	46.2 (M)	44.6 (M)	52.7 (M)
	Phosphorous /Fósforo	0.8 (MuB)	0.4 (MuB)	3.5 (MuB)
	Potassium /Potasio	375.2 (MoA)	371.8 (MoA)	472.9 (MoA)
	Calcium /Calcio	493.8 (MuB)	460.7 (MuB)	4373.7 (A)
	Magnesium /Magnesio	80.6 (B)	59.7 (B)	482.0 (MoA)
	Sulfur (S-SO <sub>4</sub> ) /Azufre (S-SO <sub>4</sub> )	102.2 (M)	99.9 (M)	48.6 (MoB)
Micronutrients (mg·kg <sup>-1</sup> ) / Micronutrientes (mg·kg <sup>-1</sup> )	Iron /Hierro	16.2 (MoB)	15.3 (MoB)	615.7 (MuA)
	Manganese /Manganeso	1.7 (B)	1.5 (B)	9.0 (MoB)
	Zinc	0.1 (MuB)	0.1 (MuB)	2.5 (MoB)
	Copper /Cobre	0.1 (MuB)	0.1 (MuB)	1.9 (MoB)
	Boron /Boro	0.1 (MuB)	0.1 (MuB)	0.5 (B)
Exchangeable cation saturation (%) / Saturación de cationes intercambiables (%)	Potassium /Potasio	21.1 (MuA)	22.3 (MuA)	4.5 (MoA)
	Calcium /Calcio	54.3 (MoB)	54.0 (MoB)	80.5 (A)
	Magnesium /Magnesio	14.6 (M)	13.5 (M)	14.6 (M)
	Sodium /Sodio	1.6 (B)	2.4 (MoB)	0.4 (MuB)
	Aluminum /Aluminio	5.8 (M)	5.5 (M)	0.0 (MuB)
	Hydrogen /Hidrógeno	2.6	2.3	0.0
	Aluminum /Aluminio	23.5 mg·kg <sup>-1</sup> (B)	21.0 (B)	0.0 (MuB)
Sodium /Sodio	17.2 mg·kg <sup>-1</sup> (MuB)	23.9 (MuB)	27.1 (MuB)	

Ac = acidic; Ne = neutral; Mo = moderate; LS = Salt free; M = medium; B = low; A = high; MuB = very low; MuA = very high; MoA = moderately high; MoB = moderately low.

Ac = ácido; Ne = neutro; Mo = moderado; LS = libre de sales; M = medio; B = bajo; A = alto; MuB = muy bajo; MuA = muy alto; MoA = moderadamente alto; MoB = moderadamente bajo.

semi-warm localities, where annual average conditions prevailed at 21.7 °C and 65.6 % in Temascaltepec, and at 27.7 °C and 63.2 % in Ixtapan del Oro. These localities were more humid, which could favor vegetative growth as compared to the temperate zone (Coatepec Harinas), which presented values of 19.1 °C and 37.1 %; this is despite the fact that the three sites had at least three irrigations: at the beginning, middle and end of the dry season.

diciembre, aunque hubo crecimientos moderados durante las lluvias de junio a noviembre. El mayor crecimiento fue en Temascaltepec (semicálido) con un incremento quincenal de 0.78 cm en longitud y 0.23 cm en diámetro de brote, seguido de Ixtapan del Oro (templado-semicálido) con incrementos de 0.69 y 0.12 cm, respectivamente, y Coatepec Harinas (templado) con aumentos de 0.40 y 0.06 cm, respectivamente (Figura 3).



**Figure 3. Vegetative shoot length and diameter of 'Hass' avocado in the localities under study in the State of Mexico, Mexico. 10 % percentage error.**

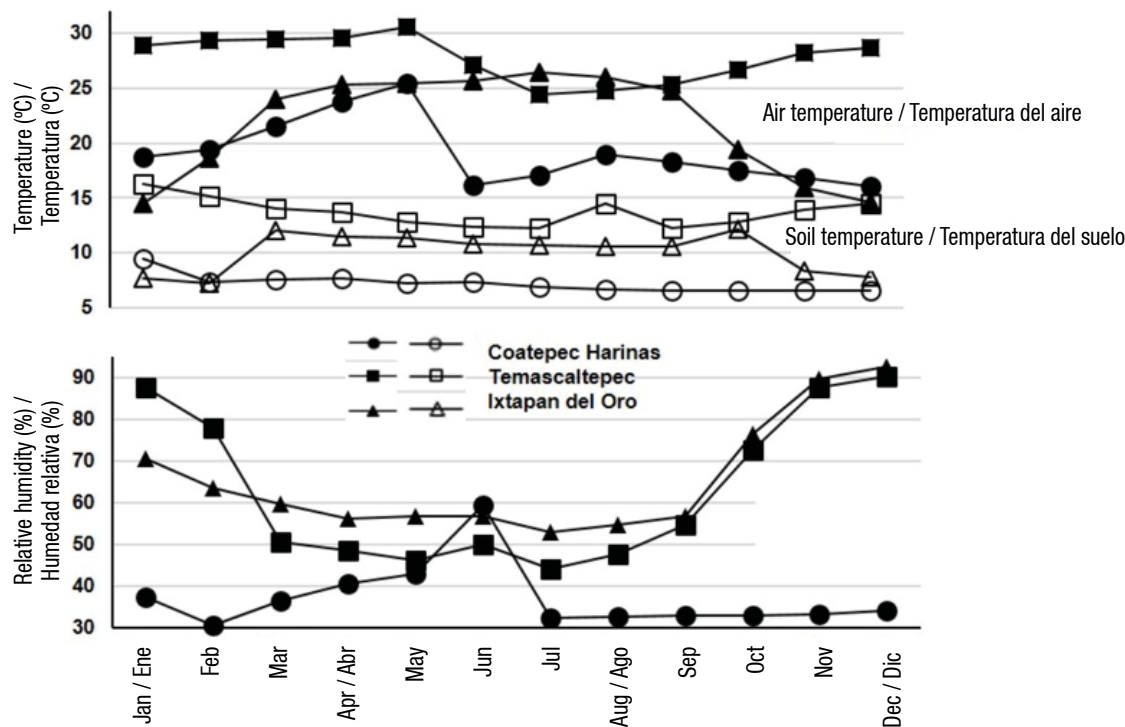
**Figura 3. Longitud y diámetro de brote vegetativo de aguacate 'Hass' en las localidades estudiadas del Estado de México, México. Porcentaje de error de 10 %.**

Statistically, the vegetative growth during the evaluated year was different among localities and cardinal position (Tables 3 and 4). Growth was stable in Temascaltepec, it was only observed at the beginning of the year in Coatepec Harinas, and it was observed at the beginning and end of the year in Ixtapan del Oro. These differences show constraining aspects of growth in Coatepec Harinas and Ixtapan del Oro, probably due to brusque changes in temperature and humidity during the summer (July to September), as well as to soil type. The isotherms recorded had average values of 14 to 16 °C in the coldest locality (Coatepec Harinas), and of 18 to 22 °C in the semi-warm localities (García & CONABIO, 1998b) (Figure 2a).

Based on cardinal direction, vegetative growth occurred approximately 10 days earlier in the southern part, and was delayed in the northern part. This effect is

Al relacionar crecimiento vegetativo con temperatura (Figura 4) y humedad relativa, éste fue mayor en las localidades semicálidas, en donde prevalecieron condiciones promedio anuales de 21.7 °C y 65.6 % en Temascaltepec, y de 27.7 °C y 63.2 % en Ixtapan del Oro. Dichas localidades fueron más húmedas, lo cual pudo favorecer el crecimiento vegetativo en comparación con la zona templada (Coatepec Harinas), que presentó valores de 19.1 °C y 37.1 %; esto pese a que los tres sitios contaron con al menos tres riegos: inicio, intermedio y final de la época de estiaje.

Estadísticamente, el crecimiento vegetativo durante el año evaluado fue diferente entre localidades y posición cardinal (Cuadros 3 y 4). El crecimiento fue estable en Temascaltepec, en Coatepec Harinas solo se observó crecimiento al inicio, y en Ixtapan del Oro hubo crecimiento al inicio y final del año.



**Figure 4. Prevailing environmental temperature and relative humidity in the localities under study in the State of Mexico, Mexico.**

**Figura 4. Temperatura y humedad ambiental prevalecientes en las localidades estudiadas del Estado de México, México.**

**Table 3. Vegetative development of 'Hass' avocado (shoot length and diameter) in the localities under study in the State of Mexico, Mexico.**

**Cuadro 3. Desarrollo vegetativo de aguacate 'Hass' (longitud y diámetro de brote) en las localidades estudiadas del Estado de México, México.**

	February/ Febrero	March/ Marzo	April/ Abril	September/ Septiembre	October/ Octubre	November/ Noviembre	December/ Diciembre
Length (cm)/Longitud (cm)							
Coatepec Harinas	9.33 b <sup>2</sup>	10.57 a	11.39 a				
Temascaltepec	5.93 a	7.39 a	8.43 a				
Ixtapan del Oro	7.86 ab	10.67 a	11.41 a				
HSD/DMSH	3.08	3.48	0.8267				
Diameter (mm)/Diámetro (mm)							
Coatepec Harinas	5.25 b	5.28 ab	5.18 ab	5.18 a	5.16 a	5.23 a	6.32 b
Temascaltepec	4.33 a	4.84 a	5.09 a	5.62 ab	5.74 ab	5.82 ab	5.40 a
Ixtapan del Oro	5.53 b	5.73 b	5.99 b	6.11 b	6.21 b	6.31 b	5.88 ab
HSD/DMSH	0.3744	0.8202	0.8267	0.7099	0.7311	0.745	0.727

HSD = honestly significant difference. <sup>2</sup>Means with the same letter within each column do not differ statistically (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

DMSH = diferencia mínima significativa honesta. <sup>2</sup>Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

**Table 4. Vegetative development of 'Hass' avocado (shoot length and diameter) by cardinal position of the tree.**  
**Cuadro 4. Desarrollo vegetativo de aguacate 'Hass' (longitud y diámetro de brote) por posición cardinal del árbol.**

	January/ Enero	March/ Marzo	May/ Mayo	June/ Junio	August/ Agosto
Length (cm)/Longitud (cm)					
North/Norte	6.95 a <sup>2</sup>	8.64 a	10.53 a	10.93 ab	11.53 a
South/Sur	8.9 b	10.53 b	11.91 a	12.24 ab	12.57 a
East/Este	7.85 ab	9.95 ab	11.77 a	12.41 b	12.98 a
West/Oeste	7.14 a	9.05 ab	10.3 a	10.46 a	11.13 a
HSD/DMSH	1.46	1.72	1.82	1.87	1.93
	February/ Febrero	September/ Septiembre	November/ Noviembre	December/ Diciembre	
Diameter (mm)/Diámetro (mm)					
North/Norte	4.98 a	5.47 a	5.71 a	5.80 ab	
South/Sur	5.27 ab	5.40 a	5.48 a	5.53 a	
East/Este	5.32 b	5.83 a	6.01 a	6.06 b	
West/Oeste	5.20 ab	5.85 a	5.95 a	6.07 b	
HSD/DMSH	0.314	0.516	0.535	0.527	

HSD = honestly significant difference. <sup>2</sup>Means with the same letter within each column do not differ statistically (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

DMSH = diferencia mínima significativa honesta. <sup>2</sup>Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

attributed to light and wind variations, in a similar way to what occurred with the flowering lag.

#### Floral development

The predominant type of inflorescence at the localities was indeterminate, which is characteristic of 'Hass' (Schroeder, 1951; Arpaia et al., 1995). A greater number of flowers per inflorescence was generated in the semi-warm climate sites (Temascaltepec and Ixtapan del Oro), as compared to the temperate climate one (Coatepec Harinas) (Table 5). This resulted in fewer but larger fruits for Coatepec Harinas.

There was no difference in the flowering time among localities (data not shown), but Temascaltepec, with greater flowering intensity, alternated in the following year (Table 5). Also, floral development occurred 10 days earlier on the sunny (southern) part of the tree, with a greater size and number of flowers per inflorescence as compared to the shaded (northern) part.

The onset of flowering is related to low temperatures (Salazar-García et al., 1998). In the region, when the temperature fell below 19 °C (during the winter [November to March] and the summer [July to October]) (Figure 3), the two flowerings observed in the localities occurred. Salazar-García et al. (1998) reported that inflorescence development is stimulated with temperatures  $\leq 15$  °C in temperate climate areas, but a recent study of 'Hass' and 'Mendez' avocado, in cold environments in Jalisco, Mexico, indicates that establishing a specific temperature value for stimulating floral development is irrelevant, since it

Estas diferencias evidencian aspectos limitativos del crecimiento en Coatepec Harinas e Ixtapan del Oro, debido, probablemente, a cambios bruscos de temperatura y humedad durante el verano (julio a septiembre), así como al tipo de suelo. Las isoterms registradas indicaron valores promedio de 14 a 16 °C en la localidad más fría (Coatepec Harinas), y de 18 a 22 °C en las localidades semicálidas (García & CONABIO, 1998b) (Figura 2a).

Con base en la orientación cardinal, el crecimiento vegetativo se adelantó aproximadamente 10 días en la parte sur, y se retrasó en la parte norte. Dicho efecto se atribuye a variaciones de luz y viento, de manera semejante a lo ocurrido con el desfase en floración.

#### Desarrollo floral

El tipo de inflorescencias predominantes en las localidades fueron las indeterminadas, típicas de 'Hass' (Schroeder, 1951; Arpaia et al., 1995). Un mayor número de flores por inflorescencia se generó en los sitios de clima semicálido (Temascaltepec e Ixtapan del Oro), en comparación con el sitio de clima templado (Coatepec Harinas) (Cuadro 5). Lo anterior se tradujo en menor número de frutos para Coatepec Harinas, pero de mayor tamaño.

En la época de floración entre localidades no hubo diferencia (datos no mostrados), pero Temascaltepec, con mayor intensidad de floración, alternó al siguiente año (Cuadro 5). Asimismo, se observó un adelanto de 10 días en el desarrollo floral de la parte soleada (sur) del árbol, con un mayor tamaño y número

**Table 5. Floral development in ‘Hass’ avocado in the localities under study in the State of Mexico, Mexico (2011 and 2012 cycles).****Cuadro 5. Desarrollo floral en aguacate ‘Hass’ en las localidades estudiadas del Estado de México, México (ciclo 2011 y 2012).**

Locality/Localidad	Number of lateral axes / Número de ejes laterales		Central axis length (cm)/ Longitud de eje central (cm)		Number of flowers per inflorescence / Número de flores por inflorescencia		Inflorescences per tree / Inflorescencias por árbol	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Coatepec Harinas	5.7 b <sup>z</sup>	5.7 a	9.3 a	9.2 a	64.7 b	85.8 a	1061	932
Temascaltepec	6.5 a	0 c	5.7 c	0 c	118.6 a	0 b	2446	0
Ixtapan del Oro	5.7 b	4.3 b	7.1 b	5.8 b	117.9 a	86.1 a	1120	1220
<b>Direction/Orientación</b>								
South/Sur	6.1 b	3.8 a	8.5 a	5.9 a	106.3 a	64.8 a		
West/Oeste	5.5 c	3.5 ab	6.8 b	5.2 b	90.9 b	60.4 ab		
North/Norte	6.6 a	3.2 bc	6.7 b	4.0 c	103.7 a	50.7 b		
East/Este	5.6 c	2.9 c	7.5 b	5.1 b	101.0 a	53.4 b		

<sup>z</sup>Means with the same letter within each column do not differ statistically (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

<sup>z</sup>Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

can vary between 8 and 20 °C (Salazar-García, Ibarra-Estrada, Álvarez-Bravo, & González-Valdivia, 2018); for this reason, flowering in the localities under study, even with different temperature conditions (Figure 4), showed no difference in its time of occurrence.

Lahav and Gazit (1994) report that ‘Hass’ trees have difficulty flowering under water stress, but show an ability to flower and fruit set in temperate climates. In the region studied, the temperate locality with lower flowering intensity showed greater fruit set. Temascaltepec and Ixtapan del Oro (semi-warm), with higher mean annual temperatures than Coatepec Harinas (27.75, 21.7 and 19.13 °C, respectively) (Figure 4), had higher flowering intensity based on a greater number of flowers per inflorescence and inflorescences per tree (Table 5), but had lower fruit set. In Michoacán, Mexico, up to four flowerings and continuous vegetative growth were found, this due to a climatic diversity effect (up to six climates: warm, semi-warm and temperate) (Salazar-García, Cossio-Vargas, & González-Durán, 2009) and the prevalence of andosol soils from 0.8 to 3 m in depth, high moisture retention capacity, soil temperature from 13 to 21 °C and environmental temperature from 14 to 24 °C (Rocha-Arroyo et al., 2011).

### Floral bud formation

Winter flowering (December to February) was estimated to originate from flower buds formed in the vegetative growth of the previous winter (February to March), over a period of 9 to 10 months. Summer and

de flores por inflorescencia con respecto a la parte sombreada (norte).

El inicio de la floración está relacionado con bajas temperaturas (Salazar-García et al., 1998). En la región, cuando la temperatura disminuyó por debajo de 19 °C (durante invierno [noviembre a marzo] y verano [julio a octubre]) (Figura 3) sucedieron las dos floraciones observadas en las localidades. Salazar-García et al. (1998) determinaron que el desarrollo de la inflorescencia se estimula con temperaturas  $\leq 15$  °C en clima templado, pero un estudio reciente en ‘Hass’ y ‘Mendez’, en ambientes fríos de Jalisco, México, señala como irrelevante establecer un valor específico de temperatura para estimular el desarrollo floral, ya que éste puede variar entre 8 y 20 °C (Salazar-García, Ibarra-Estrada, Álvarez-Bravo, & González-Valdivia, 2018); razón por la cual, la floración en las localidades de estudio, aún con distinta condición de temperatura (Figura 4), no mostró diferencia en su época de ocurrencia.

Lahav y Gazit (1994) mencionan que los árboles de ‘Hass’ tienen dificultad para florecer con estrés hídrico, pero muestran habilidad para florecer y cuajar en climas templados. En la región estudiada, la localidad templada con menor intensidad de floración presentó mayor cuajado de frutos. Las localidades Temascaltepec e Ixtapan del Oro (semicálidas), con temperatura promedio anual mayor que Coatepec Harinas (27.75, 21.7 y 19.13 °C, respectivamente) (Figura 4), tuvieron mayor intensidad de floración basada en un mayor número de flores por inflorescencia e inflorescencias

early autumn flowering (August to October) originated from flower buds formed in the vegetative growth of the previous autumn and early winter (November to December), in an 8 to 10 month period. The above coincides with the findings reported by Salazar-García et al. (1998) and Salazar-García, Ibarra-Estrada, and González-Valdivia (2018), who state that a floral bud forms on a developing vegetative shoot, which when it stops growing enters a resting period (proleptic bud), and whose budding will be stimulated when the environmental temperature decreases. Determining these periods is useful to identify opportune moments for pruning, without affecting floral differentiation and fruit set.

The winter flowering (the most important for 'Hass' in the region) was observed to occur on highly vigorous shoots, which increased 2 to 3 cm in length and 0.5 to 1 cm in diameter on a biweekly basis, from January to March (Figure 3). On the other hand, the summer-autumn flowering (with less intensity in 'Hass') developed in shoots with less vigor, and had monthly increases of only 1 cm in length and 0.2 cm in diameter. The above suggests that a good strategy is to take care of the development of the winter vegetative shoots, since they will guarantee flowering and fruit set in February and March of the following year. Likewise, the date on which the definition of floral buds occurs in the winter shoots of 'Hass' should be considered (irreversible determination of flowering). Some authors report that this occurs earlier in temperate climates than in warm ones; for example, in Michoacán it occurs from June to July (Rocha-Arroyo, Salazar-García, & Bárcenas-Ortega, 2010), and in Nayarit during June in the winter shoots of 'Méndez' avocado (Salazar-García, Ibarra-Estrada, Álvarez-Bravo, & González-Valdivia, 2017). According to what was observed in the field, we suggest that in vegetative 'Hass' winter shoots in the State of Mexico, it occurs from August to September.

### Root development

Root growth had two increases over the year: the first one from April to May (at the end of the winter vegetative growth) with a soil temperature of 11 °C, and the second one from October to December with a soil temperature of 9.9 °C (Figure 5). Both increments coincided with the end of flowering: the first one with that of the winter and the second one with that of summer. These results are similar to those reported by Whiley and Wolstenholme (1990) and Arpaia et al. (1995), who suggest that root growth precedes vegetative growth and flowering. The warm environmental temperature from April to May favored root growth in the region. Root fresh weight per locality was highest in Temascaltepec (69.3 g per month), followed by Ixtapan del Oro (56 g) and Coatepec

por árbol (Cuadro 5), pero exhibieron menor cuajado de frutos. En Michoacán, México, se encontraron hasta cuatro floraciones y crecimientos vegetativos continuos, esto debido a un efecto de diversidad climática (hasta seis climas: cálidos, semicálidos y templados) (Salazar-García, Cossio-Vargas, & González-Durán, 2009) y a la prevalencia de suelos andosoles de 0.8 a 3 m de profundidad, alta capacidad de retención de humedad, temperatura de suelo de 13 a 21 °C y ambiental de 14 a 24 °C (Rocha-Arroyo et al., 2011).

### Formación de yemas florales

Se estimó que la floración de invierno (diciembre a febrero) se originó en yemas florales formadas en los crecimientos vegetativos del invierno previo (febrero a marzo), en un lapso de 9 a 10 meses. En tanto, la floración de verano y principios de otoño (agosto a octubre) se originó en yemas florales formadas en el crecimiento vegetativo de otoño y principios del invierno anterior (noviembre a diciembre), en un lapso de 8 a 10 meses. Lo anterior coincide con lo reportado por Salazar-García et al. (1998) y Salazar-García, Ibarra-Estrada, y González-Valdivia (2018), quienes señalan que una yema floral se forma en un brote vegetativo en desarrollo, que al dejar de crecer entra en un periodo de reposo (brote proléptico), y cuya brotación se estimulará cuando la temperatura ambiental disminuya. La determinación de estos periodos resulta útil para identificar momentos oportunos de poda, sin afectar la diferenciación floral y el cuajado.

Se observó que la floración de invierno (la más importante para 'Hass' en la región) se produjo en brotes de mucho vigor al incrementar su longitud (de 2 a 3 cm) y su diámetro (de 0.5 a 1 cm) de manera quincenal de enero a marzo (Figura 3). Por su parte, la floración de verano-otoño (de menos intensidad en 'Hass') se desarrolló en brotes de menor vigor, y tuvo incrementos mensuales de sólo 1 cm en longitud y 0.2 cm en diámetro. Lo anterior sugiere como estrategia cuidar el desarrollo de los brotes vegetativos de invierno, al ser los que garantizarán la floración y cuajado en febrero y marzo del próximo año. Asimismo, se debe considerar la fecha en que sucede la definición de las yemas florales en los brotes de invierno en 'Hass' (determinación irreversible a la floración). Algunos autores reportan que ésta sucede más temprano en climas templados que en cálidos; por ejemplo, en Michoacán ocurre de junio a julio (Rocha-Arroyo, Salazar-García, & Bárcenas-Ortega, 2010), y en Nayarit, durante junio en brotes de invierno de aguacate 'Méndez' (Salazar-García, Ibarra-Estrada, Álvarez-Bravo, & González-Valdivia, 2017). De acuerdo con lo observado en campo, se sugiere que en los brotes vegetativos de invierno en 'Hass', en el Estado de México, sucede de agosto a septiembre.

Harinas (36 g), with dry matter accumulation of 31.3, 48.8 and 24 g, respectively (Figure 5). This indicates that the semi-warm and humid conditions favored water accumulation, but the temperate environment, with less humidity, favored dry matter production. This is similar to what was observed by Rocha-Arroyo et al. (2011), who found that root production was higher in non-irrigated orchards in Michoacán.

Root fresh and dry weights were statistically different among localities during April, June, July and December (Table 6). These differences were associated with the variation in temperature and soil type among localities. The andosol soil, predominant in the temperate zone, may have favored moisture retention, which facilitated root dry matter production and fruit development. Root growth was greater during the rainy period (May to November) (Figure 5), when low vegetative and flowering development were observed, but greater root

## Desarrollo de raíz

El crecimiento de raíces tuvo dos incrementos durante el año: el primero de abril a mayo (al finalizar el crecimiento vegetativo de invierno) con una temperatura de suelo de 11 °C, y el segundo de octubre a diciembre con una temperatura de suelo de 9.9 °C (Figura 5). Ambos incrementos coincidieron con el fin de floración, el primero con el de invierno y el segundo con el de verano. Estos resultados son similares a los reportados por Whiley y Wolstenholme (1990) y Arpaia et al. (1995), quienes sugieren que el crecimiento de raíz antecede al vegetativo y a la floración. La temperatura ambiental cálida de abril a mayo favoreció el crecimiento de raíces en la región. El peso fresco de raíz por localidad fue mayor en Temascaltepec (69.3 g por mes), seguido de Ixtapan del Oro (56 g) y Coatepec Harinas (36 g), con acumulación de materia seca de 31.3, 48.8 y 24 g, respectivamente (Figura 5). Lo anterior

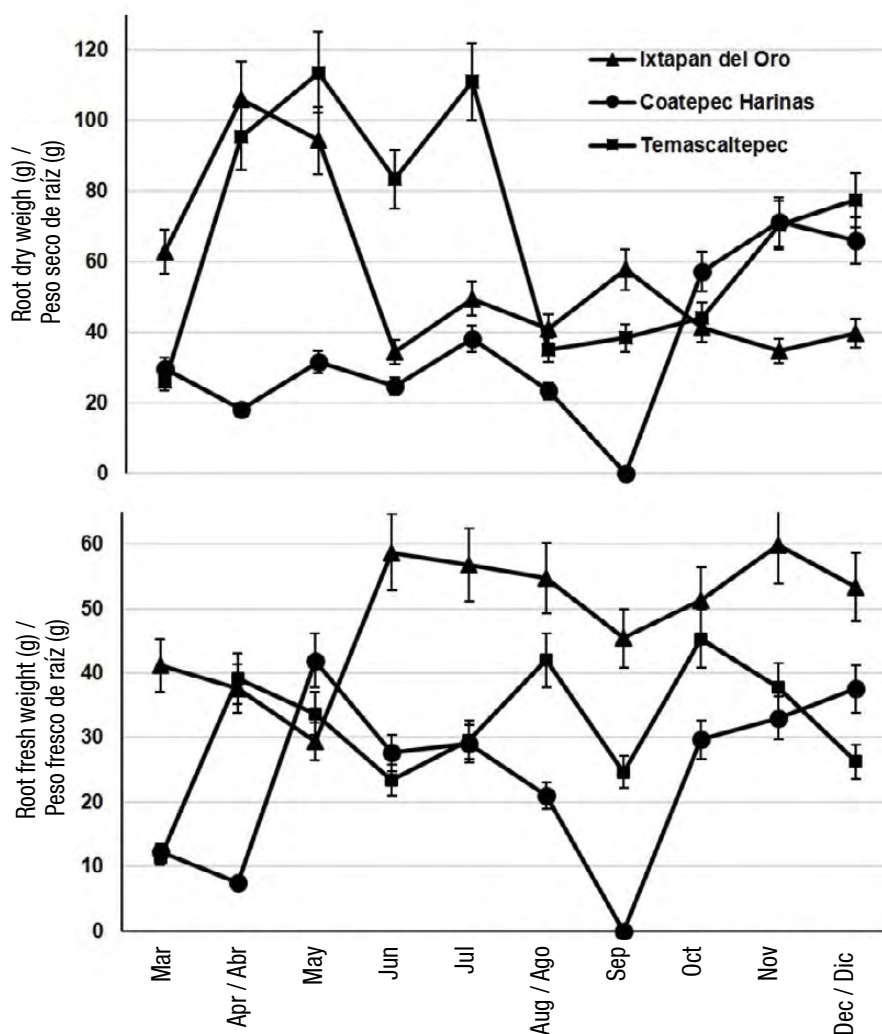


Figure 5. Accumulation of root fresh weight and dry weight of 'Hass' avocado trees in the localities under study in the State of Mexico, Mexico. 10 % percentage error.

Figura 5. Acumulación de peso fresco y peso seco de raíz de árboles de aguacate 'Hass' en las localidades estudiadas del Estado de México, México. Porcentaje de error de 10 %.

and fruit growth. Notably, greater root development was induced in the shaded part of the tree (north) than in the sunny part (south), in contrast to what occurred with vegetative development and flowering.

### Fruit development

The time from flower to fruit at harvest maturity was estimated to be 11 to 12 months with no difference among localities. Winter flowering reached harvest from November to February of the following year (360 days), and summer flowering from August to September of the following year (330 days). Fruit growth rate, in the first 170 days after fruit set, was observed as a bell-shaped curve, different from the classic sigmoidal shape (Salisbury & Ross, 1994; Alcaraz et al., 2013), and after 270 days of development, fruit growth rate decreased and remained constant (Figure 6).

Martínez, Martínez, Martínez-Valero, and Martínez (2003) report that at 182 days of development, 91.3 % of total fruit growth is achieved under the conditions in Granada, Spain. In this study, it was estimated that fruits reached 95 % of their final harvest size at 180 days. The greatest fruit growth was observed in the temperate locality (70.1 mm total increase), followed by the temperate-semi-warm (59.4 mm) and semi-warm (56.6 mm) localities (Figure 6). Climate determines the physical and chemical traits of avocado fruit, with temperature being the most influential on fruit size, weight, shape and rugosity, as well as on seed size (Salazar-García, Medina-Carrillo, & Álvarez-Bravo, 2016; Osuna-García, Nolasco-González, Herrera-González, Guzmán-Maldonado, & Álvarez-Bravo, 2017). In the semi-warm locations, it was determined that the prevalence of isotherms from 20 to 28 °C may have

indica que la condición semicálida y húmeda favoreció la acumulación de agua, pero el ambiente templado, con menos humedad, benefició la producción de materia seca. Esto se asemeja a lo observado por Rocha-Arroyo et al. (2011), quienes encontraron que la producción de raíces fue mayor en huertos sin riego ubicados en Michoacán.

Estadísticamente, el peso fresco y seco de raíces fue diferente entre localidades durante abril, junio, julio y diciembre (Cuadro 6). Dichas diferencias se asociaron con la variación de temperatura y tipo de suelo entre localidades. El suelo andosol, predominante en la zona templada, pudo favorecer la retención de humedad, la cual facilitó la producción de materia seca de raíz y el desarrollo del fruto. El crecimiento de raíz fue mayor durante el periodo lluvioso (mayo a noviembre) (Figura 5); durante este periodo, se observó un bajo desarrollo vegetativo y de floración, pero un mayor crecimiento de raíces y fruto. Notoriamente, se promovió mayor desarrollo de raíces en la parte sombreada del árbol (norte) que en la soleada (sur), a diferencia de lo ocurrido con el desarrollo vegetativo y la floración.

### Desarrollo del fruto

El tiempo de flor a fruto en madurez de cosecha se estimó de 11 a 12 meses sin diferencia entre localidades. La floración de invierno llegó a cosecha de noviembre a febrero del siguiente año (360 días), y la floración de verano, de agosto a septiembre del siguiente año (330 días). La velocidad de crecimiento del fruto, en los primeros 170 días después del cuajado, se observó como una curva en forma de campana, diferente de la sigmoidal clásica (Salisbury & Ross, 1994; Alcaraz et al.,

**Table 6. Root development of 'Hass' avocado trees in the localities under study in the State of Mexico, Mexico.**

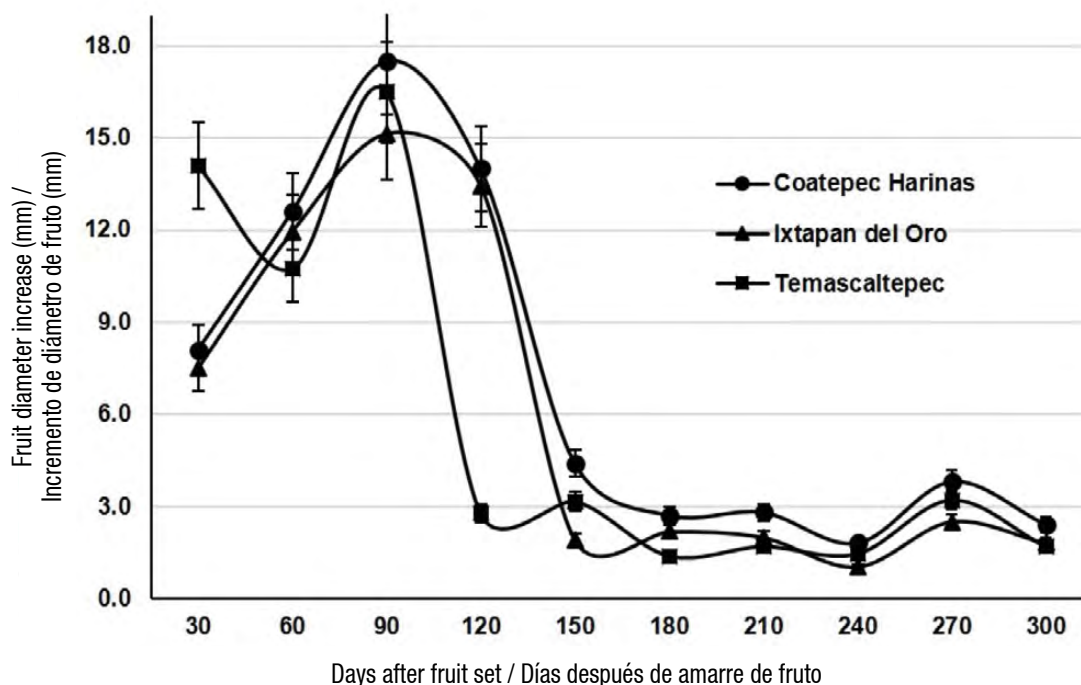
**Cuadro 6. Desarrollo de raíz de árboles de aguacate 'Hass' en las localidades estudiadas del Estado de México, México.**

	April/Abril	June/Junio	July/Julio	December/Diciembre
Fresh weight (g)/Peso fresco (g)				
Coatepec Harinas	9.10 b <sup>2</sup>	12.25 b		
Temascaltepec	47.60 a	41.6 a		
Ixtapan del Oro	52.95 a	17.15 ab		
HSD/DMSH	30.52	25.26		
Dry weight (g)/Peso seco (g)				
Coatepec Harinas	8.40 b	8.7 b	13.2 b	20.55 ab
Temascaltepec	28.90 a	31.75 a	38.9 a	26.95 a
Ixtapan del Oro	33.10 a	7.10 b	10.75 b	9.25 b
HSD/DMSH	20.23	16.49	24.89	15.91

HSD = honestly significant difference. <sup>2</sup>Means with the same letter within each column do not differ statistically (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

DMSH = diferencia mínima significativa honesta. <sup>2</sup>Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).





**Figure 6.** Growth rate curve of 'Hass' avocado fruit based on its increase in diameter (March 2011- February 2012). 10 % percentage error.

**Figura 6.** Curva de velocidad de crecimiento del fruto de aguacate 'Hass' con base en el incremento de su diámetro (marzo 2011 - febrero 2012). Porcentaje de error de 10 %.

been the cause of the reduction in fruit size (Figure 6) and the increase in vegetative development (Figure 5).

The characteristic productive alternation in 'Hass' was observed in Temascaltepec (Table 3), and it was related to excessive vegetative growth in that semi-warm locality. This is due to the fact that this phenomenon is influenced by the environment (Álvarez-Bravo, Salazar-García, Ruiz-Corral, & Medina-García, 2017) and affects the vigor, phenology (Arpaia et al., 1995) and fruit development (Wolstenholme, 1981; Whiley & Wolstenholme 1990) by reducing water and mineral transport to the fruit.

### Proposed phenological models

Based on the quantification of the variables and the assumption that the biological cycle of a crop is affected by the local environment (Davenport, 1982; Hartmann & Kester, 1995; Chanderbali et al., 2013), three phenological models associated with the region's climate and soil were integrated. In the temperate climate model, based on the Coatepec Harinas locality, it was observed that a larger fruit size was obtained, although with poorer fruit set (Figure 7), as well as lesser vegetative and root development. This is associated with the lower temperature and humidity in the area (Figure 7a). The soil moisture condition

2013), y después de 270 días de desarrollo, la velocidad de crecimiento del fruto se redujo y se mantuvo constante (Figura 6).

Martínez, Martínez, Martínez-Valero, y Martínez (2003) mencionan que a los 182 días de desarrollo se logra el 91.3 % del crecimiento total de fruto en condiciones de Granada, España. En este estudio, se estimó que el fruto logró el 95 % de su tamaño final de cosecha a los 180 días. El mayor crecimiento de fruto se observó en la localidad templada (70.1 mm de incremento final), seguida de la templada-semicálida (59.4 mm) y la semicálida (56.6 mm) (Figura 6). El clima determina las características físicas y químicas de los frutos de aguacate, siendo la temperatura la que más influye en el tamaño, peso, forma y rugosidad de fruto, así como en el tamaño de la semilla (Salazar-García, Medina-Carrillo, & Álvarez-Bravo, 2016; Osuna-García, Nolasco-González, Herrera-González, Guzmán-Maldonado, & Álvarez-Bravo, 2017). En las localidades semicálidas, se determinó que la prevalencia de isoterms de 20 a 28 °C pudo ser la causa de la reducción de tamaño del fruto (Figura 6) e incremento del desarrollo vegetativo (Figura 5).

La alternancia productiva típica en 'Hass' se observó en Temascaltepec (Cuadro 3), y se relacionó con un crecimiento vegetativo excesivo en dicha localidad

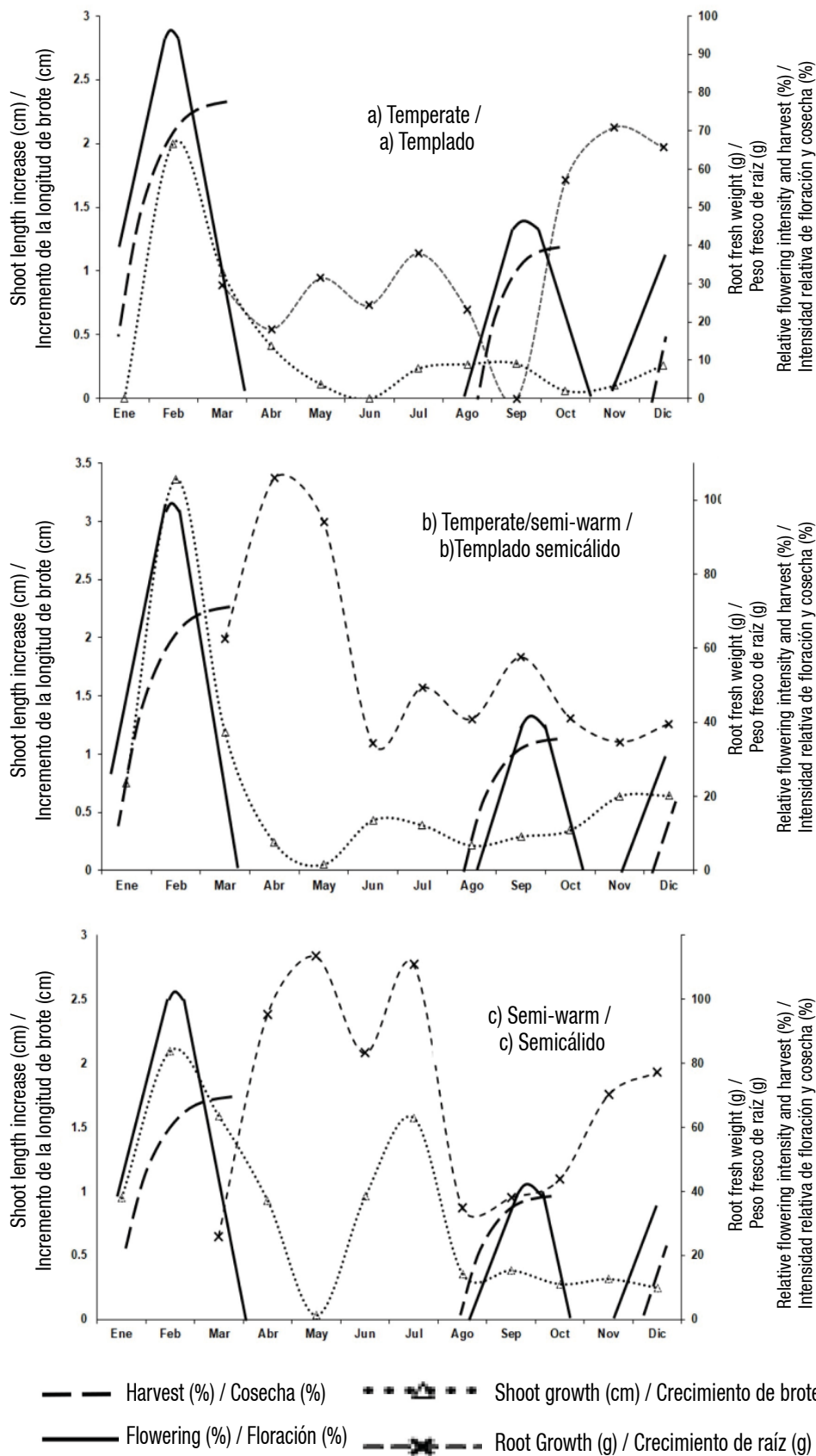


Figure 7. Phenological models of 'Hass' avocado for different climates: a) temperate (Coatepec Harinas), b) temperate/semi-warm (Ixtapan del Oro) and c) semi-warm (Temascaltepec).

Figura 7. Modelos fenológicos de aguacate 'Hass' para diferentes climas: a) templado (Coatepec Harinas), b) templado-semicálido (Ixtapan del Oro) y c) semicálido (Temascaltepec).

depends on management; however, in Coatepec Harinas it was favored because this locality has greater moisture retention due to the predominance of andosol soil.

In the temperate/semi-warm climate model, based on the Ixtapan del Oro locality, greater root growth and lower vegetative and fruit growth were observed in the warm months. However, as root growth decreased (associated with the decrease in temperature in autumn-winter) vegetative development increased, and vegetative and root growth did not overlap, as documented by Arpaia et al. (1995) and Mickelbart, Robinson, Witney, and Arpaia (2012).

In the semi-warm climate model, based on the Temascaltepec locality (Figure 7c), root growth increased during the spring (low vegetative development season), but in the summer and winter the growth was vigorous, similarly to Ixtapan del Oro, and was related to the productive alternation of the following year (Table 3). The alternation prioritized vegetative development (syllaptic shoots) and interrupted the rhythmic character typical of 'Hass' by not generating inflorescences (Thorp et al., 1994; Rocha-Arroyo et al., 2011; Chanderbali et al., 2013).

The vigorous vegetative growth in the semi-warm localities constrained fruit set and fruit size (Figure 7b). Therefore, it is advisable to control it through growth regulators and fertility management of cambisol-luvisol soils, which are distinctive for their low moisture retention and for being clayey and compact. It was also observed that in the semi-warm regions, precipitation was related to excessive vegetative development during the summer, since it was 1,300 to 1,400 mm, and that of the temperate climate was 1,242 mm (Table 1).

Temperature, environmental humidity and soil type explain the differences in the development of 'Hass' avocado in the different environments of the State of Mexico, since the cambisol and luvisol soils of the semi-warm climate constrain root development, either in dry or rainy conditions, by predisposing flooding, diseases and root asphyxia. However, temperature and humidity in the semi-warm localities favored vegetative and root growth: air temperature was 21.7 to 27.8 °C, soil temperature was 10 to 13.7 °C, and annual humidity was 63.2 to 65.6 %, whereas in the temperate zone air temperature was 13.7 °C, soil temperature was 7.1 °C, and humidity was 37.1 %.

## Conclusion

The differences in development of the phenological stages of 'Hass' avocado in the zones evaluated in the State of Mexico indicate the importance of considering a differential agronomic management for each producing region. This becomes relevant when

semicálida. Lo anterior debido a que este fenómeno es influenciado por el ambiente (Álvarez-Bravo, Salazar-García, Ruiz-Corral, & Medina-García, 2017) y afecta al vigor, la fenología (Arpaia et al., 1995) y el desarrollo del fruto (Wolstenholme, 1981; Whiley & Wolstenholme 1990) al reducir el transporte de agua y minerales hacia el fruto.

## Modelos fenológicos propuestos

Con base en la cuantificación de las variables y el supuesto de que el ciclo biológico de un cultivo es afectado por el ambiente local (Davenport, 1982; Hartmann & Kester, 1995; Chanderbali et al., 2013), se integraron tres modelos fenológicos asociados con el clima y el suelo de la región. En el modelo de clima templado, basado en la localidad de Coatepec Harinas, se distinguió que se obtiene un mayor tamaño de fruto, aunque con menor cuajado (Figura 7), así como un menor desarrollo vegetativo y de raíz. Lo anterior se asocia con la menor temperatura y humedad de la zona (Figura 7a). La condición de humedad del suelo es dependiente del manejo; sin embargo, en Coatepec Harinas se favoreció por presentar una mayor retención de humedad debido a la predominancia de suelo andosol.

En el modelo de clima templado-semicálido, basado en la localidad de Ixtapan del Oro, se observó un mayor crecimiento de raíz, y menor crecimiento vegetativo y de fruto en los meses cálidos. No obstante, al disminuir el crecimiento de raíz (asociado con la disminución de temperatura en otoño-invierno) aumentó el desarrollo vegetativo, y los crecimientos vegetativo y de raíz no se traslaparon, como fue documentado por Arpaia et al. (1995) y Mickelbart, Robinson, Witney, y Arpaia (2012).

En el modelo de clima semicálido, basado en la localidad de Temascaltepec (Figura 7c), el crecimiento de raíz incrementó durante la primavera (época de bajo desarrollo vegetativo), pero en verano e invierno el crecimiento fue vigoroso, semejante a Ixtapan del Oro, y se relacionó con alternancia productiva al siguiente año (Cuadro 3). La alternancia priorizó el desarrollo vegetativo (brotes silépticos) e interrumpió el carácter rítmico típico de 'Hass' al no generar inflorescencias (Thorp et al., 1994; Rocha-Arroyo et al., 2011; Chanderbali et al., 2013).

El crecimiento vegetativo vigoroso en las localidades semicálidas limitó el cuajado y el tamaño de fruto (Figura 7b). Por ello, resulta recomendable su control mediante reguladores del crecimiento y manejo de la fertilidad de los suelos cambisol-luvisol, distintivos por su baja retención de humedad y por ser arcillosos y compactos. Asimismo, se observó que en las regiones semicálidas, la precipitación se relacionó con el desarrollo vegetativo excesivo durante el verano, ya que

considering that the increase in the avocado cultivated area in the state of Mexico, in a five-year period, has been greater than 100 %. Similarly, the differences in climatic and soil environments constitute the basis for subsequent studies to predict the behavior of the crop.

#### End of English version

#### References / Referencias

- Alcaraz, M. L., Thorp, T. G., & Hormaza, J. I. (2013). Phenological growth stages of avocado (*Persea americana*) according to the BBCH scale. *Scientia Horticulturae*, 164, 434-439. doi: 10.1016/j.scienta.2013.09.051
- Álvarez-Bravo, A., Salazar-García, S., Ruiz-Corral, J. A., & Medina-García, G. (2017). Escenarios de cómo el cambio climático modificará las zonas productoras de aguacate 'Hass' en Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 19, 4035-4048. doi: 10.29312/remexca.v0i19.671
- Arpaia, M. L., Witney, G. W., Robinson, P. W., & Mickelbart, M. V. (1995). 'Hass' avocado phenology in California: Preliminary results. *Subtropical Fruit News*, 3(1), 1-2. Retrieved from [http://www.academia.edu/23145998/Hass\\_Avocado\\_Phenology\\_in\\_California\\_Preliminary\\_Results](http://www.academia.edu/23145998/Hass_Avocado_Phenology_in_California_Preliminary_Results)
- Bernal-Estrada, J., Vásquez-Gallo, L., & Cartagena-Valenzuela, J. (2017). Fenología del aguacate cv. Hass plantado en diversos ambientes del departamento de Antioquía, Colombia. In: Salazar-García, S., & Barrientos-Priego, A. F. (Eds.), *Memorias del V Congreso Latinoamericano del Aguacate* (pp. 292-301). Jalisco, México: Asociación de Productores Exportadores de Aguacate de Jalisco, A.C. Retrieved from [https://issuu.com/horticulturaposcosecha/docs/memorias\\_vcla\\_2017?e=8490508/54350](https://issuu.com/horticulturaposcosecha/docs/memorias_vcla_2017?e=8490508/54350)
- Chaikiattiyos, S., Menzel, C. M., & Rasmussen, T. S. (1994). Floral induction in tropical fruit trees: Effects of temperature and water supply. *Journal of Horticultural Science*, 69(3), 397-415. doi: 10.1080/14620316.1994.11516469
- Chanderbali, A. S., Soltis, D. E., Soltis, P. S., & Wolstenholme, B. N. (2013). Taxonomy and botany. In: Schaffer, B., Wolstenholme, B. N., & Whiley, A. W. (Eds.), *The avocado, botany, production and uses* (pp. 31-49). Wallingford, UK.: CAB International.
- Davenport, T. L. (1982). Avocado growth and development. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*, 95, 92-96. Retrieved from [http://www.avocadosource.com/Journals/FSHSP/FSHSP\\_TOC.htm](http://www.avocadosource.com/Journals/FSHSP/FSHSP_TOC.htm)
- Ferreira, R., Maldonado, P., Celedón, J., Gil, P. M., Torres, A., & Selles, G. (2008). Soil air content effects on the water status of avocado trees. *Acta Horticulturae*, 792, 291-296. doi: 10.17660/ActaHortic.2008.792.33
- García, E., & Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (1998a). *Climas: Clasificación de Köppen, modificado por García*. Escala 1:1 000 000. México: CONABIO. Retrieved from [http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/clima1mgw.xml?\\_xsl=/db/metadata/xsl/fgdc\\_html.xsl&\\_indent=no](http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/clima1mgw.xml?_xsl=/db/metadata/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no)

ésta fue de 1,300 a 1,400 mm, y la del clima templado fue de 1,242 mm (Cuadro 1).

La temperatura, la humedad ambiental y el tipo de suelo explican las diferencias en el desarrollo del aguacate 'Hass' en los diferentes ambientes del Estado de México, ya que los suelos cambisol y luvisol del clima semicálido limitan el desarrollo de la raíz, ya sea en condiciones secas o de temporal, al predisponer el anegamiento, las enfermedades y la asfixia radical. Sin embargo, la temperatura y la humedad en las localidades semicálidas favorecieron el crecimiento vegetativo y de raíz, al presentar valores de 21.7 a 27.8 °C en el aire, de 10 a 13.7 °C en el suelo y humedad anual de 63.2 a 65.6 %, mientras que en la zona templada dichos valores fueron de 13.7 °C en el aire, 7.1 °C en el suelo y humedad de 37.1 %.

#### Conclusión

Las diferencias en el desarrollo de las etapas fenológicas del aguacate 'Hass' en las zonas evaluadas en el Estado de México permiten establecer la importancia de considerar un manejo agronómico diferencial para cada región productora. Esto adquiere relevancia al considerar que el incremento de la superficie cultivada con este frutal en el estado, en un periodo de cinco años, ha sido superior al 100 %. Asimismo, las diferencias por ambiente climático y edáfico constituyen la base para estudios posteriores de predicción del comportamiento del cultivo.

#### Fin de la versión en español

- informacion/metadatos/gis/clima1mgw.xml?\_xsl=/db/metadata/xsl/fgdc\_html.xsl&\_indent=no
- García, E., & Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (1998b). *Isotermas medias anuales*. Escala 1:1 000 000. México: CONABIO. Retrieved from [http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/isotm1mgw.xml?\\_httpcache=yes&\\_xsl=/db/metadata/xsl/fgdc\\_html.xsl&\\_indent=no](http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/isotm1mgw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadata/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no)
- Hartmann, H. T., & Kester, D. E. (1995). *Propagación de plantas, principios y prácticas*. México: Compañía Editorial Continental.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2016). *Marco Geoestadístico*. Escala 1:1 000 000. Aguascalientes, México, D.F.: INEGI. Retrieved from [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=8&ved=2ahUKewj3iYlH06XhAhUCna0KHQitDqoQFjAHegQICRAC&url=http%3A%2F%2Fwww.diputados.gob.mx%2Fsedia%2Fbiblio%2Fusieg%2FAnuarios\\_2016%2FAguascalientes%2Fpreferencias\\_generales.pdf&usq=A0vVaw15CQ\\_Rp4AviRVlrnxE\\_ICT](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=8&ved=2ahUKewj3iYlH06XhAhUCna0KHQitDqoQFjAHegQICRAC&url=http%3A%2F%2Fwww.diputados.gob.mx%2Fsedia%2Fbiblio%2Fusieg%2FAnuarios_2016%2FAguascalientes%2Fpreferencias_generales.pdf&usq=A0vVaw15CQ_Rp4AviRVlrnxE_ICT)
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias – Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso

- de la Biodiversidad (INIFAP – CONABIO). (1995). *Edafología*. Escala 1:250 000-1:1 000 000. México: INIFAP-CONABIO. Retrieved from [http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadata/gis/eda251mgw.xml?\\_httpcache=yes&\\_xsl=/db/metadata/xsl/fgdc\\_html.xsl&\\_indent=no](http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadata/gis/eda251mgw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadata/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no)
- Lahav, E., & Gazit, S. (1994). World listing of avocado cultivars according to flowering type. *Fruits*, 49(4), 299-313. Retrieved from [https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&id=633823&biblioteca=vazio&busca=autoria:%22GAZIT,%20S.%22&qFacets=autoria:%22GAZIT,%20S.%22&s](https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&id=633823&biblioteca=vazio&busca=autoria:%22GAZIT,%20S.%22&qFacets=autoria:%22GAZIT,%20S.%22&sort=&paginacao=t&paginaAtual=1)
- Martínez, R., Martínez, J. J., Martínez-Valero, R., & Martínez, J. (2003). Contribución al estudio de la evolución del crecimiento del fruto del cv. 'Hass' (*Persea americana* Mill.) con respecto al tiempo en las condiciones ecológicas del área de Motril (Granada, España). *Actas V Congreso Mundial del Aguacate*, 1, 257-261. Retrieved from [http://avocadosource.com/WAC5/Papers/WAC5\\_p257.pdf](http://avocadosource.com/WAC5/Papers/WAC5_p257.pdf)
- Mickelbart, M. V., Robinson, P. W., Witney, G., & Arpaia, M. L. (2012). 'Hass' avocado tree growth on four rootstocks in California. II. Shoot and root growth. *Scientia Horticulturae*, 143, 205-210. doi: 10.1016/j.scienta.2012.06.021
- Osuna-García, J. A., Nolasco-González, Y., Herrera-González, J. A., Guzmán-Maldonado, S. H., & Álvarez-Bravo, A. (2017). Influencia del clima y rugosidad sobre la tolerancia a refrigeración del aguacate 'Hass'. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 19, 3911-3921. doi: 10.29312/remexca.v0i19.660
- Rocha-Arroyo, J. L., Salazar-García, S., & Bárcenas-Ortega, A. E. (2010). Determinación irreversible a la floración del aguacate 'Hass' en Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1(4), 469-478. Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-09342010000400002](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342010000400002)
- Rocha-Arroyo, J. L., Salazar-García, S., Bárcenas-Ortega, A. E., González-Durán, J. L., & Cossio-Vargas, L. E. (2011). Fenología del aguacate 'Hass' en Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(3), 1-14. Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-09342011000300001](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342011000300001)
- Rubí-Arriaga, M., Franco-Malvaiz, A. L., Rebollar-Rebollar, S., Bobadilla-Soto, E. E., Martínez-de la Cruz, I., & Siles-Hernández, Y. (2013). Situación actual del cultivo del aguacate (*Persea americana* Mill.) en el Estado de México, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 16, 93-101. Retrieved from <https://www.redalyc.org/html/939/93927469014/>
- Salazar-García, S., Cossio-Vargas, L. E., & González-Durán, J. L. (2009). Validación de modelos de predicción del desarrollo floral del aguacate 'Hass' desarrollados para Nayarit, en varios climas de Michoacán. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 15(3), 281-288. doi: 10.5154/r.rchsh.2009.15.039
- Salazar-García, S., Ibarra-Estrada, M. E., Álvarez-Bravo, A., & González-Valdivia, J. (2017). Determinación irreversible a la floración del aguacate 'Méndez' en el sur de Jalisco, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 19, 3923-3938. doi: 10.29312/remexca.v0i19.661
- Salazar-García, S., Ibarra-Estrada, M. E., Álvarez-Bravo, A., & González-Valdivia, J. (2018). Prediction models of the floral development of the 'Méndez' avocado. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(1), 151-161. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/324504786>
- Salazar-García, S., Ibarra-Estrada, M. E., & González-Valdivia, J. (2018). Fenología del aguacate 'Méndez' en el sur de Jalisco, México. *Agrociencia*, 52(7), 991-1003. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/329376929>
- Salazar-García, S., Lord, E. M., & Lovatt, C. J. (1998). Inflorescence and flower development of the 'Hass' avocado (*Persea americana* Mill.) during "On" and "Off" crop years. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 123(4), 537-544. Retrieved from <http://journal.ashspublications.org/content/123/4/537.short>
- Salazar-García, S., Medina-Carrillo, R. E., & Álvarez-Bravo, A. (2016). Evaluación inicial de algunos aspectos de calidad del fruto de aguacate 'Hass' producido en tres regiones de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(2), 277-289. Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-09342016000200277](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342016000200277)
- Salisbury, F. B., & Ross C. W. (1994). *Fisiología vegetal*. México: Grupo Editorial Iberoamérica.
- Santos-García, A. M. (2013). *Ubicación de áreas potenciales para el cultivo de aguacate (Persea americana Mill.) cv. 'Hass' en el Estado de México*. Edo. de México, México: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Schroeder, C. A. (1951). Flower bud development in the avocado. *California Avocado Society Yearbook*, 36, 159-163. Retrieved from [http://www.avocadosource.com/CAS\\_Yearbooks/CAS\\_36\\_1951/CAS\\_1951\\_TOC.htm](http://www.avocadosource.com/CAS_Yearbooks/CAS_36_1951/CAS_1951_TOC.htm)
- Scora, R. W., Wolstenholme, B. N., & Lavi, U. (2002). Taxonomy and botany. In: Whitley, A. W., Schaffer, B., & Wolstenholme, B. N. (Eds.), *The avocado, botany, production and uses* (pp. 15-37). Wallingford, UK: CABI International.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera – Secretaría de Agricultura Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SIAP – SAGARPA). (2020). *Avance de siembras y cosechas 2018*. Retrieved from <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Tapia-Vargas, L. M., Vidales-Fernández, I., & Larios-Guzmán, A. (2015). Manejo del riego y fertirriego en aguacate. In: Téliz, D., & Mora, A. (Eds.), *El aguacate y su manejo integrado* (pp. 108-121). Texcoco, México: Biblioteca Básica de Agricultura.
- Thorp, T. G., Aspinall, D., & Sedgley, M. (1994). Preformation of node number in vegetative and reproductive proleptic shoot modules of *Persea* (Lauraceae). *Annals of Botany*, 73(1), 13-22. doi: 10.1006/anbo.1994.1002
- Whitley, A. W., Saranah, J. B., Cull, B. W., & Pegg, K. G. (1988). Manage avocado tree growth cycles for productivity gains. *Queensland Agricultural Journal*, 114, 29-36.
- Whitley, A. W., Saranah, J. B., & Wolstenholme, B. N. (1995). Phenological modelling in avocado – an aid in research

- planning. *Proceedings of the World Avocado Congress*, 3, 71-75. Retrieved from [http://www.avocadosource.com/WAC3/WAC3\\_TOC.htm](http://www.avocadosource.com/WAC3/WAC3_TOC.htm)
- Whiley, A. W., & Wolstenholme, B. N. (1990). Carbohydrate management in avocado trees for increased production. *South African Avocado Growers' Association Yearbook*, 13, 25-27. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/242583010\\_Carbohydrate\\_management\\_in\\_avocado\\_trees\\_for\\_increased\\_production](https://www.researchgate.net/publication/242583010_Carbohydrate_management_in_avocado_trees_for_increased_production)
- Whiley, A. W., Wolstenholme, B. N., & Faber, B. A. (2013). Crop management. In: Schaffer, B., Wolstenholme, B. N., & Whiley, A. W. (Eds.), *The avocado, botany, production and uses* (pp. 342-378). Wallingford, UK.: CAB International.
- Wolstenholme, B. N. (1981). Root, shoot or fruit. *South African Avocado Growers' Association Yearbook*, 4, 27-29. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/237281623\\_Root\\_shoot\\_or\\_fruit](https://www.researchgate.net/publication/237281623_Root_shoot_or_fruit)
- Wolstenholme, B. N. (2013). Ecology: Climate and soils. In: Schaffer, B., Wolstenholme, B. N., & Whiley, A. W. (Eds.), *The avocado, botany, production and uses* (pp. 31-49). Wallingford, UK.: CAB International.
- Wolstenholme, B. N., & Whiley, A. W. (1999). Ecophysiology of the avocado (*Persea americana* Mill.) tree as a basis for pre-harvest management. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 5, 77-88. doi: 10.5154/r.rchsh.1999.06.043