

Potencial productivo de *Vanilla planifolia* Jacks en el Totonacapan, México, mediante técnicas geográficas

Alberto Santillán-Fernández¹
Maryjose Trejo Cabrera¹
Araceli Martínez Sánchez¹
Luis Martínez Ángel¹
Nehemías Vásquez Bautista²
Salomón Luis Mejía^{1§}

¹Ingeniería Forestal-Instituto Tecnológico Superior de Venustiano Carranza. Av. Tecnológico s/n, Col. El Huasteco, Lázaro Cárdenas, Venustiano Carranza, Puebla, México. CP. 73049. (asantillanq@itsvc.edu.mx; marytreca@gmail.com; chelyforestal@itsvc.edu.mx; luismartinezangel99@gmail.com;). ²Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. Av. Tulum 238 y 240, lote 81 y 82, súper manzana 4 y manzana 12, Cancún, Quintana Roo, México. CP. 77500. (nvasquez@fira.gob.mx).

§Autor para correspondencia: forestal@itsvc.edu.mx.

Resumen

La región del Totonacapan, entre los límites del norte de Puebla y Veracruz, produce 80% de la vainilla en México, y es considerada el centro de origen de la especie *Vanilla planifolia* Jacks. Sin embargo, la superficie sembrada ha disminuido, lo que afecta la competitividad del sector. En el presente trabajo se realizó una caracterización socioeconómica de los productores de *Vanilla planifolia* Jacks, durante 2017 y 2018 y se determinó el potencial productivo para el cultivo en la región del Totonacapan, mediante el empleo de sistemas de información geográfica (SIG) basado en factores edafoclimáticos y fisiográficos. resultados muestran que la producción es una actividad económica secundaria, entre productores de más de 55 años y en situación de minifundio. El potencial productivo más alto se localiza al noroeste de la región del Totonacapan y está condicionado por el incremento en las precipitaciones del mes más seco (abril: <60 mm año⁻¹) y temperaturas no mayores a 30 °C en el trimestre más caluroso (junio-julio-agosto). Estas áreas están destinadas en su mayoría a la ganadería y agricultura de cultivos cíclicos más rentables, por lo que en la expansión del cultivo se deben considerar los aspectos socioeconómicos de los productores.

Palabras clave: distribución potencial, evaluación multicriterio, maxent, máxima entropía.

Recibido: marzo de 2019

Aceptado: junio de 2019

Introducción

El cultivo de vainilla (*Vanilla planifolia* Jacks) tuvo su origen en México particularmente en la zona norte de Veracruz, donde se asentó la cultura totonaca (Lubinsky *et al.*, 2008), que usó y domesticó por primera vez la vainilla (Sinha *et al.*, 2008). En la región del Totonacapan, el cultivo de la vainilla ha sido determinante para el desarrollo socioeconómico de los productores (Herrera-Cabrera *et al.*, 2012). La vainilla que ahí se produce es considerada la de mejor calidad y mayores compuestos aromáticos a nivel mundial, estas características son atribuibles al medio geográfico en el que se desarrolla, a los factores naturales y a las prácticas de manejo del cultivo (Lubinsky *et al.*, 2008; Flores *et al.*, 2017).

A pesar de ser centro de origen, como resultado de una reducción en la superficie sembrada, históricamente México pasó de ser el mayor centro de producción de vainilla a nivel internacional, a ocupar el quinto lugar, con 4.97% del volumen neto anual, por detrás de Indonesia (34.93%), Madagascar (31.81%), China (11.63%) y Papua Nueva Guinea (6.97%) (FAOSTAT, 2018). Particularmente en México, Veracruz es el principal productor con 70% del volumen de producción, siguen Puebla y Oaxaca, que en conjunto aportan 29% de la producción total y en menores cantidades, también se produce en San Luis Potosí, Hidalgo, Chiapas y Quintana Roo.

La zona productora más importante de México se ubica al norte de Puebla y en el centro-norte de Veracruz y es conocida como la región del Totonacapan con más de 80% de la producción nacional (SIAP, 2018), donde además se localiza el germoplasma de mayor importancia biológica y comercial (Herrera-Cabrera *et al.*, 2012). Sin embargo, el sector vainillero regional y en general el nacional, se enfrenta a una baja productividad, atribuida a la reducción de la superficie sembrada y el abandono del cultivo, como consecuencia de una frágil organización de los productores y problemas asociados con el manejo del cultivo. Los buenos rendimientos en campo que presenta México (0.41 t ha^{-1}) son insuficientes para revertir esta situación (Barrera-Rodríguez *et al.*, 2011; Jaramillo *et al.*, 2012; Barrera *et al.*, 2014; Santillan-Fernández *et al.*, 2018).

Ante este escenario el sistema de producción de vainilla en la región del Totonacapan parece estar destinado a desaparecer; sin embargo, de acuerdo con Lubinsky *et al.* (2008); Barrera-Rodríguez *et al.* (2011) la producción de vainilla en la región tiene una connotación ancestral que puede revalorizar el producto al ser centro de origen y tener el eslogan de producir la vainilla de mejor calidad en el mundo. Para ello INIFAP (2011); SAGARPA (2012); Santillán-Fernández *et al.* (2018) proponen que a la par de resolver los problemas socioeconómicos y de manejo de cultivo asociados a la producción, se deben identificar áreas con potencial productivo que consideren aspectos edafoclimáticos, para incrementar las superficies sembradas, que es el problema de competitividad a nivel internacional del sector vainillero nacional.

En este sentido las técnicas de sistemas de información geográfica (SIG) como la evaluación multicriterio (EMC) y los modelos de distribución de especies son herramientas útiles para caracterizar el potencial agroecológico del área destinada a un cultivo, más aún, si en la zona de estudio no hay antecedentes similares (Jiménez *et al.*, 2004; Kazuya *et al.*, 2006; Aguilar *et al.*, 2010). Dentro de los modelos de distribución de especies el algoritmo de Máxima Entropía (MaxEnt) tiene las mejores evaluaciones en comparación con otros programas que modelan la probabilidad de ocurrencia y adaptación de una especie a partir de variables edafoclimáticas (Hernández *et al.*, 2006; Phillips *et al.*, 2006; Elith *et al.*, 2011; Navarro-Cerrillo *et al.*, 2011).

Esta herramienta se ha aplicado con éxito en la determinación del potencial productivo de cultivos de papa (*Solanum tuberosum*) (Hijmans *et al.*, 2000), papaya (*Carica papaya*) (Scheldeman *et al.*, 2007) y vainilla (*Vanilla planifolia*) (Hernández-Ruíz *et al.*, 2016; Flores *et al.*, 2017). Phillips *et al.* (2006) y Elith *et al.* (2011) mencionan que muchos autores prefieren el algoritmo MaxEnt debido a la parsimonia y a su ajuste adecuado a la distribución de especies cuando se utiliza solo información de presencia.

Por su parte, la EMC asociada a los SIG es un sistema exacto cuando se combina información de carácter ambiental, social y económico, que basado en la ponderación y compensación de variables determinantes o factores de aptitud, genera cartografía que expresa el potencial productivo de una región respecto a los requerimientos específicos de un cultivo (Gómez y Barredo, 2005) y ha sido aplicada en la determinación de áreas aptas para el cultivo de *Agave durangensis* (Olivas *et al.*, 2007), de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) (Aguilar *et al.*, 2010) y cultivos alternativos como el amaranto (*Amaranthus* spp.) y nopal (*Opuntia ficus-indica*) (Ceballos-Silva y López-Blanco, 2010).

El cultivo de la vainilla relaciona factores técnicos, sociales, ecológicos y climáticos que condicionan su desarrollo, rendimiento, conservación y superficies sembradas, en virtud de ello se hace necesario conocer su estado actual de producción y caracterizar áreas potenciales con mayores rendimientos en campo; el conocimiento sobre estos factores que influyen en el manejo del cultivo son determinantes en la expansión del mismo (Flores *et al.*, 2017; Rocha *et al.*, 2018).

Bajo este contexto los objetivos del presente trabajo fueron a) caracterizar socioeconómicamente a los productores de vainilla en la región de Totonacapan; y b) determinar las zonas con mayor potencial productivo para establecer el cultivo de vainilla mediante modelos de MaxEnt y EMC. Esta información permitirá tomar decisiones confiables para el establecimiento de este cultivo en áreas con mayor potencial, que cuenten con las mejores condiciones edafoclimáticas para su desarrollo y así mejorar los rendimientos en campo, que ayuden a mejorar la competitividad internacional del sector.

Materiales y métodos

Área de estudio

La región del Totonacapan es la zona productora más importante de México y se ubica al norte de Puebla (integra 61 municipios) y en el centro-norte de Veracruz (20 municipios) (Figura 1). Por sus características fisiográficas y edafoclimáticas es una región óptima para el desarrollo del cultivo de la vainilla, ya que en ella se localizan climas subtropicales, cálidos y húmedos, en altitudes inferiores a los 600 msnm, con temperaturas que van de 20 °C a 32 °C y precipitación media anual que oscila entre 1 500 a 3 000 mm, además de tener terrenos con excelente drenaje, materia orgánica mayor a 3.5%, con pH de 5.5 a 7 y pendientes de 10% a 40% (INIFAP, 2011; SAGARPA, 2012).

La región del Totonacapan recoge las aguas de los ríos Panuco, Tuxpan, Cazonces y Tecolutla, lo que permite el desarrollo de la ganadería, silvicultura y agricultura, con cultivos de maíz (*Zea mays*), frijol (*Phaseolus vulgaris*), calabaza (*Cucurbita* spp.) y chile (*Capsicum annuum*) como

principales para autoconsumo. Además de especies comerciales como el café (*Coffea* spp.), caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), tabaco (*Nicotiana tabacum*), pimienta (*Pimenta dioica*), plátano (*Musa paradisiaca*), ajonjolí (*Sesamum indicum*), jengibre (*Zingiber officinale*), litchi (*Litchi chinensis*), cítricos (*Citrus sinensis*) y vainilla (SIAP, 2018).

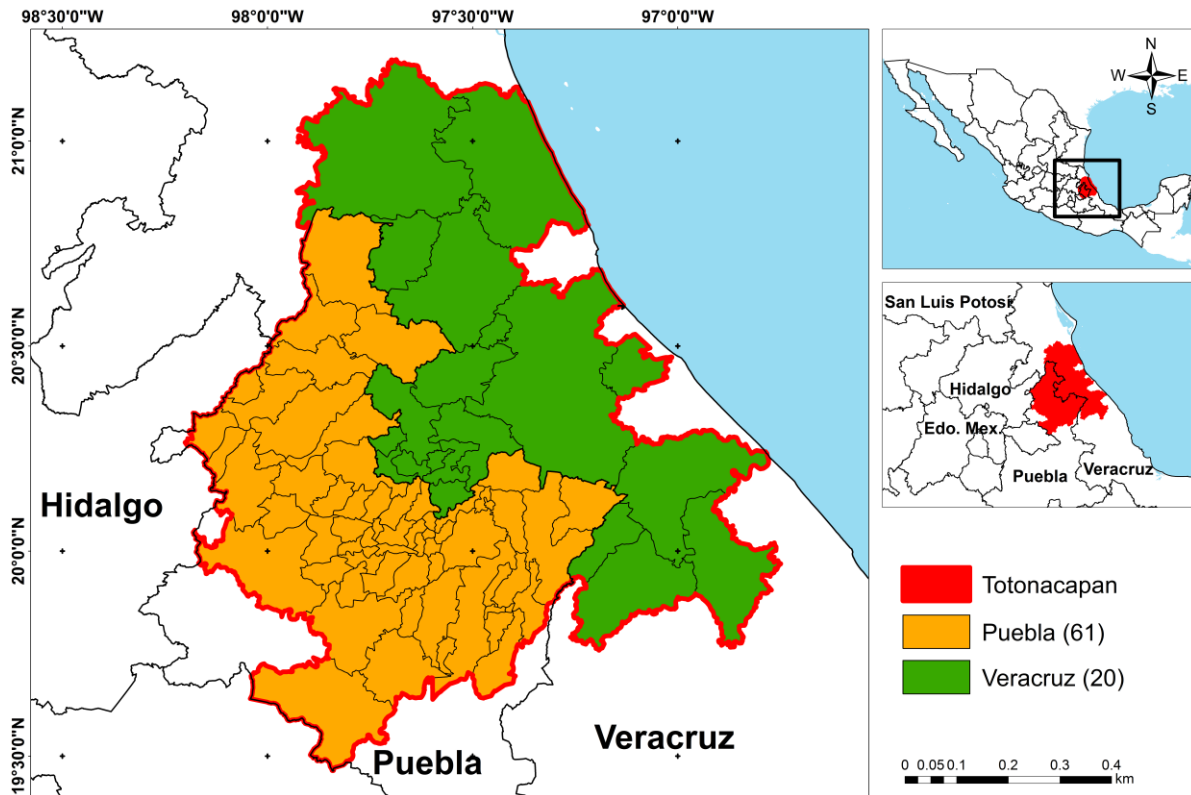


Figura 1. Ubicación espacial de la región del Totonacapan compuesta por municipios de Puebla y Veracruz.

Caracterización socioeconómica de la producción de vainilla en la región del Totonacapan

Para determinar los factores socioeconómicos que explican los cambios de superficie sembrada y rendimiento en campo en el Totonacapan, se realizó una encuesta entre noviembre de 2017 y febrero de 2018 a 175 productores de vainilla (20% del total, muestra estadísticamente suficiente conforme la teoría del muestreo) con base a su disponibilidad y referencias en la región. Adicionalmente se entrevistó a especialistas de la Universidad Autónoma Chapingo (2), Colegio de Postgraduados (1) y representantes del Comité Sistema Producto de Puebla (2). La guía de entrevista consideró aspectos fitosanitarios, climáticos, sociales y de mercado.

La encuesta incluyó preguntas sobre edad, escolaridad, superficie cultivada, tenencia de la tierra y porcentaje que representa la actividad en el ingreso familiar. Conforme la guía para el diseño de encuestas del CIMMYT (1993), se contemplaron aspectos sobre el conocimiento que el productor tiene acerca del riego, fertilización, control de plagas y enfermedades, así como de otros factores que podrían condicionar la expansión del cultivo y aumentar su productividad, tales como el clima, la fisiografía de la parcela, los costos de producción, gestión de subsidios y créditos, manejo y equipamiento parcelario, entre otros.

Potencial productivo de vainilla empleando el algoritmo de máxima entropía (MaxEnt)

Mediante recorridos *in situ* en 2016 y con ayuda de los directivos de la Asociación de Vainilleros del Estado de Puebla AC, se georreferenciaron por su accesibilidad 167 puntos con presencia de vainilla en campo de los municipios con producción; esta información se combinó con variables climáticas y edáficas de la zona, con una resolución de 30 s (1 km²), las primeras corresponden a las 19 variables bioclimáticas y evaporación anual, y las segundas son: calcio, conductividad eléctrica, carbono orgánico, potasio, magnesio, materia orgánica, sodio, pH y relación de adsorción de sodio, disponibles en la base de datos global de superficies climáticas WorldClim.

Los puntos con presencia de vainilla en campo (167), se introdujeron en el algoritmo de MaxEnt (MaxEnt, 2016) en formato delimitado por comas (.csv) y las variables climáticas y edáficas en formato ASCII (.asc), siguiendo la metodología de Hijmans *et al.* (2005) se determinó el potencial productivo de la región para el cultivo de vainilla. Los resultados se importaron a DivaGis v7.5 (DivaGis, 2016) y se convirtieron en formato grig (.grd) para visualizarse como imágenes. La probabilidad de ocurrencia de la especie se categorizó en áreas con potencial i) muy bajo [0-0.2]; ii) bajo (0.2-0.4]; iii) medio (0.4-0.6]; iv) alto (0.6-0.8]; y v) muy alto (0.8-1], conforme una escala de Likert de intervalos homogéneos.

Potencial productivo de vainilla empleando evaluación multicriterio

Del geoportal de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) se extrajeron los datos georreferenciados en formato vector escala 1:1 000 000 de altitud, precipitación, temperatura, pH y suelos y en formato raster con resolución de 5 min el modelo digital de elevación que sirvió para delimitar las pendientes de la región. Se utilizaron los rangos climáticos y edáficos donde se obtiene el mayor rendimiento en campo: altitud (menor a 600 msnm), precipitación (1 500 a 3 000 mm), temperatura (20 a 32 °C), tipo de suelos (con materia orgánica mayor al 3.5% y pH superior a 5.5) y pendiente (10 a 40%) (INIFAP, 2011; SAGARPA, 2012), para discriminar aquellas áreas que no cubren con estas necesidades específicas.

Para el procedimiento de ponderación y comparación de dichos factores de aptitud, se empleó el módulo Weighted Overlay de ArcMap® (ArcMap, 2010), la escala de evaluación (muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto) se determinó mediante recorridos en campo y de acuerdo con la opinión de especialistas en la producción de vainilla de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), Colegio de Postgraduados (CP) y representantes del Comité Sistema Producto de Puebla AC.

Discriminación del potencial productivo por uso de suelo y vegetación actual

Finalmente, para delimitar aquellas regiones aptas para la expansión del cultivo, se determinaron las áreas por potencial productivo (muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto) en función del uso de suelo y vegetación reportado por el INEGI (2016) escala 1:250 000 de la serie VI. Mediante recorridos en campo con directivos de la Asociación de Vainilleros del Estado de Puebla AC, se comprobó la información obtenida por los dos métodos (MaxEnt y EMC) que sirvió de base para la propuesta del establecimiento de nuevas áreas para el cultivo de *Vanilla planifolia* con mayor potencial productivo.

Resultados y discusión

Caracterización socioeconómica de los productores de vainilla en la región del Totonacapan

El Comité Sistema Producto de Puebla AC, indica que en la región del Totonacapan existen un total de 871 productores que cultivan 2 653 ha de vainilla, de los cuales 80% son hombres y 20% mujeres, pertenecen en su mayoría a los grupos étnicos otomí y totonaco. Del total de productores, 487 tienen este cultivo en terrenos de pequeña propiedad con una superficie sembrada de 1 486 ha, y 384 productores desarrollan la actividad en terrenos de propiedad ejidal con un total de 1 167 ha.

El 95% de los productores encuestados producen vainilla como una actividad secundaria, y tienen como principales fuentes de ingreso, la producción de maíz, frijol, café, pimienta y ganadería. En la mayoría de los casos la producción de vainilla se practica más por un factor cultural que por la rentabilidad del cultivo, ya que esta actividad es heredada de generación en generación y las vainas se emplean para la fabricación de artesanías que se ocupan en las festividades regionales.

Expertos de la UACH, CP y representantes del Comité Sistema Producto de Puebla AC, consideran que el minifundio (<0.5 ha en 79% de los productores), el bajo nivel de estudio (<8 años), la edad (55 a 62 años) y el hecho de que la producción de vainilla significa una actividad secundaria que complementa los ingresos familiares (Cuadro 1), impide el desarrollo del sector vainillero en la región, al limitar la superficie sembrada y en muchos casos reconvertirla por cultivos más rentables.

Cuadro 1. Caracterización socioeconómica de los productores encuestados de vainilla en la región del Totonacapan en función de la superficie sembrada y producción neta.

Superficie sembrada (ha)	Producción (t)	Productores		Promedio en años		IF (%)
		n (175)	(%)	Edad	Estudios	
<0.25	<0.1125	32	18	60	6	5
≥0.25 a 0.5	≥0.1125 a 0.2245	106	61	62	6	12
≥0.5 a 1	≥0.2245 a 0.449	23	13	57	7	27
≥1 a 6.5	≥0.449	14	8	55	8	43

IF= ingreso familiar que representa la actividad.

Alcón *et al.* (2008) señalan que productores de mayor edad son más renuentes a cambios en sus sistemas de producción, por considerar que siempre lo han hecho así y para ellos está bien hecho. Por su parte Soto *et al.* (2006) establecen que es más complicado que los productores con parcelas pequeñas fortalezcan sus sistemas de producción con nueva infraestructura, por representar en muchos casos una actividad secundaria en su ingreso familiar. Al respecto Álvarez y Crecente (2000) describen los beneficios de la concentración parcelaria (mediante sesión de derechos de uso) como medida de adaptación al minifundio y pulverización de cultivos.

Factores de manejo de cultivo y acceso al crédito

Aunado a los problemas de minifundio, el productor vainillero en la región del Totonacapan se enfrenta a un escaso desarrollo de paquetes tecnológicos para el manejo del cultivo, que merman la producción al no considerar programas de control de plagas, enfermedades, fertilización y riego.

El 98% de la superficie sembrada se maneja bajo un régimen hídrico de secano, solo 2% emplea riego. El 90% de los productores encuestados mencionaron que han percibido variaciones en los patrones de lluvia, por lo que están conscientes que quizá en un futuro se requiera regar para mantener la actividad. Sin embargo, no consideran a los factores climáticos, ni la fisiografía de las parcelas como aspectos limitantes para la producción.

El 95% de los productores encuestados consideran que la expansión del cultivo está limitada por aspectos fitosanitarios relacionados con el control de plagas y enfermedades como la chinche roja (*T. confusus*), gusano peludo (*P. aunifera*), pudrición de raíz y tallo (*F. oxysporum*) y antracnosis (*C. gloeosporioides*). Además del nulo apoyo para el acceso a créditos y subsidios que faciliten el equipamiento parcelario e incorporen paquetes tecnológicos (sobre todo de fertilización) que mejoren la productividad en la región. Prácticamente 100% de los productores autofinancian los costos de producción, que ante un mercado inestable en los precios provoca que muchos de ellos abandonen la actividad reconvirtiendo sus parcelas a cultivos más rentables.

INIFAP (2011); SAGARPA (2012), consideran que el adecuado manejo de los problemas de fertilización, plagas y enfermedades asociadas a la producción de vainilla en la región, mejoran sustancialmente la productividad del sector. En virtud de ello, a partir de 2011 implementaron paquetes tecnológicos que incluyeron estos aspectos, con buenos resultados en su inicio al incrementar los rendimientos en campo. Sin embargo, por falta de inversión la continuidad ha sido escasa. Para resolver este problema el Comité Sistema Producto de Puebla AC, gestiona actualmente ante fideicomisos instituidos con relación a la agricultura (FIRA) créditos al productor para fortalecer la infraestructura de producción.

El factor mercado: escasas de valor agregado

Los rendimientos promedios en campo de la región son de 0.449 t ha⁻¹ con costos de producción de \$60 000.00 año ha⁻¹ y con ganancias superiores a los \$88 000.00 año ha⁻¹, estas ganancias corresponden a la venta de la vaina en verde cuyo valor de mercado oscila entre los \$180 a \$200 kg. En la región 94% de los productores no le dan el servicio de beneficiado donde los costos de venta son superiores a \$3 000 kg. Este aspecto ha sido abordado por Jaramillo *et al.* (2012), Jaramillo *et al.* (2013) y Xochipa-Morante *et al.* (2016) quienes consideran que este factor es el que limita la expansión del cultivo, pues el productor considera poco rentable la actividad y prefiere canalizar sus insumos a cultivos económicamente más atractivos.

Barrera *et al.* (2014) mencionan que el mercado internacional de vainilla impone a los productores nuevas y estrictas normas de calidad e inocuidad que deben de acatar a fin de ser competitivos; por lo que el mercado internacional es un factor que incide directamente sobre la productividad de la vainilla. En virtud de ello el Comité Sistema Producto de Puebla AC, implementó una serie de talleres para fomentar entre los productores el servicio de beneficiado de la vainilla, con lo que se espera que mejoren sustancialmente sus ingresos y la competitividad del sector vainillero.

Potencial productivo de vainilla empleando el algoritmo de máxima entropía (MaxEnt)

Los resultados obtenidos por el algoritmo de MaxEnt son altamente significativos con un nivel de confiabilidad de 95% (p -value <0.0001) y un coeficiente de determinación (R^2) de 99.6%. De las 29 variables edafoclimáticas utilizadas en el modelo probabilístico de MaxEnt, cuatro

contribuyeron con 88.1% de la predicción de zonas con el mayor potencial productivo para el cultivo de vainilla. Las de mayor importancia fueron: incremento en las precipitaciones del mes más seco (abril: $< 60 \text{ mm año}^{-1}$) que aportó 56.3% de la predicción, seguida de contenido bajo de sodio en el suelo con el 13.1%, temperaturas no mayores a $30 \text{ }^\circ\text{C}$ en el trimestre más caluroso (junio-julio-agosto) con el 10.7% y alto contenido de carbono orgánico en el suelo con 8%.

Por tanto, de acuerdo al modelo, el factor que más incide en el desarrollo óptimo del cultivo de la vainilla es el incremento en la precipitación en el mes más seco. Este aspecto fue documentado por Barrera-Rodríguez *et al.* (2009); INIFAP (2011); SAGARPA (2012); Flores *et al.* (2017); Santillán-Fernández *et al.* (2018) quienes coinciden que la adopción de riegos en periodos de estiaje mejora sustancialmente los rendimientos en campo, incluso aun sin fertilizar. Por su parte, los productores encuestados mencionaron que han percibido variaciones en los patrones de lluvia por lo que no descartan el riego en un futuro.

En la Figura 2 se observa espacialmente el potencial productivo de la región clasificado en: i) muy bajo; ii) bajo; iii) medio; iv) alto; y v) muy alto. También se ubican las zonas productoras actuales y las superficies sembradas durante el 2017, que fueron propuestas para este cultivo ante la Asociación de Vainilleros del Estado de Puebla AC, y fueron seleccionadas a partir de los resultados obtenidos y de la disponibilidad en campo, al adoptar voluntariamente la vainilla.

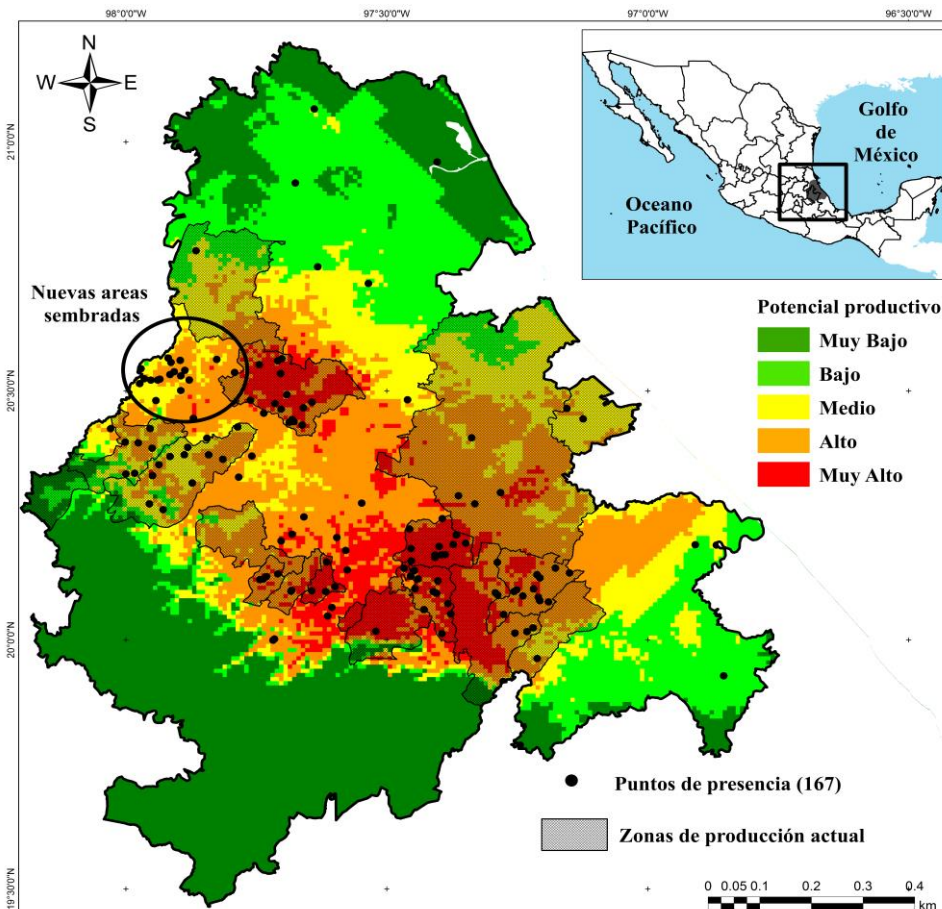


Figura 2. Representación espacial de la estimación del potencial productivo para la vainilla en la región del Totonacapan obtenida mediante el algoritmo de máxima entropía.

Para la EMC se construyó una escala de evaluación de cinco clases, con áreas de potencial i) muy bajo; ii) bajo; iii) medio; iv) alto; y v) muy alto (Cuadro 2). La EMC resultó ser una metodología más robusta, que considera áreas más extensas en comparación con MaxEnt.

Cuadro 2. Criterios de evaluación de variables climáticas y edáficas para el potencial productivo de vainilla en la región Totonacapan, a partir de recorridos en campo y opinión de expertos.

Variable	Niveles del potencial productivo de la vainilla				
	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Altitud (msnm)	>1 000	800-1 000	400-800	200-400	0-200
Precipitación anual (mm)	<800 ó >2 500	800-1 200	1 200-1 500	1 500-2 000	2 000-2 500
Temperatura anual (°C)	<18 ó > 26	18 - 20	20 - 22	22 - 24	24 - 26
pH	<4 ó >8	4 - 5.5	5.5	5.6 - 6.7	6.7 - 7.9
Suelo*	Suelos diferentes a Feozem y Cambisol	Suelos diferentes a Feozem y Cambisol	Distintos tipos de Feozem y Cambisol	Feozem háplico y Cambisol eútrico	Feozem háplico y Cambisol eútrico
Materia orgánica (%)	<1	<1	1 - 2	2 - 3.5	≥3.5
Pendiente (%)	>40	35-40	30-35	20-30	0-20

*= Sistema de clasificación FAO (1999).

En la Figura 3 se observan aquellas zonas en la región del Totonacapan que cumplen las condiciones agroclimáticas del cultivo, áreas específicas con aptitud media, alta y muy alta para el establecimiento de la vainilla, donde al mejorar el manejo del cultivo con aspectos como el control fitosanitario, riego y fertilización, se esperan obtener los mejores rendimientos en campo de la región. Los resultados fueron tomados como referencia por la Asociación de Vainilleros del Estado de Puebla AC, para gestionar la siembra de 100 ha con vainilla entre mayo y junio de 2017.

Al considerar factores edafoclimáticos (precipitación anual, temperatura anual, pH, tipo de suelo y materia orgánica) y fisiográficos (altitud y pendiente) en la EMC, se delimitó una mayor superficie con potencial productivo medio a muy alto con respecto a los resultados obtenidos con el algoritmo de MaxEnt, que no incluyó variables fisiográficas. Sin embargo, ambos métodos coinciden en que el mayor potencial productivo se localiza al noroeste de la región del Totonacapan, en las zonas límites de Puebla y Veracruz, que es donde se encuentran las áreas productoras actuales, con potencial productivo de media a muy alta.

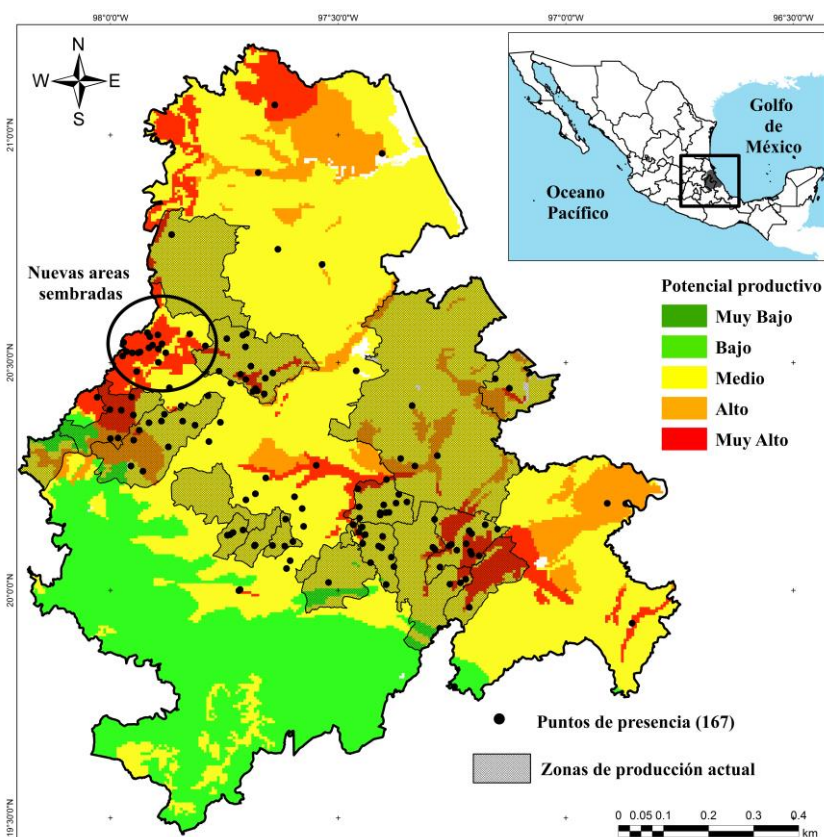


Figura 3. Representación espacial de la estimación del potencial productivo para la vainilla en la región del Totonacapan obtenida mediante evaluación multicriterio.

Discriminación del potencial productivo por uso de suelo y vegetación actual

Al emplear cartografía de uso de suelo y vegetación (INEGI, 2016), se logró identificar el uso actual del suelo de las áreas con potencial productivo para el cultivo de la vainilla obtenidas por los algoritmos de MaxEnt y EMC (Cuadro 3). Las coberturas donde se puede potencializar la expansión del cultivo se ubican en aquellas áreas donde no se pone en riesgo la continuidad de un ecosistema; por tanto, las zonas de agricultura y pastizal resultan las óptimas, siempre y cuando los factores socioeconómicos logren reconvertirlas.

Cuadro 3. Cobertura por uso de suelo y vegetación del potencial productivo de la vainilla en la región del Totonacapan

Uso de suelo y vegetación	Máxima entropía (%)					Evaluación multicriterio (%)					Total	
	MA	A	M	B	MB	MA	A	M	B	MB	(%)	ha
Selva	3	4	4	1	1	5	3	5	0	0	13	197 276
Bosque	0	5	5	1	30	0	1	10	10	20	41	622 178
Agricultura	1	2	3	3	5	1	2	5	3	3	14	212 451
Zona urbana	0	0	6	1	4	0	0	8	2	1	11	166 926

Uso de suelo y vegetación	Máxima entropía (%)					Evaluación multicriterio (%)					Total	
	MA	A	M	B	MB	MA	A	M	B	MB	(%)	ha
Pastizal y matorral	4	5	5	3	2	3	3	9	2	2	19	288 326
Otros*	0	0	0.5	0.5	1	0	1	1	0	0	2	30 350
Total (%)	8	16	23.5	9.5	43	9	10	38	17	26	100	1 517 507

*= incluye manglar, vegetación acuática y halófila. MA= muy alto; A= alto; M= medio; B= bajo; MB= muy bajo.

Los resultados obtenidos por MaxEnt y EMC indican que las zonas con mayor potencial productivo se ubican dentro de las áreas con pastizal que son destinadas a la ganadería, esta información fue validada mediante recorridos *in situ* con directivos de la Asociación de Vainilleros del Estado de Puebla AC y sirvió de base para que entre mayo y junio de 2017, se sembraran con vainilla 100 ha al noroeste de la región del Totonacapan, al considerar que en estas zonas con mayor potencial productivo (alta a muy alta) se incrementa la probabilidad de adaptación, desarrollo y crecimiento de la vainilla.

Ambas metodologías coinciden en que las áreas con mayor potencial productivo se localizan en las superficies agrícolas, pastizales y de selvas. Se propone el cultivo de vainilla en aquellas zonas cuyo uso actual se destina a la ganadería (pastizal) y a la agricultura de maíz, frijol, calabaza y chile principalmente. Barrera-Rodríguez *et al.* (2011); Jaramillo *et al.* (2012 y 2013) establecen que, para incrementar las superficies sembradas de vainilla en la región del Totonacapan, se debe mejorar la rentabilidad del cultivo ante otras actividades, dando un valor agregado al producto que se comercializa en verde mediante el proceso de beneficiado.

Conclusiones

La producción de vainilla en la región del Totonacapan se presenta como una actividad secundaria, entre productores de avanzada edad (>55 años), nivel de estudios bajo (<8 años) y en situación de minifundio (<0.5 ha). Aunado a estos factores, los problemas fitosanitarios, de fertilización, acceso al crédito y de mercado, también han contribuido a un descenso en la productividad de la vainilla en la región, marcado por la reducción de la superficie sembrada.

El potencial productivo más alto para el cultivo de la vainilla se encuentra al noroeste de la región del Totonacapan, en áreas destinadas en su mayoría a la ganadería y agricultura de cultivos cíclicos más rentables, entre los límites de Puebla y Veracruz. El potencial productivo está condicionado por el incremento en las precipitaciones del mes más seco (abril: <60 mm año⁻¹) y temperaturas no mayores a 30 °C en el trimestre más caluroso (junio-julio-agosto), por lo que el riego puede ayudar sustancialmente a mejorar los rendimientos en campo y por consecuencia la productividad en la región.

El potencial productivo para la siembra de nuevas áreas con vainilla en la región del Totonacapan, obtenido mediante técnicas geográficas, ayudó a tomar decisiones en relación con la expansión de este cultivo, hacia aquellas superficies con mayor probabilidad de adaptación para el desarrollo y crecimiento óptimo de la vainilla, con lo que se espera incrementar la productividad del sector

vainillero nacional y por ende su competitividad internacional. Ambos métodos no deben considerarse diferentes sino complementarios; sin embargo, se debe considerar la limitación de estas técnicas ante factores socioeconómicos, de mercado y de manejo de cultivo, en virtud de ello es necesario complementarlos con trabajo de campo.

Agradecimientos

Al C. Miguel Ángel García Cabrera, secretario técnico de la Asociación de Vainilleros de Puebla AC, por las facilidades brindadas para la colecta de información en campo. A los revisores anónimos del escrito, por sus comentarios, que ayudaron a enriquecer la investigación.

Literatura citada

- Aguilar, R. N.; Galindo, M. G.; Fortanelli, M. J. y Contreras, S. C. 2010. Evaluación multicriterio y aptitud agroclimática del cultivo de caña de azúcar en la región de Huasteca. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. 11(2):144-154.
- Alcón, F.; De Miguel, M. D. y Burton, M. 2008. Adopción de tecnología de distribución y control del agua en las comunidades de regantes de la región de Murcia. *Economía Agraria y Recursos Naturales*. 8(1):83-102.
- Álvarez, L. C. J. y Crecente, M. R. 2000. Una revisión de la concentración parcelaria en Europa. *Estudios Agrosociales y Pesqueros*. 187:221-274.
- ArcMap. 2010. Environmental Scientific Research Institute. Arc Map 10.0. Redlands, California, USA. <https://www.esri.com/es-es/home>.
- Barrera, R. A.; Santoyo-Cortés, V.; Baca, D. e Altamirano, C. J. 2014. Perspectives d'avenir et compétitivité des organisations de producteurs de vanille du Mexique. *Cahiers Agricultures*. 23(6):374-381.
- Barrera-Rodríguez, A. I.; Herrera-Cabrera, B. E.; Jaramillo-Villanueva, J. L.; Escobedo-Garrido, J. S. y Bustamante-González, Á. 2009. Caracterización de los sistemas de producción de vainilla (*Vanilla planifolia* A.) bajo naranjo y en malla sombra en el Totonacapan. *Trop. Sub. Agroecosys*. 10(2):199-212.
- Barrera-Rodríguez, A. I.; Jaramillo-Villanueva, J. L.; Escobedo-Garrido, J. S. y Herrera-Cabrera, B. E. 2011. Rentabilidad y competitividad de los sistemas de producción de vainilla (*Vanilla planifolia* J.) en la región del Totonacapan, México. *Agrociencia*. 45(5):625-638.
- Ceballos-Silva, A. P. y López-Blanco, J. 2010. Delimitación de áreas adecuadas para cultivos de alternativa: una evaluación multicriterio-sig. *Terra Latinoam*. 28(2):109-118.
- CIMMYT. 1993. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. La adopción de las tecnologías agrícolas: Guía para el diseño de encuestas. <http://libcatalog.cimmyt.org/download/cim/42408.pdf>.
- DivaGis. 2016. DIVA-GIS. Version 7.5. A geographic information system for the analysis of species distribution data. <http://www.diva-gis.org/download>.
- Elith, J.; Phillips, S.; Hastie, T.; Dudík, M.; Chee, Y. y Yates, C. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Div. Distrib*. 17(1):43-57.
- FAO. 1999. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Centro Internacional de Referencia e Información en Suelos y Sociedad Internacional de las Ciencias del Suelo (FAO-ISRIC y SICS). Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Reporte No. 84. Roma, Italia. 93 p.

- FAOSTAT. 2018. The Food and Agriculture Organization Corporate Statistical. Production. <http://faostat3.fao.org/download/Q/QC/S>.
- Flores, J. A.; Reyes, L. D.; Jiménez, G. D.; Romero, A. O.; Rivera, T. J. A.; Huerta, L. M. y Pérez, S. A. 2017. Diversidad de *Vanilla spp* (*Orchidaceae*) y sus perfiles bioclimáticos en México. *Rev. Biol. Trop.* 65(3):975-988.
- Gómez, M. y Barredo, J. I. 2005. Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. Ra-Ma. Madrid. 279 p.
- Hernández, P. A.; Graham, H. C.; Master, L. L. and Albert, L. D. 2006. The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods. *Ecography.* 29(5):773-785.
- Hernández-Ruíz, J.; Herrera-Cabrera, B. E.; Delgado-Alvarado, A.; Salazar-Rojas, V. M.; Bustamante-González, Á.; Campos-Contreras, J. E. y Ramírez-Juárez, J. 2016. Distribución potencial y características geográficas de poblaciones silvestres de *Vanilla planifolia* (*Orchidaceae*) en Oaxaca, México. *Rev. Biol. Trop.* 64(1):251-262.
- Herrera-Cabrera, B. E.; Salazar-Rojas, V. M.; Delgado-Alvarado, A.; Contreras, J.; Contreras, C. y Cervantes-Vargas, J. 2012. Use and conservation of *Vanilla planifolia* J. in the Totonacapan Region, México. *Eur. J. Environ. Sci.* 2(1):43-50.
- Hijmans, R. J.; Cameron, E. S.; Parra, L. J.; Jones, G. P. and Jarvis, A. 2005. Very high-resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Inter. J. Climatol.* 25(15):1965-1978.
- Hijmans, R. J.; Garrett, K. A.; Huaman, Z.; Zhang, D. P.; Schreuder, M. and Bonierbale, M. 2000. Assessing the geographic representativeness of genebank collections: the case of Bolivian wild potatoes. *Conservation Biol.* 14(6):1755-1765.
- INEGI. 2016. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI. http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/usv250s6gw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc.html.xsl&_indent=no.
- INIFAP. 2011. Instituto Nacional de Investigación Forestal, Agrícola y Pesquera. Paquete tecnológico vainilla (*Vainilla planifolia* Jackson) establecimiento y mantenimiento. www.inifap.gob.mx/Documents/inicio/paquetes/vainilla_establecimiento.pdf.
- Jaramillo, V. J. L.; Escobedo, G. J. D. y Barrera, R. A. 2012. Competitividad de sistemas de beneficiado de vainilla (*Vanilla Planifolia* J.) en la región del Totonacapan, México. *Panorama Socioeconómico.* 30(45):80-93.
- Jaramillo, V. J. L.; Garrido, J. S. E.; Rodríguez, A. B. y Cabrera, B. E. H. 2013. Eficiencia económica en el beneficiado de vainilla (*Vanilla planifolia* J.) en la región del Totonacapan, México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 4(3):477-483.
- Jiménez, C. A.; Vargas, T. V.; Salinas, C. W. E.; Aguirre, B. M. de J. y Rodríguez, C. D. 2004. Aptitud agroecológica para el cultivo de caña de azúcar en el sur de Tamaulipas, México. *Investigaciones Geográficas.* 53:58-74.
- Kazuya, N.; Gómez, M.; López, R.; Meneses, R. y Vargas, J. 2006. Comparación de modelos de distribución de especies para predecir la distribución potencial de vida silvestre en Bolivia. *Ecol. Bolivia.* 41(1):65-78.
- Lubinsky, P.; Bory, J. S.; Hernández, H. S.; Kim, C. and Gómez, P. G. 2008. Origins and dispersal of cultivated Vanilla (*Vanilla planifolia* Jacks. [*Orchidaceae*]). *Econ. Bot.* 62(2):127-138.
- MaxEnt. 2016. Maxent software for modeling species niches and distributions (Version 3.4.1). http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/.

- Navarro-Cerrillo, R. M.; Hernández-Bermejo, J. E. and Hernández-Clemente, R. 2011. Evaluating models to assess the distribution of *Buxus balearica* in southern Spain. *Appl. Vegetation Sci.* 14(2):256-267.
- Olivas, G. U.; Valdez, L. J.; Aldrete, A.; González, G. M. y Vera, C. G. 2007. Áreas con aptitud para establecer plantaciones de maguey cenizo: definición mediante análisis multicriterio y SIG. *Rev. Fitotec. Mex.* 30(4):411-419.
- Phillips, S.; Anderson, R. and Schapire, R. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecol. Modelling.* 190(3-4):231-259.
- Rocha, F. R. G.; Herrera, C. B. E.; Velasco, V. J.; Salazar, R. V. M.; Delgado, A. A. y Mendoza, C. M. C. 2018. Determinación preliminar de componentes de rendimiento para el cultivo de vainilla (*Vanilla planifolia* Jacks. ex Andrews) en la región Totonacapan, México. *Agroproductividad.* 11(3):9-14.
- SAGARPA. 2012. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Plan rector sistema producto vainilla. <http://dev.pue.itesm.mx/sagarpa/estatales/ept%20comite%20sistema%20producto%20vainilla%20puebla/plan%20rector%20que%20con%20tiene%20programa%20de%20trabajo%202012/pr-vainilla-puebla-%202012.pdf>.
- Salazar-Rojas, V. M.; Herrera-Cabrera, B. E.; Delgado-Alvarado, A.; Soto-Hernández, M.; Castillo-González, F. and Cobos-Peralta, M. 2012. Chemotypical variation in *Vanilla planifolia* Jack (*Orchidaceae*) from the Puebla-Veracruz Totonacapan region. *Gen. Res. Crop Evol.* 59(5):875-887.
- Santillán-Fernández, A.; Salas-Zúñiga, A. y Vásquez-Bautista, N. 2018. La producción de la vainilla (*Vainilla planifolia* Jacks. Ex Andrews) en México de 2003 a 2014. *Rev. Mex. Cienc. Fores.* 9(47):050-060.
- Scheldeman, X.; Willemen, L.; d'Eeckenbrugge, G. C.; Romeijn, P. E.; Restrepo, M. T.; Motoche, J. R.; Jiménez, D.; Lobo, M.; Medina, C. I.; Reyes, C.; Rodríguez, D.; Ocampo, J. A.; Damme, V. P. and Goetgebeur, P. 2007. Distribution, diversity and environmental adaptation of highland papayas (*Vasconcellea spp.*) in tropical and subtropical America. *Bio. Conserv.* 16(6):1867-1884.
- SIAP. 2018. Sistema de Información Agrícola y Pesquera. Producción Agrícola. <http://www.siap.gob.mx/>.
- Sinha, A. K.; Sharma, U. K. and Sharma, N. 2008. A comprehensive review on *Vanilla flavor*: extraction, isolation and quantification of vanillin and other constituents. *Inter. J. Food Sci. Nutr.* 59(4):299-326.
- Soto, J. L.; Hartwich, F.; Arispe, T.; Monge, M. y Ampuero, L. 2006. Innovación en el cultivo de Quinoa en Bolivia: efectos de la interacción social y de las capacidades de absorción de los pequeños productores. *Rev. Análisis.* 1(3):17-20.
- Xochipa-Morante, R. C.; Delgado-Alvarado, A.; Herrera-Cabrera, B. E.; Escobedo-Garrido, J. S. y Arévalo-Galarza, L. 2016. Influencia del proceso de beneficiado tradicional mexicano en los compuestos del aroma de *Vanilla planifolia* Jacks. ex Andrews. *Agroproductividad.* 9(1):55-62.