

Validación de un modelo de predicción del desarrollo floral del aguacate 'Hass' en Michoacán, México

A. Álvarez-Bravo, S. Salazar-García

Campo Experimental Santiago Ixcuintla. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Santiago Ixcuintla, Nayarit, México. Correos-e: alvarez.arturo@inifap.gob.mx; samuelsalazar@inifapmail.com

RESUMEN

El desarrollo floral del aguacate es iniciado por cambios en las condiciones ambientales y la temperatura es el principal factor involucrado. En una investigación previa se obtuvo un modelo de predicción del desarrollo floral (MPDF) para brotes originados por el flujo vegetativo de invierno (emergido en la floración principal) del aguacate 'Hass' cultivado en diversos climas de Michoacán. Para su obtención, se usaron temperaturas registradas con instrumentos operados a baterías en cada huerto experimental. Se desconoce la precisión del MPDF una vez que sea alimentado, vía internet, con datos de la Red de Estaciones Meteorológicas Automatizadas (REMA) que la Asociación de Productores y Empacadores Exportadores de Aguacate de México tiene instalada en Michoacán. El objetivo de esta investigación fue validar el MPDF alimentado por la REMA en los cuatro principales climas donde está establecido 'Hass'. Se utilizó la REMA para suministrar datos vía internet al modelo de predicción y generar una base de datos de simulaciones. Durante el ciclo 2013-2014 se hicieron muestreos mensuales de yemas apicales e inflorescencias de 10 árboles en cada uno de 12 huertos distribuidos en los climas Semicálido subhúmedo seco (A)C(w1), Semicálido subhúmedo (A)C(w2), Templado subhúmedo C(w2) y Templado húmedo C(m). La validación mostró una excelente precisión del MPDF para predecir cualquier estado del desarrollo floral (desde estado vegetativo hasta anthesis) en brotes de invierno de 'Hass' en más de 100 mil hectáreas en Michoacán. El modelo que ajustó mejor fue el promedio de los cuatro tipos de clima ($R^2 = 0.97$).

Palabras clave: *Persea americana* Mill., Fenología, Fisiología reproductiva.

INTRODUCCIÓN

En Michoacán el aguacate 'Hass' suele producir hasta tres flujos vegetativos, el de invierno, que inicia en Noviembre-Febrero, el de primavera (Febrero-Junio) y el de verano (Junio-Septiembre); el flujo de invierno el más importante para la floración y producción de fruto (Salazar-García et al., 2005; Rocha-Arroyo et al., 2011). Los modelos de predicción que simulan el crecimiento y desarrollo de los cultivos son herramientas importantes para la investigación agrícola moderna ya que permiten la representación sencilla y sintética de los procesos fisiológicos utilizando ecuaciones matemáticas (López Cruz et al., 2005). Estas ecuaciones fueron empleadas para modelar el proceso de desarrollo floral del cv. Hass en el clima Semicálido del estado de Nayarit y fue asociado a la acumulación de días con temperaturas mínimas $\leq 21^\circ\text{C}$ en brotes el flujo vegetativo de invierno (Salazar-García et al., 2007). Posteriormente, este modelo de predicción fue probado en los cuatro climas predominantes en la franja aguacatera de Michoacán (Semicálido subhúmedo seco, Semicálido subhúmedo, Templado subhúmedo y Templado húmedo), encontrando que el modelo probado no fue extrapolable a los climas evaluados (Salazar-García et al., 2009). En trabajos recientes se usaron temperaturas $\leq 16^\circ\text{C}$ para desarrollar un modelo de predicción del desarrollo floral para brotes originados por el flujo vegetativo de invierno de 'Hass' en Michoacán (Salazar-García, comunicación personal). Las temperaturas empleadas para el desarrollo del modelo de predicción mencionado fueron obtenidas de registradores automatizados operados a baterías instalados en varios huertos comerciales distribuidos por la franja aguacatera de Michoacán. Sin embargo, se desconoce la funcionalidad de este modelo de predicción del desarrollo floral empleando datos meteorológicos en tiempo real procedentes de estaciones climáticas con un área de influencia de más de 15 km de radio. El objetivo de esta investigación fue validar el modelo de predicción DFA $\leq 16^\circ\text{C}$ cuando es alimentado con datos de una red de estaciones automatizada para pronosticar el desarrollo floral del aguacate 'Hass' en los cuatro principales tipos de clima en Michoacán.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal

La investigación fue realizada durante 2013-2014 en doce huertos comerciales adultos de aguacate 'Hass'; tres huertos por cada uno de cuatro principales tipos de clima de la zona productora de aguacate en Michoacán (Cuadro 1). Los árboles estaban injertados sobre portainjertos regionales originados por semilla de la raza mexicana y recibieron el manejo estándar de cada productor cooperante. En abril 2013 en cada huerto fueron marcados 10 árboles de tamaño similar, sin entrecruzamiento de sus copas y con abundante brotación vegetativa del flujo de invierno; a su vez, en cada árbol fueron marcados 30 brotes al término de su crecimiento.

Desarrollo floral

En cada uno de los árboles seleccionados se colectó una yema apical, obteniéndose 10 yemas por huerto y fecha de muestreo. Las yemas fueron depositadas en un frasco con solución FAA (formaldehído: ácido acético: etanol, 5:5:90, v:v:v) e introducidas en una bomba de vacío (Barnant Company, modelo 400-3910) a una presión de 30 psi durante 4-6 h. Posteriormente, el estado de desarrollo floral de cada yema fue evaluado en un microscopio estereoscópico (ZEISS, Modelo Stemi 2000-C). Los muestreos de yemas iniciaron en el Estado-1 (yema cerrada y puntiaguda localizada dentro de las dos últimas hojas sin expandir del brote) de la escala visual de Salazar-García et al. (1998). Los muestreos posteriores fueron realizados cada mes hasta que se alcanzó el E-8 (alargamiento de los ejes secundarios, los ejes terciarios todavía estaban cubiertos por sus brácteas, con flores pequeñas sin abrir), conocido como estado coliflor. A partir del E-9 el estado de desarrollo floral fue evaluado semanalmente directamente en los huertos con la escala visual mencionada hasta que el desarrollo floral llegó a anthesis (E-11).

Meteorología

Se utilizaron datos meteorológicos de las estaciones más cercanas a los huertos seleccionados para obtener la temperatura mínima diaria y con ello calcular los días frío acumulados (DFA). Como DFA se consideró la cantidad de días con presencia de temperaturas mínimas ≤ 16 °C. La información fue proporcionada por la Asociación de Productores y Empacadores Exportadores de Aguacate de México A. C., que en la zona aguacatera de Michoacán tiene instalada una red de 30 estaciones meteorológicas automatizadas marca Adcon Telemetry que registra lecturas cada 15 min (Figura 1).

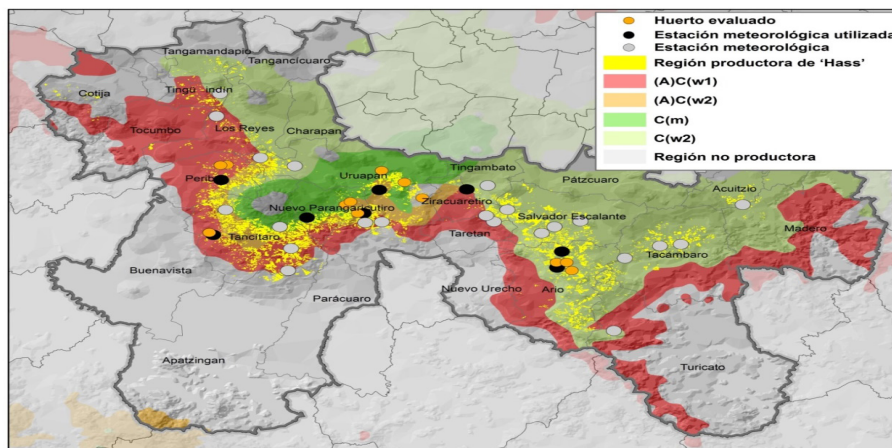


Figura 1. Huertos evaluados, estaciones meteorológicas y tipos de clima.

Conjunto de datos

Los registros de los muestreos se organizaron cronológicamente, generando una base de datos que incluyó el estado de desarrollo floral en campo (según la escala visual), los DFA ≤ 16 °C desde que los brotes presentaban la yema cerrada y puntiaguda localizada dentro de las dos últimas hojas sin expandir (E-19) hasta antesis (E-11), así como el valor predicho por el modelo de predicción DFA ≤ 16 °C en proceso de validación.

Tabla 1. Características de los huertos empleados en la investigación.

Tipo de clima ^{zy}	Huerto	Altitud (msnm)	Coordenadas	
			Latitud N	Longitud O
(A)C(w1) Semicálido subhúmedo (seco): Temperatura media anual >18 °C, temperatura del mes más frío <18 °C, temperatura del mes más caliente >22 °C. Precipitación del mes más seco <40 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y lluvia invernal del 5% a 10.2% del anual.				
	Agua fría	1608	19° 32' 24.9"	102° 24' 32.5"
	Jahuiques	1560	19° 32' 18.9"	102° 25' 21.3"
	El Salto 2	1552	19° 19' 51.3"	102° 26' 45.2"
(A)C(w2) Semicálido subhúmedo (húmedo): Temperatura media anual >18 °C, temperatura del mes más frío <18 °C, temperatura del mes más caliente >22 °C. Precipitación del mes más seco <40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor a 55 y lluvia invernal del 5% a 10.2% del anual.				
	El Coyote	1815	19° 23' 29.9"	102°07' 48.1"
	Lomitas 3	2038	19° 25' 03.2"	102° 09' 22.3"
	Sota 5	1979	19° 25' 36.7"	102° 08' 44.2"
C(w2) Templado subhúmedo: Temperatura media anual entre 12 °C y 18 °C, temperatura del mes más frío entre -3 °C y 18 °C y temperatura del mes más caliente <22 °C. Precipitación en el mes más seco <40 mm; lluvias de verano con índice P/T >55 y lluvia invernal del 5 a 10.2% del anual.				
	Potrero 6	2074	19° 12' 53.5"	101° 40' 27.7"
	Puerto 2	2110	19° 14' 23.6"	101° 42' 25.8"
	El Moral	2237	19° 14' 22.9"	101° 41' 07.8"
C(m) Templado, húmedo: Temperatura media anual entre 12 °C y 18 °C, temperatura del mes más frío entre -3 °C y 18 °C y temperatura del mes más caliente <22 °C. Precipitación en el mes más seco <40 mm; lluvias de verano y lluvia invernal del 5% a 10.2% del anual.				
	Mesa Grande	1831	19° 26' 19.5"	101° 59' 33.5"
	La Tregua	2175	19° 31' 22.0"	102° 04' 45.5"
	La Joya 16	2008	19° 29' 12.4"	102° 01' 49.6"

^zGarcía (1981)

^yINEGI (2000)

Validación del modelo de desarrollo floral DFA ≤ 16 °C con datos en campo

Mediante el paquete estadístico Minitab (Minitab Inc., 2013), se analizó la capacidad de predicción del modelo de desarrollo floral a través de regresión lineal. Los datos observados fueron los resultados de las evaluaciones visuales de las yemas apicales colectadas y como datos predichos se utilizaron las predicciones del modelo DFA ≤ 16 °C. Se utilizaron seis conjuntos de datos para la validación del modelo de predicción (uno por cada tipo de clima, el promedio de los cuatro climas y un conjunto que comprendió los datos de los 12 huertos). Para la validación del modelo DFA ≤ 16 °C se utilizaron cuatro criterios 1) Que el valor de B0 se aproximara a cero, 2) Que el valor de la pendiente (B1) fuera cercana a uno, 3) El mayor valor de R2, y 4) El menor valor en los residuos estandarizados (RE) (Draper y Smith, 1981; Neter et al., 1985; Martínez-Rodríguez, 2005; Badii et al., 2012; Baeza-Serrato & Vázquez-López, 2014).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN**Días frío acumulados según el tipo de clima**

Los DFA en los climas Semicálido subhúmedo (A)C(w1) y (A)C(w2) fueron muy similares ya que la diferencia entre ellos fue de sólo 2 DFA. En el caso de los tipos de clima Templado subhúmedo y Templado húmedo la diferencia fue de 6 DFA respectivamente (Cuadro 2).

Tabla 2. DFA ≤ 16 °C durante el desarrollo floral según el tipo de clima

Fecha de muestreo	(A)C(w1)		Fecha de muestreo	(A)C(w2)	
	Observado	DFA ≤ 16 °C		Observado	DFA ≤ 16 °C
08/04/2013	1.11	83*	09/04/2013	1.17	84*
08/05/2013	2.33	30	09/05/2013	3.58	30
07/06/2013	3.11	27	08/06/2013	3.78	30
07/07/2013	3.80	29	08/07/2013	4.19	30
06/08/2013	4.59	30	07/08/2013	5.60	30
05/09/2013	4.80	30	06/09/2013	6.52	30
05/10/2013	5.54	30	06/10/2013	6.98	30
04/11/2013	6.46	30	05/11/2013	7.58	30
21/11/2013	7.20	17	15/11/2013	7.64	10
28/11/2013	7.79	7	22/11/2013	8.65	7
05/12/2013	8.73	7	29/11/2013	9.23	7
12/12/2013	10.02	7	06/12/2013	9.86	7
19/12/2013	10.83	7	13/12/2013	10.28	7
26/12/2013	10.98	7	20/12/2013	10.78	7
02/01/2014	11.00	7	27/12/2013	11.00	7
Total:		348	Total:		346

Fecha de muestreo	C(w2)		Fecha de muestreo	C(m)	
	Observado	DFA ≤16 °C		Observado	DFA ≤16 °C
10/03/2013	1.10	54*	11/04/2013	1.12	86*
25/03/2013	2.00	13	26/04/2013	2.76	15
24/04/2013	1.72	32	26/05/2013	3.48	30
24/05/2013	3.55	30	25/06/2013	4.08	30
23/06/2013	4.22	30	25/07/2013	4.26	30
23/07/2013	4.60	30	24/08/2013	6.30	30
22/08/2013	6.08	30	23/09/2013	6.71	30
21/09/2013	6.69	30	23/10/2013	6.98	30
21/10/2013	7.17	30	07/11/2013	7.61	15
20/11/2013	7.97	30	14/11/2013	7.66	7
27/11/2013	8.69	7	21/11/2013	8.30	7
04/12/2013	9.11	7	28/11/2013	8.80	7
11/12/2013	9.97	7	05/12/2013	9.88	7
18/12/2013	10.54	7	12/12/2013	10.62	7
25/12/2013	10.81	7	19/12/2013	10.90	7
01/01/2014	11.00	7	26/12/2013	11.00	7
Total:		351	Total:		345

* Los DFA iniciaron en rompimiento de yemas (16/01/2013).

Capacidad predictiva del modelo DFA ≤16 °C en varios tipos de clima

Para los cuatro tipos de clima estudiados individualmente el modelo de predicción mostró un aceptable desempeño predictivo (R2 >0.94). La evaluación de los parámetros de regresión mostró que el modelo DFA ≤16 °C presentó un mejor desempeño en los tipos de clima templado C(w2) y C(m) (en el caso de Michoacán asociado a altitudes ≥1800 m). El modelo DFA ≤16 °C presentó un mejor poder predictivo en el clima Semicálido subhúmedo [(A)C(w2), el más húmedo de los Semicálidos]. Lo anterior coincidió con Salazar-García et al. (2009) quienes encontraron que el modelo de predicción DFA ≤19°C (desarrollado en el estado de Nayarit) ajustó mejor en los climas templados de Michoacán. Esto puede ser explicado a que en el clima más cálido de la región de Michoacán [(A)C(w1)], con altitudes <1800 m, presentó los valores residuales más altos debido a que las temperaturas frescas (≤16 °C) no ocurrieron con suficiente regularidad para promover el desarrollo floral (Cuadro 3).

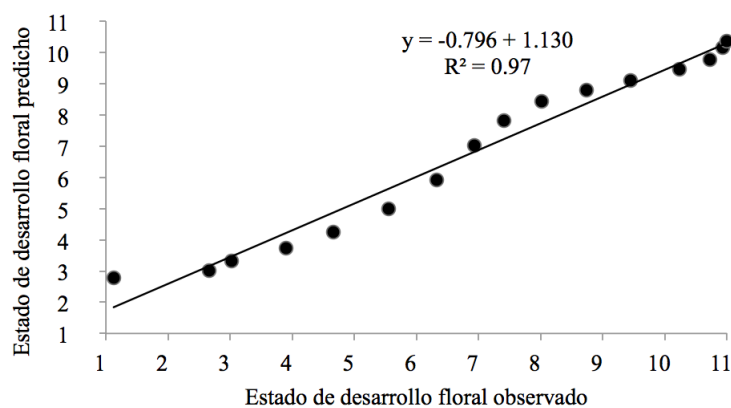


Figura 2. Ajuste de los valores del conjunto de datos promedio de los cuatro tipos de clima, entre el estado de desarrollo floral observado (evaluación en campo) y el estado de desarrollo floral predicho por el modelo DFA ≤16 °C.

Tabla 3. Parámetros de regresión de la validación del modelo de predicción del desarrollo floral DFA ≤ 16 °C en brotes del flujo vegetativo de invierno

Tipo de clima / conjunto de datos	Parámetros			p	Residuos estandarizados (RE)
	B ₀	B ₁	R ²		
(A)C(w1)	-1.310	1.180	0.95	0.000*	0.72171
(A)C(w2)	-0.446	1.100	0.95	0.000*	0.66291
C(w2)	-0.546	1.110	0.96	0.000*	0.68673
C(m)	-0.701	1.120	0.95	0.000*	0.71244
Promedio de los cuatro tipos de clima	-0.796	1.130	0.97	0.000*	0.55916
Conjunto de datos de los 12 huertos	0.982	0.836	0.94	0.000*	0.66840

*=P \leq 0.0001

Análisis de residuos

La distribución de los residuos del mejor conjunto de datos (promedio de los cuatro tipos de clima) en la gráfica de probabilidad normal reflejó un ajuste aceptable (Figura 3A). En tanto que la bondad del ajuste del modelo fue de ± 0.5 en promedio (Figura 3B). Con ambas herramientas se verificó la normalidad y homocedasticidad del error, evidenciando la alta calidad del modelo para predecir el estado del desarrollo floral en brotes del flujo vegetativo de invierno.

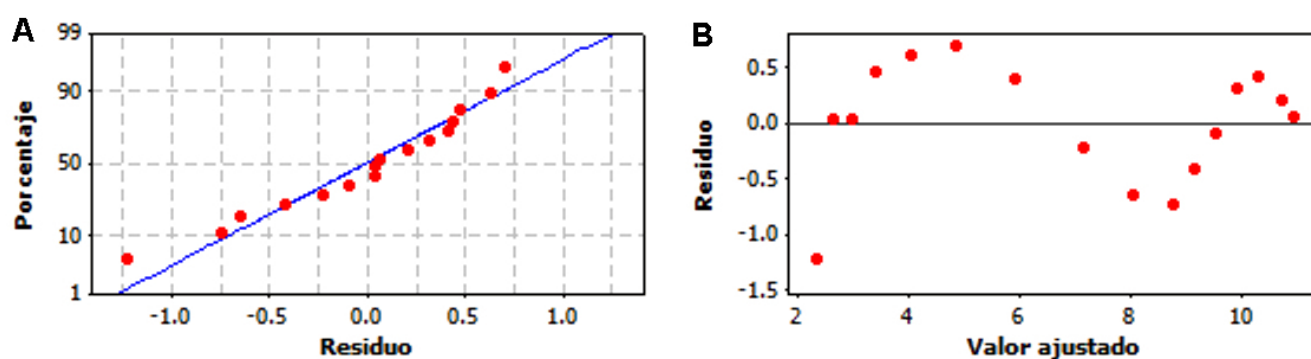


Figura 3. Análisis de residuos del mejor conjunto de datos (promedio de los cuatro tipos de clima) para predecir el estado del desarrollo floral en brotes del flujo vegetativo de invierno. A) Gráfico de probabilidad normal; B) Gráfico de bondad del ajuste

CONCLUSIONES

Los seis conjuntos de datos evaluados con el modelo de predicción DFA ≤ 16 °C mostraron un alto grado de predictibilidad del desarrollo floral en brotes del flujo vegetativo de invierno del aguacate 'Hass' en Michoacán. Los parámetros de regresión mostraron que los climas templados C(w2) y C(m)) fueron homogéneos (promedio R² = 0.95) en tanto que el desempeño del modelo DFA ≤ 16 °C empleando el promedio del conjunto de datos de los cuatro tipos de clima mostró los mejores parámetros de la evaluación predictiva (B₀=- 0.79, B₁=1.13, R² = 0.97 y RE=0.55916). El modelo de predicción DFA ≤ 16 °C previamente desarrollado en Michoacán y validado en el presente trabajo es una excelente herramienta de predicción del desarrollo floral para la región productora de aguacate 'Hass' de Michoacán.

AGRADECIMIENTOS

Se reconoce el financiamiento del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (Proy. SIGI-16464931989) y a la Asociación de Productores y Empacadores Exportadores de Aguacate de México A.C. por el acceso a los datos meteorológicos.

LITERATURA CITADA

- Badii, M H. Guillen, A. Cerna, E. Valenzuela, J. & Landeros, J. 2012. Análisis de regresión lineal simple para predicción. International Journal of Good Conscience. 7(3) 67-81.
- Baeza-Serrato, R. & Vázquez-López, J A. 2014. Transición de un modelo de regresión lineal múltiple predictivo, a un modelo de regresión no lineal simple explicativo con mejor nivel de predicción: Un enfoque de dinámica de sistemas. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia N. °71 pp. 59-71.

- Draper, N R. & Smith, H. 1981. Applied Regression Analysis. John Wiley & Sons, Inc. Second Edition. New York, USA. 709 p.
- García, E. 1981. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Tercera edición. Impreso en los Talleres de Offset Larios, S. A., Salvador Alvarado 105, México 18, D. F. 252 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 2000. Síntesis de Información Geográfica del Estado de Nayarit. México.
- López-Cruz, I L, Ramírez-Arias, A. & Rojano-Aguilar, A. 2005. Modelos matemáticos de hortalizas en invernadero: trascendiendo la contemplación de la dinámica de cultivos. México. Revista Chapingo. Serie Horticultura. 11(2):257-267.
- Martínez-Rodríguez, E. 2005. Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal. Anuario jurídico y económico escorialense. 315-332. ISSN: 1133-3577.
- MINITAB Inc. 2013. Minitab for Windows, Release 16.2.4.4. U.S.A.
- Neter, J, Wasserman, W, & Kutner, M H 1985, Applied Linear Statistical Models. Second Edition. Richard D. Irwin. Homewood, IL. USA. 1127 p.
- Rocha-Arroyo, J L, Salazar-García, S, Bárcenas-Ortega, A E, González-Durán, I J L, Cossio- Vargas, L E. 2011. Fenología del aguacate 'Hass' en Michoacán. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 2(3):303-316.
- Salazar-García, S, Zamora-Cuevas, L & Vega-López, R J. 2005. Update on the avocado industry of Michoacán, México. California Avocado Society Yearbook 87:31-44.
- 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. J. American Society for Horticultural Science 123:537-544.
- Salazar-García, S, Cossio-Vargas, L E, González-Durán, I J L & Lovatt, C J. 2007. Desarrollo floral del aguacate 'Hass' en clima semicálido. Parte II. Generación y validación de modelos de predicción del desarrollo floral. Revista Chapingo Serie Horticultura 13:93-101.
- Salazar-García, S, Cossio-Vargas, L E & González-Durán, I 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 3:281-288.



ACTAS • PROCEEDINGS

VIII CONGRESO MUNDIAL DE LA PALTA 2015

del 13 al 18 de Septiembre. Lima, Perú 2015

www.wacperu2015.com

