

Determinación de zonas agroclimáticas para la producción de mango (*Mangifera indica* L. "Manila") en Veracruz, México

Jorge Luis Martínez Fonseca*
Leonardo Tijerina Chávez*
Ramón Arteaga Ramírez**
Mario Alberto Vázquez Peña**
A. Enrique Becerril-Román***

Recibido: 7 de junio de 2006
Aceptado en versión final: 4 de agosto de 2006

Resumen. El mango (*Mangifera indica* L.) es un frutal de importancia económica en México, en el 2004 se reportaron 166 000 ha plantadas en más de once estados del país, en el estado de Veracruz 25 550 ha, donde el 85% es de la variedad "Manila". El objetivo de este trabajo fue determinar las regiones agroclimáticas para el cultivo de mango "Manila" en el estado de Veracruz, México, por medio del Análisis de Componentes Principales (ACP) con variables climatológicas (temperatura, precipitación, evaporación y radiación solar), además se elaboraron gráficas hidro-termales (relacionando: precipitación total y temperatura mínima mensual). Del ACP se derivaron dos vectores asociados con la temperatura mínima anual y precipitación total anual, que juntos explican el 83% de la variación climática total entre las localidades productoras de mango "Manila"; se definieron dos grupos de localidades con agroclimas diferentes, mismos que se confirmaron con las gráficas hidro-termales; con apoyo de información bibliográfica y de productividad, se definieron tres zonas de aptitud agroclimáticas para el cultivo de mango "Manila", con los siguientes intervalos de variación de la temperatura mínima anual: zona 1 (No Apta) menor de 13.5° C; zona 2 (Apta) de 13.5 a 17.5° C; zona 3 (Moderadamente Apta) de 17.5 a 23.0° C. Con un modelo empírico de temperatura mínima y un modelo de elevación digital, por medio de un sistema de información geográfica (SIG), se realizó la cartografía de las zonas geográficas con diferente grado de aptitud Agroclimática.

Palabras claves: Agroclima, mango, análisis de componentes principales (ACP), gráficas hidro-termales, temperatura mínima.

* Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados, Km. 36.5 Carretera México-Texcoco, 56230, Texcoco, Estado de México. E-mail: jlmartinezfonseca@yahoo.com.mx; tijerina@colpos.mx

** Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México. E-mail: arteagar@correo.chapingo.mx; mariovazquez@coahuila.com

*** Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Montecillo, Estado de México. E-mail: becerril@colpos.mx

Determination of agroclimatic zones for mango production (*Mangifera indica* L. "Manila") in Veracruz, Mexico

Abstract. Mango (*Mangifera indica* L.) is a fruit of great economic importance in México. In 2004, 166 000 ha of mango were reported in different regions of more than eleven states of the country and the state of Veracruz, 25 550 ha of mango were grown, 85% belonging to the "Manila" variety. The objective of the present study was to define agroclimatic regions for the cultivation of "Manila" mango in the State of Veracruz, México. The method used was the Components Principal Analysis (CPA) with climatological variables (temperature, precipitation, evaporation, solar radiation), along, as well as hydro-thermal graphs (relation: mean total monthly precipitation and minimum monthly temperature). Two vectors were derived from the analysis associate with the variables, minimum annual temperature and total annual precipitation, which join explain 83% of the total variation. They were defined two groups of towns with different agroclimate. With the hydro-thermal graphs and bibliographical information, and of productivity, they three agroclimatic regions were defined with different degrees of suitability with the following variation intervals of minimum annual temperature: zone 1 (Not suitable) below 13.5° C; zone 2 (suitable) from 13.5 to 17.5° C; zone 3 (Moderately suitable) from 17.5 to 23.0° C. With a linear model to estimate minimum temperature, and a digital elevation model, using a Geographical Information System (GIS), maps were made of the geographic regions with different agroclimatic suitability for the cultivation of "Manila" mango.

Key words: Agroclimate, mango, principal component analysis (PCA), hydro-thermal graphs, minimum temperature.

INTRODUCCIÓN

El mango (*Mangifera indica* L.) es un fruto de importancia económica, a nivel mundial la cosecha en el 2004 fue de 26.3 millones de toneladas, la India ocupó el primer lugar con el 41.1%, segundo lugar China con el 13.8%, tercer lugar Tailandia con 6.6% y México ocupó el cuarto lugar con el 5.7% del total. Las exportaciones mundiales de mango del 2003 alcanzaron un valor de 560.4 millones de dólares, destaca México como primer exportador con 23.5% del total exportado (FAO, 2005). En el 2004 México tenía plantadas 166 000 ha, y para el 2004 se reportaron en el estado de Veracruz 25 550 ha con una producción total de 187 586 toneladas y rendimiento promedio de 7.6 t ha⁻¹. Esta especie frutícola actualmente se cultiva en 61 municipios del estado de Veracruz, en sitios que tienen de 10 a 1 500 m de altitud, aunque el 93% de la superficie plantada se ubica a menos de 500 m sobre el nivel medio del mar (INEGI, 2005a). Se calcula que en el estado de Veracruz 85% de las plantaciones de mango son de la variedad "Manila",

cuyo destino principal es el mercado nacional (Mosqueda *et al.*, 1996).

Debido a la importancia socioeconómica que representa el cultivo de mango en la República Mexicana, es necesario conocer las regiones agroclimáticas donde se cultiva el mango e identificar las áreas geográficas donde se pueda hacer una expansión más racional del cultivo que ayude a garantizar su éxito.

Una región agroclimática es una zona con características interrelacionadas entre el clima y los sistemas de cultivos, el entendimiento de estas interrelaciones ayuda a tomar mejores decisiones en el manejo agronómico de los cultivos (White *et al.*, 2001). El mango puede desarrollarse en climas donde la temperatura media del mes más frío sea mayor de 15° C; se considera que la temperatura óptima de producción es de 24 a 27° C y el crecimiento se detiene entre 4 y 6° C (Mata y Mosqueda, 1998). El efecto de la temperatura se hace más evidente en zonas subtropicales donde la emergencia de la inflorescencia se produce después de presentarse el período de temperaturas más bajas en el año (Whiley, 1993; Chiaikiattiyos *et al.*,

1994; Núñez y Davenport, 1994 y Galán, 2000). En Veracruz, las temperaturas de la primera y segunda quincenas del mes de diciembre afectan la diferenciación floral y la producción del mango (León-Arteta y Pérez 1996). Además, existe una coincidencia entre el descenso de temperatura menor a 20° C y los procesos de iniciación y diferenciación floral (Osuna *et al.*, 2000).

El método de Análisis de Componentes Principales (ACP) fue primeramente descrito por Karl Pearson en 1901 y desarrollado por Hotelling en 1933, tal como se conoce ahora (Manly, 1994). Este método es uno de los más difundidos entre las técnicas multivariadas, la fase esencial consiste en hacer combinaciones lineales estandarizadas de las p variables cuantitativas originales, correlacionadas en alguna medida y transformándolas en p nuevas variables cuantitativas no correlacionadas entre sí, conocidas como "Componentes Principales" (CP), (Zamudio y Alvarado, 2000). Paterson *et al.* (1978) en la región del oeste de Australia realizaron una clasificación de ambientes, con datos climáticos: precipitación anual, precipitación invernal, almacenamiento potencial de la humedad del suelo, función de vernalización, función de crecimiento, radiación solar y duración de la estación de crecimiento, mediante (ACP). Encontraron como vectores principales la radiación solar y la cantidad de agua almacenada en el suelo, que juntos explican el 90% de la variación ambiental. Estos vectores fueron utilizados para construir un plano y realizar estudios en la ecología de la avena silvestre (*Avena sp.*). Felicísimo y Álvarez (1982) en Asturias realizaron tres ACP con los datos de 163 estaciones del Instituto Nacional de Meteorología en Asturias. En el primer análisis se introdujeron como variables las precipitaciones mensuales medias, en el segundo las temperaturas medias de las máximas y de las mínimas a nivel mensual de 47 estaciones y, finalmente, en el tercer análisis, se analizó el régimen termopluviométrico donde se introducen

conjuntamente las variables anteriores. Se realizó una división en grupos en función de la afinidad geográfica entre las estaciones y con vistas a una sectorización climática dentro de la región. Mallants y Reyen (1990) utilizaron el ACP para definir regiones homogéneas de precipitación en el oeste de Bélgica y en el norte de Francia empleando datos de precipitación de tres años: 1973 (seco), 1977 (húmedo) y 1978 (promedio), se analizaron tres años juntos y otro separadamente. Los resultados mostraron que el primer componente principal explica más del 75% de la varianza total y que está distribuido uniformemente en toda la región. Los patrones de los componentes expresan de alguna manera efectos marítimos y topográficos, además, sirvió para dividir el área en estudio en cuatro subregiones. Varela y Varna (2002) aplicaron el método de ACP para analizar las precipitaciones mensuales en la provincia de Buenos Aires, Argentina; analizaron dos estaciones meteorológicas con diferentes períodos de registros y en ambos casos obtuvieron dos componentes principales que explican el 90 y el 87%, respectivamente, de la varianza de los datos originales. Estos componentes representan dos patrones de precipitación extremos en la región y obtienen la definición de dos regiones fuertemente asociadas a estos dos patrones de precipitación extremos y una zona de transición.

Holden y Brereton (2004) en Irlanda, por medio de gráficas de clima hidro-termales, a partir de precipitación total del mes y temperatura media mensual, de acuerdo con la forma y la posición de la gráfica, definieron siete regiones agroclimáticas para los cultivos de: pasto, cebada, maíz, papa y soya.

El objetivo de este trabajo fue definir regiones agroclimáticas para el cultivo de mango "Manila" en el estado de Veracruz, México, mediante las técnicas de ACP y gráficas hidro-termales, así como su representación cartográfica, con el fin de ubicar las zonas geográficas con mayor aptitud agroclimática para este frutal.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área en estudio comprende el estado de Veracruz, México, que se localiza entre los paralelos 17°09' y 22°28' de latitud Norte y los meridianos 93°36' y 98°39' de longitud Oeste (Figura 1), con una superficie de 72815 km² que representa el 3.7% de la superficie total del país (INEGI, 2005b). En el ACP se utilizaron las variables climáticas: altura sobre el nivel del mar, temperatura, precipitación, evaporación y radiación global estimada. En total se seleccionaron doce variables climáticas que de acuerdo con la revisión de literatura se considera que tienen mayor influencia en el crecimiento, desarrollo y productividad del cultivo de mango (Mata y Mosqueda, 1998; Osuna *et al.*, 2000; Whiley, 1993; Núñez y Davenport, 1994 y Chiaikiattiyos *et al.*, 1994).

Las doce variables climáticas seleccionadas para 28 localidades productoras de mango "Manila" en el estado de Veracruz, se obtuvieron de la base de datos de las Normales Climatológicas (1961-1990), (CNA, 2006) y del Sistema de Información Climática (SICLIM), (IMTA, 2000), (Tabla 1). Los valores anuales de dichas variables, se obtuvieron a partir de los promedios mensuales y son las siguientes:

- Y₁ = Altura sobre el nivel del mar (m).
- Y₂ = Temperatura mínima de octubre (°C).
- Y₃ = Temperatura mínima de noviembre (°C).
- Y₄ = Temperatura mínima de diciembre (°C).
- Y₅ = Temperatura mínima de enero (°C).
- Y₆ = Promedio de temperatura mínima (oct, nov, dic y ene; °C).
- Y₇ = Promedio anual de temperatura mínima (°C).
- Y₈ = Temperatura media anual (°C).
- Y₉ = Promedio anual de temperatura máxima (°C).
- Y₁₀ = Precipitación total anual (mm).
- Y₁₁ = Evaporación total anual (mm). De esta variable, solamente cinco de las estaciones seleccionadas cuentan con información; para las 23 estaciones restantes se generó un modelo

empírico en función de temperatura máxima mensual, precipitación total mensual y radiación global promedio mensual estimada, con datos de 18 estaciones de la región.

Y₁₂ = Promedio anual de radiación solar global (MJ m⁻² día⁻¹). La insolación media para cada estación se estimó con el procedimiento que proponen Tejeda y Vargas (1996) mediante la siguiente relación:

$$\bar{n} = N_{15} \left[0.31 + 0.48 \left(\frac{X_3 + 0.5X_2}{X_1 + X_2 + X_3} \right) \right]; \text{ donde:}$$

\bar{n} = Insolación media (número real horas día⁻¹).

N₁₅ = Insolación teórica mensual (duración astronómica promedio del día, horas día⁻¹).

X₁ = Días nublados cerrados promedio del mes.

X₂ = Días medio nublados promedio del mes.

X₃ = Días despejados promedio del mes.

Este valor de \bar{n} estimado se introduce en la ecuación del método de Prescott (1940) para estimar la radiación solar global.

El ACP para las variables climáticas seleccionadas, se realizó con el paquete estadístico Statistical Analysis System (SAS, 1989). Este análisis permitió determinar una variable climática que explica en mayor proporción la varianza total de los datos originales, misma que se utilizó como índice agroclimático para clasificar los grados de aptitud, además permitió definir grupos de localidades con agroclimas diferentes, a partir de una gráfica de dispersión obtenida con los dos primeros componentes principales del mismo análisis.

La información de los municipios productores de mango en el estado de Veracruz en cuanto a superficie plantada, producción y rendimiento, se obtuvo del anuario estadístico del mismo estado (INEGI, 2005a).

Se construyeron gráficas hidro-termales como las utilizadas por Holden y Brereton (2004) para cada uno de los grupos de localidades definidos con el ACP, mediante dos

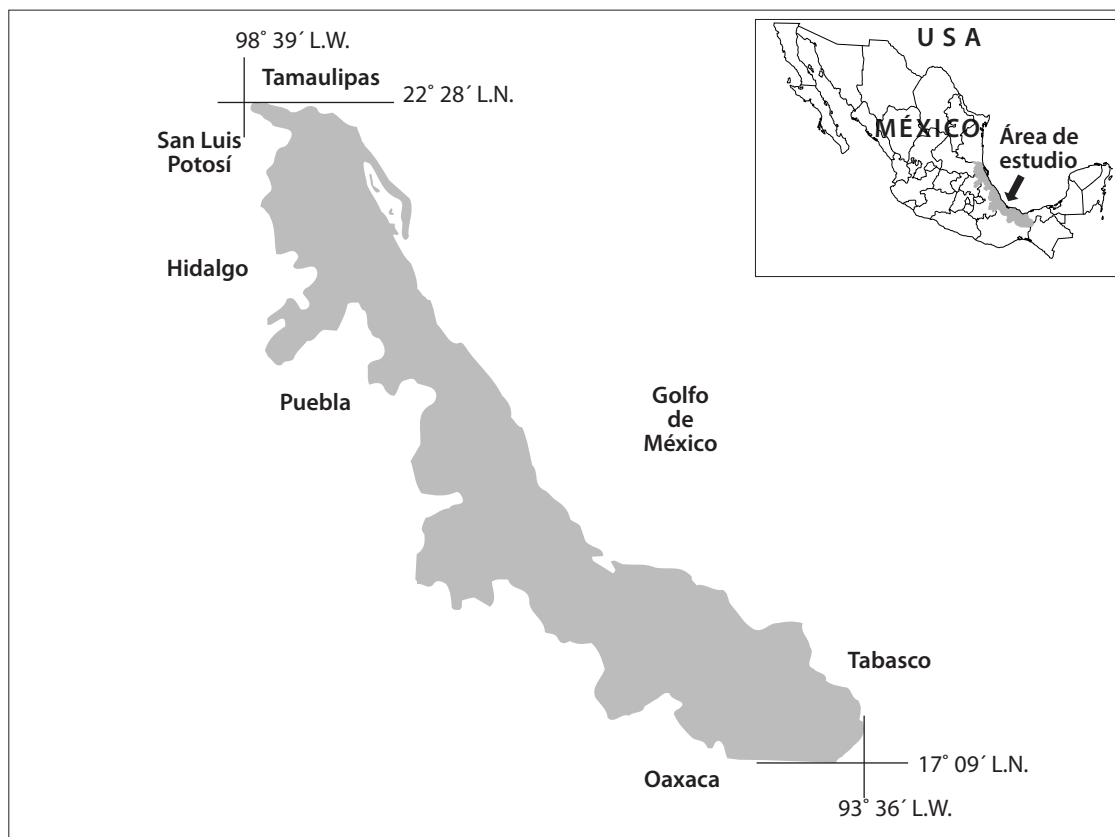


Figura 1. Ubicación geográfica del estado de Veracruz, México.

elementos climáticos: el promedio de la precipitación total mensual en el eje de las equis (X), aquí se introduce una variante, debido a que en lugar de la temperatura media mensual se utilizaron los datos de la temperatura mínima mensual en el eje de las yes (Y); de acuerdo con la forma y posición de la gráfica hidro-termal se verifican y confirman los grupos de localidades con agroclimas diferentes visualizados en la gráfica de dispersión del ACP.

Los intervalos de la variable climática que se utilizó como índice para clasificar los grados de aptitud agroclimática se definieron en función de las temperaturas cardinales obtenidas de la revisión bibliográfica, y de los rendimientos promedios de diez años de los grupos de loca-

lidades productoras de mango "Manila", obtenidos con el ACP y confirmados con la forma y posición de las gráficas hidro-termales.

Se generó un modelo lineal empírico de la temperatura mínima anual en función de un factor geográfico, en este caso, la altura sobre el nivel del mar, utilizando información de la base de datos SICLIM (IMTA, 2000), de la cual se obtuvieron datos promedios de temperatura mínima anual de 134 estaciones del estado de Veracruz que contaron con un período de registro superior a diez años y con menos del 10% de datos faltantes, mismos que no fueron estimados, debido a que el programa de la base de datos SICLIM calcula los promedios con base en los datos existentes. También se obtuvo un

Tabla 1. Datos de las doce variables climáticas usadas en el Análisis de Componentes Principales (ACP) y el rendimiento por localidad productora de mango "Manila" en el estado de Veracruz, México, utilizados en la zonificación agroclimática

No.	Localidad	Altura M	Temp. media mensual												Prom. O,N,D,E °C	Tmin_A °C	Tmed_A °C	Tmax_A °C	Ppt_A mm	Evpt_A mm	Rg_A M/jm ² ·día ⁻¹	Ren_P tha ⁻¹
			Oct °C	Nov °C	Dic °C	Ene °C	Feb °C	Mar °C	Abr °C	May °C	Jun °C	Jul °C	Ago °C	Sep °C								
1	Actopan	25	21.8	19.3	17.7	16.7	19.6	20.7	25.8	30.9	1116.4	1562.0	20.03	6.92								
2	Tierra Blanca	60	22.0	19.6	18.4	17.2	20.0	20.8	27.6	34.5	1463.8	1610.2	20.70	3.60								
3	Jalcomulco	313	19.4	17.2	15.7	14.8	17.4	18.7	24.7	30.8	903.9	1590.7	20.58	5.78								
4	E. Zapata (Papantla)	298	20.4	17.5	15.4	14.3	17.8	19.7	24.0	28.4	1066.0	1371.4	19.59	5.84								
5	San Andrés Tuxtla	210	19.8	17.6	16.5	16.0	18.0	19.4	24.4	29.4	2272.7	1450.7	19.06	6.78								
6	Soledad de Doblado	183	20.9	18.7	17.3	16.8	19.0	20.2	25.9	31.7	1022.7	1626.0	20.38	6.46								
7	Chacaltianguis	96	21.9	19.8	18.6	17.4	20.1	21.2	25.8	30.5	1419.2	1741.4	20.49	4.61								
8	Cotaxtla	37	20.5	18.2	16.5	15.6	18.4	19.9	25.3	30.8	1290.0	1499.7	19.94	6.41								
9	Alto Lucero de G.B.	810	19.3	17.1	21.7	14.6	19.4	19.2	22.7	26.2	1666.3	1262.7	20.14	6.21								
10	Manlio F. Altamirano	44	21.9	19.8	18.1	17.4	19.9	21.3	26.7	32.1	1076.0	1143.1	20.87	5.61								
11	Tlaxiucan	84	21.5	19.8	18.0	16.9	19.8	20.9	25.8	30.8	1408.7	1334.4	17.67	7.87								
12	Tlacojalpan	9	23.5	21.5	19.8	19.0	21.6	22.5	26.4	30.3	1655.0	1626.7	18.59	4.21								
13	Teocelo	1218	14.5	12.5	11.3	10.5	12.8	13.9	19.2	24.6	2108.0	1150.9	19.51	5.22								
14	Otatitlán	10	22.0	19.8	18.1	17.4	20.0	21.2	25.8	30.5	2058.0	1472.9	19.73	4.48								
15	Medellín	2	22.9	21.0	19.1	18.4	21.0	22.1	25.3	28.4	1757.0	1841.7	20.85	5.35								
16	Playa Vicente	95	21.3	19.7	18.6	18.1	19.9	20.9	26.5	32.1	1934.8	1454.6	18.81	8.05								
17	Yanga	817	17.5	15.6	13.7	12.9	15.6	16.3	22.2	28.1	2557.1	1256.5	19.56	19.25								
18	Syula de Alemán	88	21.3	19.2	18.0	16.7	19.5	20.4	25.2	30.0	1777.8	1443.1	18.87	5.45								
19	Úrsulo Galván	29	20.7	18.6	16.8	15.9	18.7	20.2	25.3	30.4	1296.0	1542.6	19.75	5.93								
20	Paso del Macho	479	18.7	16.5	15.1	14.1	16.8	17.8	24.3	30.9	1112.4	1518.8	19.09	19.12								
21	Hueyapan de Ocampo	14	21.4	19.0	17.6	16.8	19.3	20.7	26.3	31.8	1346.4	1419.6	20.58	4.42								
22	Pajapan	46	21.6	19.6	18.4	17.5	19.9	21.1	25.9	30.8	1868.9	1572.2	20.19	3.81								
23	Omealca	430	18.4	16.4	14.7	14.0	16.5	17.5	23.2	29.0	2557.3	1408.0	20.07	15.58								
24	Naranjos Amatlán	282	20.5	17.5	15.7	13.9	17.9	19.6	23.7	27.9	1810.1	1367.7	20.46	3.85								
25	S. Juan Evangelista	39	20.7	18.3	17.4	16.0	18.8	20.3	25.7	31.2	1584.0	1285.9	20.71	4.84								
26	Pánuco	60	19.7	17.3	15.2	13.8	17.4	19.1	24.2	29.4	921.7	1531.0	19.62	7.04								
27	Zongolica	836	16.5	14.5	12.8	12.2	14.6	15.6	21.2	26.9	2098.0	1254.8	17.85	11.64								
28	Naolinco	547	15.5	13.3	11.4	10.6	13.4	14.9	19.8	24.7	1697.7	1047.4	18.85	4.67								

Prom. O,N,D,E, = Promedio de temperatura mínima de los meses de oct, nov, dic y ene; Tmin_A = Temperatura mínima anual; Tmed_A = Temperatura media anual; Tmax_A = Temperatura máxima anual; Ppt_A = Precipitación total anual; Evpt_A = Evaporación total anual; Rg_A = Radiación global anual; Ren_P = Rendimiento Promedio de mango.

modelo de elevación digital del estado de Veracruz a partir del Sistema de Generador de Modelo Altimétrico, SIGMA Ver. 1.0 (Pedraza-Oropeza *et al.*, 2005).

Con los intervalos de temperatura mínima definidos como índice agroclimático, el modelo empírico de temperatura mínima, el modelo de elevación digital y mediante un SIG usando álgebra de mapas, se definieron las zonas agroclimáticas productoras de mango "Manila" siguiendo el procedimiento de la Figura 2.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo empírico generado para estimar la evaporación con 18 estaciones de la región de

estudio fue el siguiente: $Ev = 0.0912 (T_{máxima}^{1.1811}) (PT^{-0.0256}) (RG^{1.0978})$

con: $R^2 = 0.8199$; $n=216$ y $CME=0.02$;

donde:

Ev = Evaporación total mensual estimada (mm).

$T_{máxima}$ = Temperatura máxima mensual (°C).

PT = Precipitación total mensual (mm).

RG = Radiación global promedio mensual estimada ($MJm^{-2} día^{-1}$).

Este modelo se validó con datos de evaporación total mensual de tres estaciones del estado de Veracruz, que se excluyeron en la

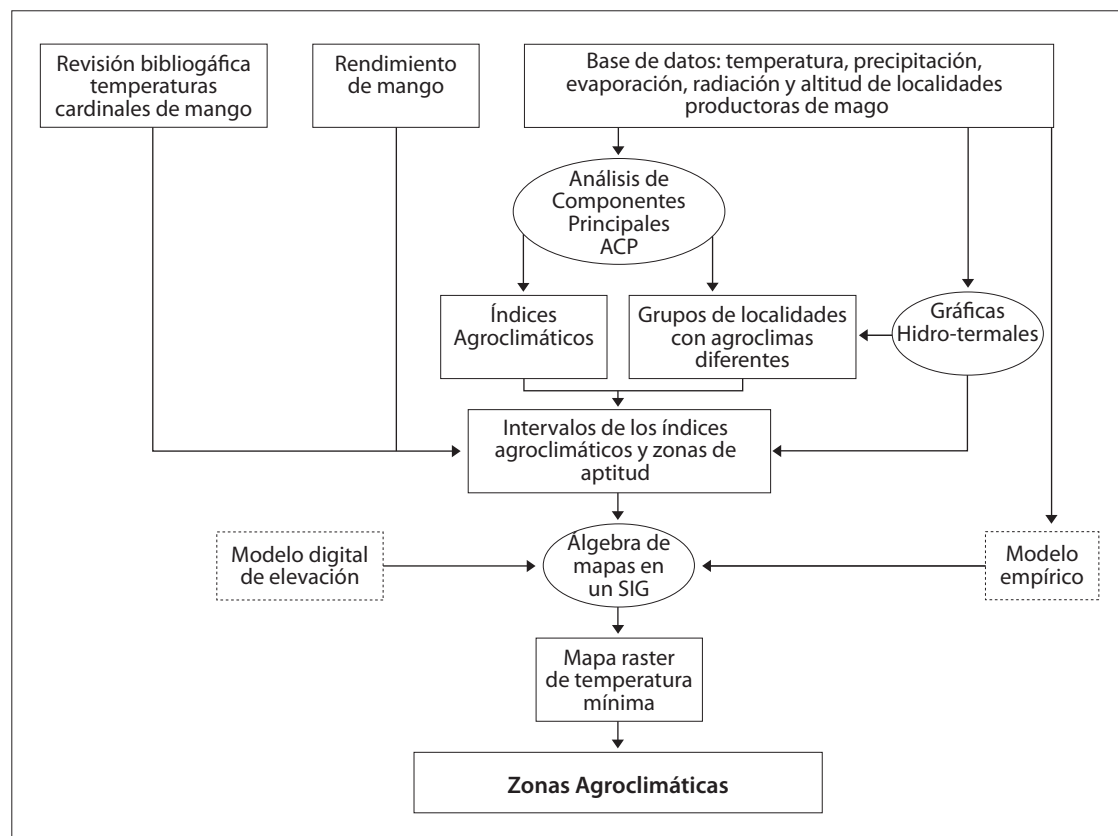


Figura 2. Procedimiento para definir las zonas agroclimáticas productoras de mango, mediante ACP, gráficas hidro-termales y álgebra de mapas con un SIG.

obtención del modelo empírico (Bellaco San Juan Evangelista, Cuichapa y Zempoala Úrsulo Galván, Tabla 2), el error medio mensual (EMM) obtenido fue de 15.1% que se calculó con la siguiente ecuación:

$$EMM = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left| \frac{OSi - ESi}{OSi} \right| \times 100$$

donde: OSi =Dato observado; ESi =Dato estimado

A partir de la matriz de correlaciones con el ACP, resultó que el primer componente principal (Prin1) tuvo como valor característico 8.729 y explicó el 72.74% de la varianza total y el segundo componente principal (Prin2) tuvo como valor característico 1.231 y explicó el 10.26% de la varianza total (Tabla 3), juntos explicaron el 83% de la varianza total contenida en la matriz de datos originales.

Los valores de los coeficientes (Tabla 3) indican que las variables que presentan mayor asociación con el primer componente principal (Prin1), son las temperaturas mínimas tanto de los meses de octubre, noviembre, diciembre y enero; el promedio de estos meses, el promedio de temperatura media anual y el promedio de temperatura mínima anual; sin embargo, se consideró esta última variable, por presentar el mayor coeficiente de asociación al primer componente principal 0.3326 (Tabla 3) y ser una variable integradora del efecto de la temperatura mínima sobre el cultivo durante todo el año; el segundo componente principal (Prin2), está asociado con la variable promedio de precipitación total anual, su coeficiente tiene un valor de 0.7045 (Tabla 3). Por lo que estas dos variables, promedio de temperatura mínima anual y promedio de precipitación total anual, explican el 83% de la varianza total contenida en la matriz de datos originales y determinan en mayor porcentaje las diferencias entre las condiciones agroclimáticas de las localidades donde se cultiva el mango "Manila".

A partir de los dos componentes principales y sus variables asociadas, se elaboró

un diagrama de dispersión de las localidades productoras de mango en estudio, donde se distinguen dos grupos (Figura 3). Se observa que las localidades del grupo uno presentan temperatura mínima anual más bajas que las del grupo dos, éstas favorecen la inducción de la floración del cultivo de mango e incluso son las mejores localidades para la producción de mango en términos de rendimiento (Tabla 4, Figura 5). Lo anterior concuerda con lo reportado por Whiley (1993), Chiaikiattiyos *et al.* (1994), Núñez y Davenport (1994), León-Arteta y Pérez (1996), Mata y Mosqueda (1998) y Galán (2000), quienes encontraron que para la inducción floral del mango se requieren temperaturas bajas, principalmente en los meses de diciembre y enero. Incluso el grupo dos presenta mayor cantidad de calor y menor aporte de temperaturas bajas, y sus rendimientos son menores (Tabla 4, Figuras 3 y 5).

Con el propósito de confirmar la agrupación de las localidades obtenida mediante el ACP, se utilizaron datos promedios de precipitación total mensual y temperatura mínima mensual para cada grupo de localidades, mismos que sirvieron para construir las gráficas hidro-termales, donde se observa una clara separación en la posición de las gráficas de los dos grupos de localidades inicialmente identificados. Por lo que los agroclimas difieren de manera evidente en términos de su temperatura mínima mensual y anual (Figura 4). Para determinar las categorías de aptitud que presentan las regiones agroclimáticas definidas para el cultivo de mango "Manila", se utilizó como variable de clasificación el promedio anual de temperatura mínima, que de acuerdo con el ACP explica el 72.74% de la varianza total de las variables originales analizadas, de la variabilidad agroclimática del área en estudio, además de ser ésta, una variable integradora de la temperatura mínima durante todo el año (Tabla 3 y Figura 3). Los intervalos de cada categoría se determinaron a partir de los valores promedios de los grupos definidos con la gráfica de dispersión del ACP, confirmados con las gráficas hidro-

Tabla 2. Series de datos observados y estimados en tres estaciones climatológicas del estado de Veracruz y el error de la validación del modelo de empírico generado para estimar la evaporación total mensual

Estación	No.	Mes	OS_i (mm)	ES_i (mm)	$\left \left(\frac{OS_i - ES_i}{OS_i} \right) \right $
Bellaco Bella Vista	1	ene	63.5	83.3	0.311
	2	feb	79.9	110.6	0.384
	3	mar	122.9	145.6	0.185
	4	abr	164.7	184.8	0.122
	5	may	170.7	192.5	0.128
	6	jun	142.3	166.5	0.170
	7	jul	117.1	142.6	0.217
	8	ago	118.8	150.8	0.269
	9	sep	99.1	135.9	0.371
	10	oct	83.2	109.6	0.318
	11	nov	65.8	90.8	0.380
	12	dic	57.9	80.0	0.382
Cuichapa	13	ene	63.0	69.0	0.096
	14	feb	77.1	85.6	0.110
	15	mar	104.4	108.3	0.037
	16	abr	125.7	133.2	0.060
	17	may	139.2	135.0	0.030
	18	jun	135.7	123.8	0.087
	19	jul	128.4	113.0	0.120
	20	ago	139.7	111.7	0.201
	21	sep	115.1	101.6	0.117
	22	oct	92.0	87.6	0.047
	23	nov	62.9	73.7	0.172
	24	dic	52.5	66.0	0.257
Zempoala Úrsulo Galván	25	ene	100.4	87.4	0.130
	26	feb	115.6	106.6	0.078
	27	mar	142.8	130.0	0.090
	28	abr	155.7	166.4	0.069
	29	may	165.4	172.1	0.041
	30	jun	142.3	147.9	0.039
	31	jul	139.2	136.7	0.018
	32	ago	139.6	146.8	0.051
	33	sep	127.8	137.2	0.073
	34	oct	127.5	125.8	0.013
	35	nov	112.0	104.2	0.070
	36	dic	93.7	89.8	0.041

$$\text{Error medio mensual (EMM)} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left| \left(\frac{OS_i - ES_i}{OS_i} \right) \right| \times 100 = 15.1\%$$

donde: OS_i = Dato observado; ES_i = Dato estimado

Tabla 3. Resumen del Análisis de Componentes Principales (ACP)

Vector:	1	2
Valores característicos	8.729	1.231
Porcentaje de varianza explicada	72.74	10.26
VARIABLES	COEFICIENTES	
Altura sobre el nivel del mar (m)	-0.3026	0.1021
Temperatura mínima de octubre (°C)	0.3323	0.0843
Temperatura mínima de noviembre (°C)	0.3312	0.1471
Temperatura mínima de diciembre (°C)	0.2913	0.1712
Temperatura mínima de enero (°C)	0.3260	0.1816
Promedio de temperatura mínima (oct, nov, dic y ene) (°C)	0.3280	0.1426
Promedio anual de temperatura mínima (°C)	0.3326	0.0639
Temperatura media anual (°C)	0.3270	-0.0057
Promedio anual de temperatura máxima (°C)	0.2736	-0.0787
Precipitación total anual (mm)	-0.1388	0.7045
Evaporación total anual (mm)	0.2363	-0.0473
Promedio anual de radiación solar global (MJ m ⁻² día ⁻¹)	0.1490	-0.6077

termales, sus rendimientos promedios (Tabla 4) y apoyados en los trabajos de diferentes autores como Whiley (1993), Chiaikiattiyos *et al.* (1994), Núñez y Davenport (1994), León-Arteta y Pérez (1996) y Mata y Mosqueda (1998), quienes indican que el cultivo de mango puede desarrollarse en climas donde la temperatura media del mes más frío sea mayor de 15° C, que la inducción floral del mango se presenta cuando el promedio de temperatura mínima en el mes es de 15 a 16° C. Se obtuvieron tres categorías de aptitud agroclimática para el cultivo de mango "Manila" (Tabla 5 y Figura 5).

El modelo lineal empírico obtenido para estimar la temperatura mínima anual en función de la altura sobre el nivel del mar es el siguiente: $T_{\text{mínima}} = 20.4 - 0.0058 (h)$.

Donde:

$T_{\text{mínima}}$ = Promedio anual de temperatura mínima (°C),

h = Altitud (m),

$r^2 = 0.9203$; Error promedio = 7.08%,

$n = 134$ y $CME = 1.5750$,

Con el modelo de elevación digital y el modelo empírico de temperatura mínima y mediante un SIG, se generó un mapa tipo raster de promedios de temperaturas mínimas anuales, el cual se clasificó de acuerdo con la clasificación agroclimática de la Tabla 5, para obtener la cartografía del cultivo de mango "Manila" que se presenta en la Figura 6. En el mapa se observa que 8.1% de la superficie del estado presenta una región geográfica con condiciones agroclimáticas en la categoría de Apta, 83.5% presenta categoría de Moderadamente Apta y 8.3% de la superficie del estado presenta una región geográfica con categoría agroclimática No Apta para el cultivo de mango "Manila". Las zonas agroclimáticas encontradas se pueden caracterizar de la siguiente manera.

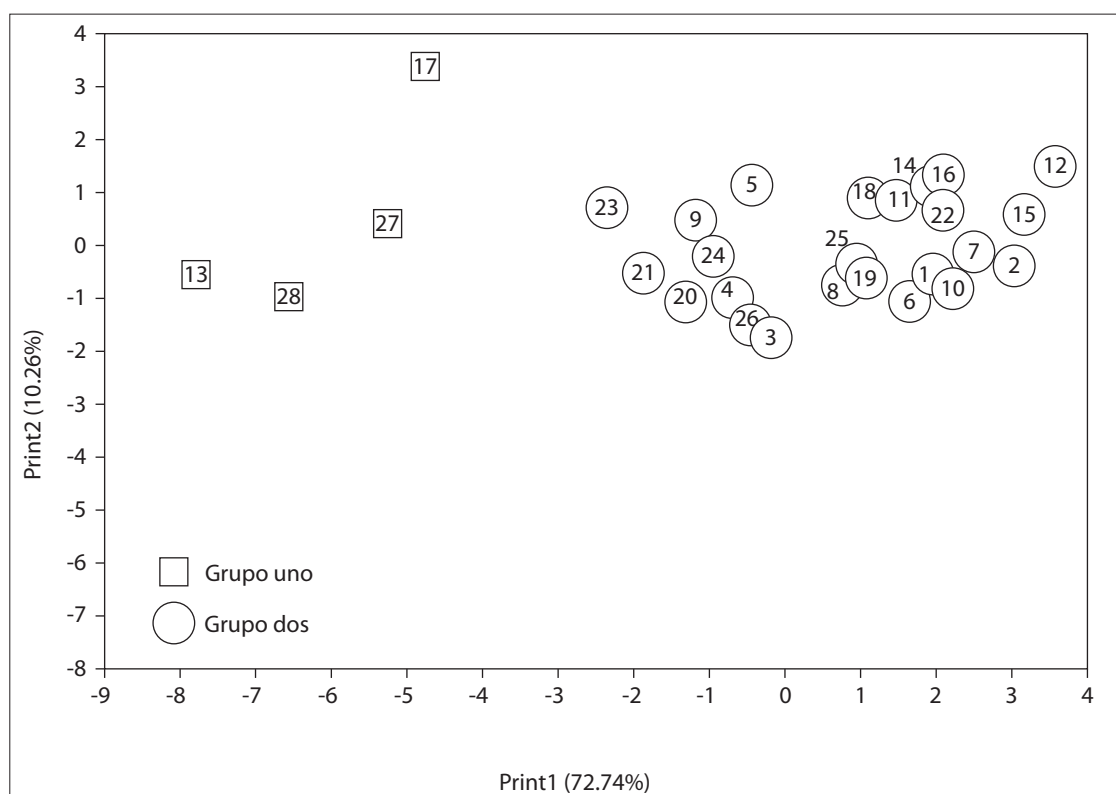


Figura 3. Diagrama de dispersión de los componentes principales Prin1 y Prin2 para las 28 localidades productoras de mango "Manila", resultados del ACP (el eigenvector con mayor coeficiente para el primer componente Prin1 corresponde a la temperatura mínima anual y para el segundo componente Prin2 a la precipitación total anual). El número dentro del cuadro o círculo indica el número de orden de la localidad de la Tabla 1.

Zona agroclimática Apta: ocupa el 8.1% del área total del estado (591 067 ha), distribuida en las partes altas de la llanura costera del golfo donde se inicia en las faldas de las montañas de la parte centro y la región de "Los Tuxtlas", con alturas que van desde 550 hasta 1 200 msnm; con temperatura mínima anual entre 13.5 y 17.5° C, y un promedio de 15.2° C; temperatura media anual entre 19.0 y 22.0° C, y un promedio de 20.6° C; temperatura máxima anual entre 24.5 y 28.0° C, con un promedio de 26.1° C. Presenta una precipitación total anual entre los 1 698 y 2 557 mm año⁻¹, con un promedio de 2 115 mm año⁻¹; evaporación total anual entre

de 1 047 y 1 256 mm año⁻¹, con un promedio de 1 117.4 mm año⁻¹. En la mayor parte de esta zona agroclimática predominan los siguientes tipos de climas, según Köppen, modificado por Enriqueta García, y obtenidos de CONABIO (1998): **(A)C(w₁)**, **(A)C(w₂)**, **(A)C(m)**, **(A)C(m)(f)** y **(A)Cf**, que significan: "semicálidos templados subhúmedos y húmedos", con temperatura media anual entre 18 y 22° C, lluvias en verano, con lluvia invernal entre 5 y 10.2% y el tipo **(A)Cf** mayor de 18%.

Zona agroclimática Moderadamente Apta: representa el 83.5% del área total del estado

Tabla 4. Variables climáticas y rendimiento promedio de mango “Manila” para los dos grupos de localidades definidos, en el estado de Veracruz

Grupo de Localidades	Altitud (m)	T _{mínima} * (°C)	T _{máxima} ** (°C)	Precipitación anual (mm)	Evaporación anual (mm)	Rad. Global*** (MJm ⁻² día ⁻¹)	Rendimiento (t ha ⁻¹)
1	855	15.2	26.1	2115	1177	18.941	10.2
2	156	20.2	30.4	1516	1487	19.861	6.6

T_{mínima}* = Promedio anual de temperatura mínima; T_{máxima}** = Promedio de temperatura máxima; Rad. Global*** = Promedio anual de radiación solar global.

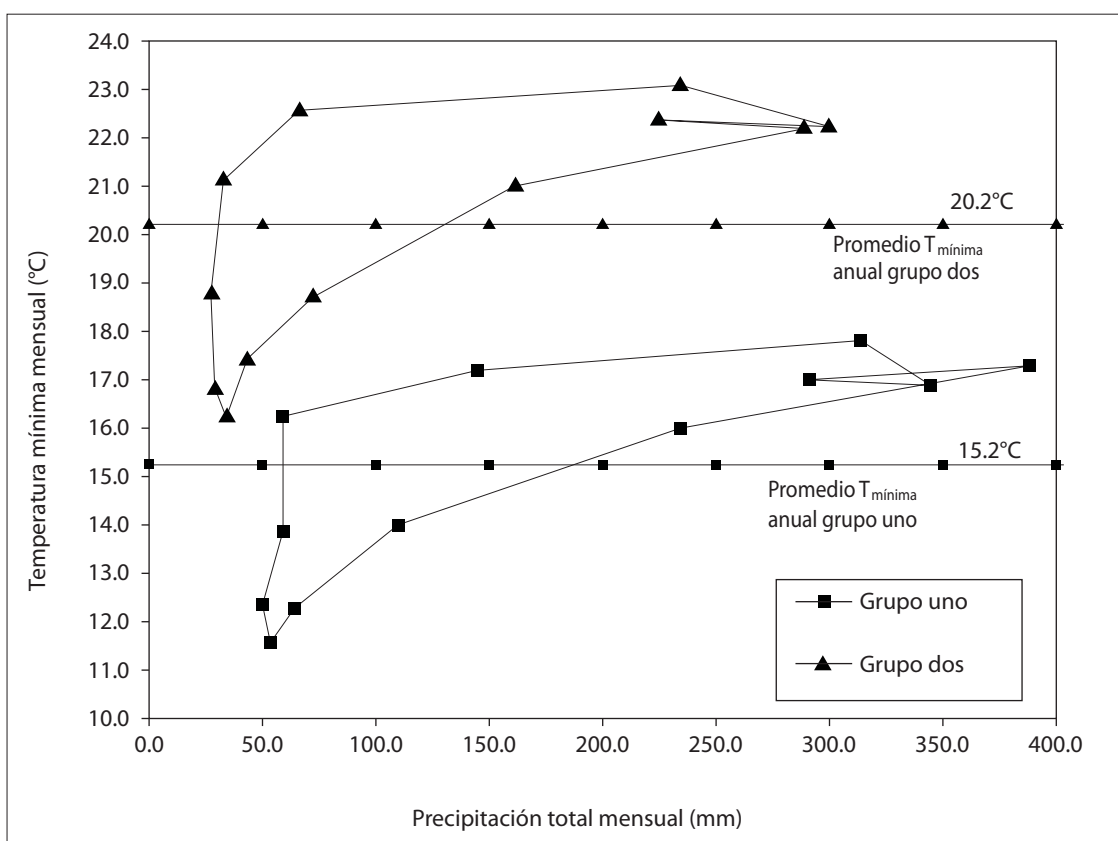


Figura 4. Gráficas hidro-termales de los dos grupos de localidades productoras de mango “Manila” obtenidos mediante ACP.

Tabla 5. Zonas agroclimáticas en función de los intervalos del promedio anual de temperatura mínima, grado de aptitud, superficie y porcentaje de la superficie estatal

Zona Agroclimática	Intervalo del promedio anual de temperatura mínima (°C)	Grado de Aptitud	Superficie (ha)	(%) de superficie del estado
1	< 13.5	No Apta	608,056	8.4
2	13.5 – 17.5	Apta	591,067	8.1
3	17.5 – 23.0	Moderadamente Apta	6,082,377	83.5
Total			7,281,500	100.00

(6082377 ha), distribuida en las llanuras costeras de las partes norte, centro y sur-sureste del estado, con alturas que van desde 0 hasta 550 msnm. La temperatura mínima anual entre 17.5 y 23.0° C, y un promedio de 20.2° C. La temperatura media anual entre 22.7 y 27.6° C, con un promedio de 25.3° C. La temperatura máxima anual entre 26.2 y 34.5° C, y un promedio de 30.4° C. Presenta una precipitación total anual entre los 904 y 2557 mm año⁻¹, con un promedio de 1516 mm año⁻¹; evaporación total anual entre de 1143 y 1842 mm año⁻¹, y un promedio de 1487 mm año⁻¹. En la mayor parte de esta zona agroclimática predominan los siguientes tipos de climas, según Köppen, modificado por Enriqueta García, y obtenidos de CONABIO (1998): **A(f)**, **Am(f)** y **Am**, es decir, "cálidos húmedos", con temperatura media anual mayores de 22° C, lluvias entre verano e invierno, porcentaje de lluvia invernal mayor de 18; y lluvias en verano, porcentaje de lluvia invernal mayor de 10.2 y entre 5 y 10.2, respectivamente; los tipos de climas: **Aw₀**, **Aw₁**, **Aw₂**, que significan "cálidos subhúmedos", con temperatura media anual mayor de 22° C y porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2, además los tipos de climas: **Aw₁(X')** y **Aw₂(X')**, que significan "cálidos subhúmedos", con temperatura media anual mayor de 22° C y porcentaje de lluvia invernal mayor de 10.2.

Zona agroclimática No Apta: cubre el 8.4% del área total del estado (608 056 ha), distribuida en las faldas del cono volcánico del "Pico de Orizaba" y las partes altas de las montañas de la región centro occidente y la región de "Los Tuxtlas", con alturas superiores a los 1200 msnm; con temperatura mínima anual inferior a 13.5° C, y temperatura media anual inferior a 18° C. En la mayor parte de esta zona agroclimática predominan los siguientes tipos de climas, según Köppen, modificado por Enriqueta García, y obtenidos de CONABIO (1998): **Cb'(w₂)** y **Cb'(m)(f)**, que significan "templado semifrío", con verano fresco, largo subhúmedo, temperatura media anual entre 5 y 12° C, con lluvias en verano y de 5 a 10.2% de lluvia invernal; **BS₀kw** y **BS₁kw** que significan "semiárido templado", temperatura media anual entre 12 a 18° C, lluvias en verano y de 5 a 10.2% de lluvia invernal; **C(f)** y **C(m)(f)**, que significan "templado húmedo", temperatura media anual entre 12 a 18° C, lluvias en verano, mayor de 18% y mayor de 10.2% de lluvia invernal respectivamente, y los tipos climáticos **C(w₁)** y **C(w₂)** que significan "templado subhúmedo", con temperatura media anual entre 12 y 18° C, lluvias en verano, con lluvia invernal entre 5 y 10.2%.

Al mapa de zonas de aptitud agroclimática (Figura 6) se sobrepuso el mapa de división

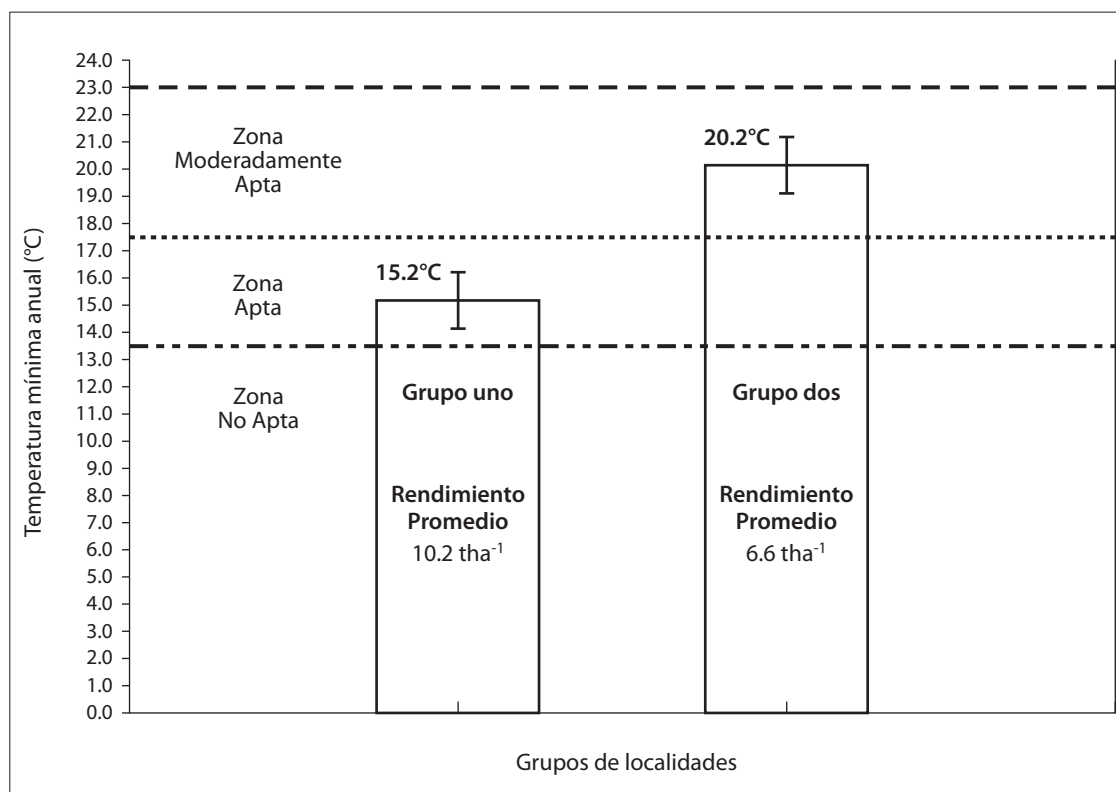


Figura 5. Promedio de temperatura mínima anual y rendimiento para los grupos de localidades, productoras, así como límites de los intervalos de las categorías de aptitud agroclimática para el cultivo de mango “Manila”.

municipal del estado de Veracruz y se obtuvo el grado de aptitud agroclimática para el cultivo de mango “Manila” por municipio (Tabla 6). Se observa que dos municipios tienen en su totalidad la categoría de Apta, 30 municipios que tienen las categorías Apta y Moderadamente Apta, 87 municipios que tienen la categoría Moderadamente Apta y 38 municipios que presentan la categoría No Apta, mismos que no reportan superficie cultivada con mango.

Al comparar la zonificación agroclimática encontrada, con la ubicación de las plantaciones actuales en los municipios, se observa que en el municipio de Actopan, que en su totalidad tiene superficie Apta, se reportan 4038 ha cultivadas siendo el municipio con

mayor superficie cultivada con mango en el estado de Veracruz, sin embargo, el municipio de Tenampa tiene 80 ha cultivadas con mango; estos dos municipios juntos tienen el 15% de la superficie cultivada con mango en el estado; 30 municipios que presentan las categorías: Apta y Moderadamente Apta tienen 13972 ha y representa el 51% de la superficie cultivada con mango en el estado; el restante 34% de la superficie con mango se ubica en 87 municipios que cuentan con categoría Moderadamente Apta. Además se encontraron 38 municipios con la categoría No Apta para el cultivo de mango “Manila”. Por lo anterior, se sugiere reorientar el cultivo de este frutal procurando que se realice en las áreas geográficas con mejor

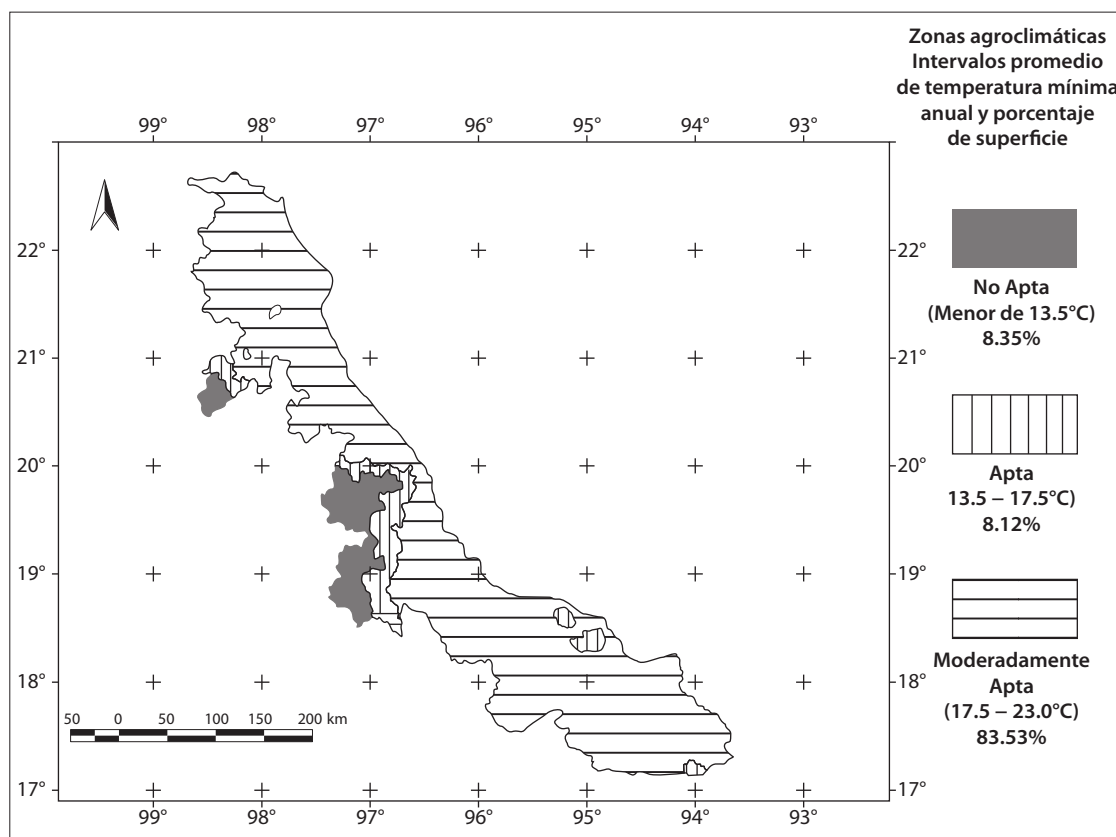


Figura 6. Mapa de regiones agroclimáticas para el cultivo de mango "Manila" para el estado de Veracruz, México.

aptitud agroclimática para dicho cultivo en este estado.

CONCLUSIONES

El modelo empírico para estimar la evaporación media mensual y el modelo lineal que relaciona un factor geográfico, en este caso la altura sobre el nivel del mar con la temperatura mínima anual, presentan un buen ajuste con un alto coeficiente de determinación (r^2) entre las variables analizadas y sirvieron para estimar datos climáticos utilizados en este estudio. El procedimiento usado en este trabajo, a diferencia de los comúnmente empleados

para realizar una zonificación agroclimática, utiliza herramientas matemática/estadísticas que mediante la técnica de ACP con las gráficas hidro-termales, permitió definir un índice agroclimático simple, en este caso, la temperatura mínima anual que relaciona la temperatura que el mango necesita para inducir la floración. Además de definir dos grupos de localidades con agroclimas diferentes y determinar tres regiones geográficas con diferente aptitud agroclimática para el cultivo de mango "Manila" en el estado de Veracruz, mismas que al ser definidas facilitan a los planificadores y productores frutícolas su aplicación práctica para decidir los lugares donde existen mejores

Tabla 6. Municipios y grado de Aptitud agroclimática para el cultivo de mango “Mamila” en el estado de Veracruz

Apta	Apta y Moderadamente Apta	Moderadamente Apta				No Apta	
1 Actopan	3 Ángel R. Cabada	33 Acayucan	63 Higo, El	93 San Juan Evangelista	120 Acajete	150 Tlacolulan	
2 Tenampa	4 Apazapan	34 Acula	64 Ignacio de la Llave	94 Sayula de Alemán	121 Acatlan	151 Tlalnelhuayocan	
	5 Benito Juárez	35 Agua Dulce	65 Isla	95 Soconusco	122 Acultzingo	152 Tlaquilpan	
	6 Catemaco	36 Alvarado	66 Ixhuatlan del Sureste	96 Soledad de Doblado	123 Alpatlahuac	153 Tomatlán	
	7 Chicontepec	37 Amatitlán	67 Xmatlahuacan	97 Tamalin	124 Aquila	154 Tonayan	
	8 Choapas, Las	38 Amatlán Tuxpan	68 Jaltipan	98 Tamiahua	125 Astacinga	155 Vigas de Ramírez, Las	
	9 Chontla	39 Antigua, La	69 Jamapa	99 Tamiahua	126 Atlahuilco	156 Villa Aldama	
	10 Citlaltépetl	40 Boca del Río	70 Jesús Carranza	100 Tampico Alto	127 Atzacan	157 Xoxocotla	
	11 Coahuatlan	41 Camarón de Tejeda	71 José Azueta	101 Tantima	128 Ayahualulco		
	12 Comapa	42 Carrillo Puerto	72 Juan R. Clara	102 Tantoyuca	129 Banderilla		
	13 Cuitláhuac	43 Castillo de Teayo	73 Lerdo de Tejada	103 Tecolutla	130 Calchahuaco		
	14 Emiliano Zapata	44 Cazones de Herrera	74 Manlio Fabio Altamirano	104 Tempapache	131 Camerino Z. Mendoza		
	15 Filomeno Mata	45 Cerro Azul	75 Martínez de la Torre	105 Tempoal	132 Chiconquiaco		
	16 Hueyapan de Ocampo	46 Chacaltianguis	76 Mecatlán	106 Texistepec	133 Chocaman		
	17 Ixcatepec	47 Chalma	77 Medellín	107 Tierra Blanca	134 Coacoatzintla		
	18 Ixhuatlan de Madero	48 Chiconamel	78 Moloacan	108 Tihuatlán	135 Coscomatepec		

19 Jalcomulco	49 Chinameca	79 Nanchital de L. Cárdenas	109 Tlacojalpan	136 Ixhuatlancillo
20 Minatitlan	50 Chinampa de Gorostiza	80 Nautla	110 Tlacotalpan	137 Landero y Coss
21 Omealca	51 Chumatlan	81 Oluta	111 Tlaxiaco	138 Maltrata
22 Pajapan	52 Coatzacoalcos	82 Otatitlan	112 Tres Valles	139 Mariano Escobedo
23 Paso del Macho	53 Coatzintla	83 Oteapan	113 Tuxpan	140 Miahuatlan
24 Puente Nacional	54 Colipa	84 Ozuluama	114 Tuxtilla	141 Nogales
25 San Andres Tuxtla	55 Cosamaloapan	85 Panuco	115 Ursulo Galván	142 Perla, La
26 Santiago Tuxtla	56 Cosoleacaque	86 Papantla	116 Veracruz	143 Perote
27 Tancoco	57 Cotaxtla	87 Paso de Ovejas	117 Zaragoza	144 Rafael Lucio
28 Tepetzintla	58 Coxquihui	88 Platón Sánchez	118 Zentla	145 Reyes, Los
29 Tlacotepec de Mejia	59 Coyutla	89 Playa Vicente	119 Zozocolco de Hidalgo	146 San Andrés Tenejapan
30 Vega de Alatorre	60 Espinal	90 Poza Rica de Hidalgo		147 Soledad Atzompa
31 Yanga	61 Gutiérrez Zamora	91 Pueblo Viejo		148 Tehuipango
32 Zontecomatlan	62 Hidalgotitlan	92 Salta barranca		149 Texhuacan

condiciones agroclimáticas para establecer y desarrollar con éxito este cultivo.

REFERENCIAS

CNA (2006), *Normales Climatológicas (1961-1990)*, Comisión Nacional del Agua [http://smn.cna.gob.mx/; 5 de febrero 2006].

CONABIO (1998), "Climas (Clasificación de Köppen, modificado por Enriqueta García)", escala 1:1 000 000, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México (digitalizado) [CD].

Chiaikiattiyos, S. A., C. M. Menzel and T. S. Rasmussen (1994), "Floral induction in tropical fruit trees: effects of temperature and water supply", *The Journal of Horticultural Science*, 69(3), pp. 397-415.

FAO (2005), *Estadísticas agrícolas de la FAO*, Food and Agriculture Organization [http://faostat.fao.org/faostat/collections?subset=agriculture; 5 de febrero de 2005].

Felicísimo, A. M. y M. A. Álvarez (1982), "Aplicación del análisis de componentes principales al régimen termopluviométrico de Asturias", *Avances sobre la Investigación en Bioclimatología*, VII Simposio de Bioclimatología, Sevilla, pp. 565-581.

Galán, S. V. (2000), *El cultivo del mango*, Editorial Mundi-Prensa, Madrid, España.

Holden, N. M. and A. J. Brereton (2004), "Definition of agroclimatic regions in Ireland using hydrothermal and crop yield data", *Agricultural and Forest Meteorology*, 122(4), pp. 175-191.

IMTA (2000), *Sistema de Información Climatológica (SICLIM) para computadoras personales*, México, 5319 Estaciones, Período 1921-1990, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Base de datos [cd-rom].

INEGI (2005a), *Anuario Estadístico, Gobierno del Estado de Veracruz, México*, tomos I y II, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

INEGI (2005b), *Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

León-Arteta, R. y M. J. Pérez (1996), "Fertilización y clima en la producción del mango "Manila" en Veracruz, México", *TERRA Latinoamericana*, 14(4), pp. 395-405.

Manly, B. F. (1994), *Multivariate Statistical Methods, A primer*. Department of Mathematics and Statistics University of Otago New Zealand, Chapman and Hall, London.

Mallants, D. and J. Reyen (1990), "Defining homogeneous precipitation by means of principal components analysis", *Journal of Applied Meteorology*, vol. 29, no. 9, pp. 892-900.

Mata, B. I. y V. R. Mosqueda (1998), *La producción del mango en México*, Limusa, México.

Mosqueda, V. R., F. de los Santos de La Rosa, L. E. Becerra, M. H. Cabrera, Z. D. Ortega y P. A. Lid del Ángel (1996), *Manual para cultivar mango en la planicie costera del golfo de México*, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Golfo Centro, Centro de Investigación Regional, Campo Experimental Cotaxtla, Folleto Técnico, núm. 15, Veracruz, México.

Núñez, E. R. and T. L. Davenport (1994), "Flowering of mango trees in containers as influenced by seasonal temperature and water stress", *Scientia Horticulturae*, 58 (1-2), pp. 57-66.

Osuna, E. T., E. M. Engleman, R. E. Becerril, V. R. Mosqueda, H. M. Soto y M. A. Castillo (2000), "Iniciación y diferenciación floral en mango "Manila"", *Agrociencia*, 34(5), pp. 573-581.

Paterson, J. G., N. A. Goodchil and W. J. Boyd (1978), "Classifying environments for sampling purposes using a principal component analysis of climatic data", *Agricultural Meteorology*, 19(4), pp. 349-362.

Pedraza-Oropeza, F., E. Mejía-Sáenz, B. Cuevas-Renaud, A. Exebio-García y J. Oropeza-Mota (2005), "Desarrollo de un Sistema Generador de Modelos Altimétricos para la República Mexicana", *TERRA Latinoamericana*, 23 (2), pp. 191-199.

Prescott, J. A. (1940), "Evaporation from a water surface in relation to solar radiation", *Trans. R. Soc. Sci. Australia*, 64, pp. 114-125.

SAS Institute Inc. (1989), *Statistical Analysis System (Software)*, Release Ver. 6.12. TS020. Copyright (c) 1989-1996 by Licensed to NORTH CAROLINA STATE UNIVERSITY, Site 0027585007.

Tejeda, A, and A. Vargas (1996), "A correlation between visual observations and instrumental records of cloudiness in Mexico", *Geofísica Internacional*, 35(4), pp. 421-424.

Varela, C., E. Ilda y M. Varna (2002), "Aplicación del Método de Componentes Principales a la determinación de regiones homogéneas de precipitación", *Revista Argentina de AGROMETEOROLOGÍA*, 1(2), pp. 105-112.

Whiley, A. W. (1993), "Environmental effects on phenology and physiology of mango a review", *Acta Horticulturae*, 341, pp. 168-171.

White, D. H., G. Lubulwa, K. Menz, H. Zuo, W. Wint and J. Slingenbergh (2001), "Agroclimatic classification systems for estimating the global distribution of livestock numbers commodities", *Environment internacional*, 27(2-3), pp. 181-187.

Zamudio, F. y A. Alvarado (2000), *Notas de métodos multivariados I*, Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales, Chapingo, México.