

Clasificación de regiones para la producción en invernaderos utilizando análisis multivariado

Classification of regions for greenhouse production using multivariate analysis

Carlos A. Garza-Alonso¹

Emilio Olivares-Sáenz¹

Rigoberto E. Vázquez-Alvarado¹

Nora E. García-Treviño¹

¹ Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Agronomía

Autor para correspondencia: Emilio Olivares-Sáenz, E-mail: emolivares@gmail.com

Resumen

Introducción: La producción de cultivos en invernadero ha crecido considerablemente en los últimos años. La temperatura es un factor importante que debe considerarse cuando se pretende incursionar en la agricultura protegida. Las altas y bajas temperaturas influyen en el desarrollo de los cultivos, por lo que es la principal variable climática que debe ser considerada para seleccionar la zona más adecuada para la instalación de invernaderos.

Método: La clasificación de regiones se llevó a cabo con datos de 22 localidades del Estado de Nuevo León, utilizando dos metodologías: una considera las temperaturas medias mensuales externas al invernadero, y otra mediante análisis de conglomerados. El criterio de clasificación de las temperaturas externas fue el siguiente: cuando las temperaturas medias mensuales externas eran inferiores a 15 °C se clasificó como “mes frío”; en temperaturas en el rango de 15 a 22 °C se clasificó como “óptimo”; en temperaturas en el rango de 22 a 27 °C se clasificó como “caliente”; y temperaturas mayores a 27 °C se clasificó como “muy caliente”. También se realizó una estratificación de las localidades utilizando un análisis multivariado de análisis de conglomerados con el método de las k-medias, considerando como variables la altura sobre el nivel del mar y la

temperatura media anual. Además, se realizaron análisis de correlación entre las variables altura sobre el nivel del mar (asnm) y temperatura media mensual.

Resultados: Los resultados mostraron que la metodología utilizada permite clasificar distintas regiones en función de la temperatura media. En cuanto al análisis de clasificación utilizando estadística multivariada, el análisis de k-medias para k=4 identificó cuatro grupos, de los cuales el uno y el dos pertenecen a las localidades con asnm mayores a 1700 m; y los grupos tres y cuatro a las localidades con asnm menores a 600 m.

Considerando ambos métodos de clasificación se concluyó que la región alta presenta mejores condiciones para instalar invernaderos, y dentro de esta región, las localidades de menor asnm. Dentro de la región baja son preferibles las localidades de mayor asnm. Considerando los análisis de correlación de Pearson y Sperman, se encontró que la asnm puede ser un indicador para definir regiones adecuadas para producir en invernadero.

Conclusión: El análisis multivariado de k-medias para clasificar conjuntos de datos de acuerdo con un predeterminado número de grupos resultó una estrategia adecuada para clasificar regiones para instalar invernaderos, aunado a otras metodologías como la basada en temperaturas medias mensuales, la cual se describe en la presente publicación.

Palabras clave: estratificación; horticultura; k-medias; temperatura; invernaderos; cultivos

Abstract

Introduction: Protected agriculture has grown considerably in recent years. Temperature is a very important factor that must be considered in greenhouse crop production. The high and low temperatures influence the crops production. Therefore, the temperature is the main climate variable to select an area to install a greenhouse.

Method: Regions classification was carried out with data of 22 locations in the State of Nuevo Leon using two methodologies, one considering the mean monthly temperature external to the greenhouse and another method of classification using multivariate analysis. The criterion of classification using monthly temperatures was: when average monthly external temperatures were below 15 °C it was classified as "cold month"; Temperatures in the range of 15 to 22 °C were classified as "optimal"; Temperatures in the range of 22 to 27 °C were classified as "hot" and temperatures above 27 °C were classified as "very hot". A stratification of the localities was also carried out using the multivariate model of cluster analysis with the height above sea level

and the annual average temperature as variables. In addition, a correlation analysis was performed between the height average and monthly temperatures.

Results: Results showed that the methodology used allows to classify different regions according to the average monthly temperatures. Regarding the classification analysis using multivariate statistics, the k-means analysis for $k = 4$ identified four groups, of which the one and two belong to the high localities and the three and four groups to the lower localities. Considering both classification methods, it was concluded that the high region presents better probabilities of success for the greenhouse production and within this region, the lower asnm localities are more suitable and in the lower region the higher asnm localities are preferable. Considering the correlation analyzes of Pearson and Sperman, it was found that the asnm can be an indicator to define suitable regions to produce in the greenhouse.

Conclusion: The multivariate analysis of k-means to classify data sets according to a predetermined number of groups was an adequate strategy to classify regions to install greenhouses, together with other methodologies such as the one based on monthly average temperatures, which is described in the present publication.

Keywords: stratification; horticulture; k-means; temperature; greenhouses; crops

Recibido en: 16-08-2019

Aceptado en: 08-11-2019

Introducción

La producción de hortalizas en invernadero se extendió en México en forma considerable en las últimas dos décadas; en el 2003 había 132 ha y para el 2017 la agricultura protegida creció hasta 42,515 ha (SIAP, 2019) El incremento de la superficie protegida se ha dado sin estudios previos de las condiciones climáticas de las zonas y en muchos casos se ha fracasado debido a instalaciones inadecuadas, sobre todo en zonas climáticas extremas (Sánchez y Moreno, 2017).

La temperatura es un factor muy importante que se debe tomar en cuenta cuando se pretende incursionar en la agricultura protegida, debido a que las temperaturas en el interior del invernadero se incrementan considerablemente comparadas con las temperaturas exteriores, sobre todo en invernaderos donde el control climático se lleva a cabo de forma pasiva, los cuales no cuentan con una adecuada ventilación debido al tipo y tamaño de ventanas, mallas antiáfidos de baja porosidad, entre otros factores (Flores *et al.*, 2011). Las altas y bajas temperaturas en el invernadero influyen en el desarrollo de los cultivos, en las tasas de respiración y la fotosíntesis, lo que impacta en el rendimiento y la calidad de los productos (Van Der Ploeg y Huevelink, 2005).

El tomate es la hortaliza más sembrada bajo condiciones de invernadero en México. En este cultivo, las temperaturas superiores a 35 °C afectan la fructificación por mal desarrollo de óvulos, fertilidad del polen, aborto de flores, además también se ve afectado el desarrollo de la planta en general y el sistema radicular. Temperaturas inferiores a 10 °C retardan la germinación de la semilla, inhibe el desarrollo vegetativo, reduce el amarre de frutos e impide una maduración adecuada (Benton, 2007). La maduración del fruto está muy influida por la temperatura en lo referente a la precocidad y coloración. En general, se debe tener en cuenta las interacciones de la temperatura con otros parámetros climáticos debido a que el efecto conjunto de los factores afecta la actividad metabólica celular, absorción de agua y nutrientes, intercambio gaseoso, la producción y gasto de carbohidratos y la actividad de los reguladores del crecimiento (Taiz *et al.*, 2014).

La temperatura óptima para hortalizas de fruto depende de la etapa de desarrollo. Sánchez y Moreno (2017) presentan las temperaturas óptimas, mínimas y máximas diarias en diferentes etapas de desarrollo (Tabla 1).

Tabla 1. Temperaturas óptimas, mínimas y máximas diarias en diferentes etapas de desarrollo de hortalizas de fruto.

Table 1. Optimum, minimum and maximum daily temperatures on different growth stages of fruit vegetables.

Etapa	Rango óptimo (°C)	Mínima y Máxima (°C)
Germinación	25-28	10 y 35
Plántula Día	20-25	15 y 35
Plántula Noche	18-20	10 y 22

Vegetativo Día	20-25	15 y 35
Vegetativo Noche	15-18	10 y 20
Reproductivo Día	20-25	15 y 35
Reproductivo Noche	15-18	10 y 20

La temperatura del aire dentro del invernadero se debe al balance energético que resulta de la radiación solar y el diseño del invernadero. Por la noche las temperaturas dentro del invernadero son semejantes a las del exterior o de 1 a 3 °C superior, mientras que en el día la temperatura dentro del invernadero se incrementa debido a que ingresa radiación y no hay una salida rápida del aire caliente, lo cual depende de las características del invernadero, tales como, altura a la canaleta y al cenit, porcentaje de superficie de ventilación, tiempo de renovación del aire, tipos de ventanas laterales y cenitales, así como las características del plástico y mallas. En invernaderos pasivos, la temperatura al interior del invernadero puede ser excesiva para el desarrollo de los cultivos (Flores *et al.*, 2011). La temperatura es la principal variable climática que se debe de considerar para seleccionar la zona más adecuada para instalar los invernaderos.

México tiene diferentes regiones climáticas en donde se están construyendo invernaderos, sin embargo, no hay estudios sobre la factibilidad climática de cada una de las regiones para una adecuada producción en invernaderos, por lo que el objetivo de este proyecto fue establecer una metodología de clasificación de regiones para determinar las más adecuadas para establecer proyectos de agricultura protegida.

Método

Para establecer la relación entre la temperatura externa y la temperatura interna de los invernaderos, se realizó un análisis de regresión con datos obtenidos de un invernadero tipo gólico ubicado en la Facultad de Agronomía de la UANL en el municipio de Gral. Escobedo, N. L., en donde se registraron las temperaturas diarias internas y externas al invernadero utilizando

un DataLogger Watch Dogs. Los datos de las temperaturas fueron relacionados con un análisis de regresión utilizando el paquete SPSS, seleccionando el mejor modelo con mayor ajuste de R^2 .

La temperatura media mensual externa al invernadero se puede utilizar como criterio para clasificar los meses adecuados para el óptimo desarrollo de los cultivos en determinada región. Para clasificar un mes específico se utilizó el criterio de Castilla (2004), el cual fue desarrollado considerando las temperaturas mínimas, óptimas y máximas de desarrollo de los principales cultivos en invernadero. El método consiste en lo siguiente: cuando las temperaturas medias mensuales son inferiores a 15 °C se clasifica como “mes frío”; temperaturas en el rango de 15 a 22 °C se clasifica como “mes óptimo”; temperaturas en el rango de 22 a 27 °C se clasifica como “mes caliente” y temperaturas mayores a 27 °C se clasifica como “mes muy caliente”. En un mes clasificado como “frío” es necesario utilizar calefacción, en un mes clasificado como “caliente” es posible tener cultivos en el invernadero, pero se requieren algunas estrategias para enfriar el invernadero y en el caso de “muy caliente” es inviable la producción en invernadero para ciertos cultivos. Con base en este criterio es posible definir los meses en donde ocurren las mejores condiciones climáticas en diferentes regiones para producir cultivos en invernadero.

Utilizando el criterio antes descrito, se realizó una estratificación de 24 localidades en donde se encuentran estaciones meteorológicas de la Fundación PRODUCE N. L., A. C. (Tabla 2).

Tabla 2. Localidades incluidas en el análisis de clima mediante la altitud y la temperatura media anual.

Table 2. Locations included in the climate analysis using altitude and mean annual temperature.

Localidad, municipio	Altitud (msnm)	Temperatura Media (°C)
Ciénega del Toro Galeana	2138	12.4
L. de Sánchez, Santiago	1894	13.7
La Ascensión, Aramberri	2003	14.0
Casa Blanca, Galeana	1887	14.5
Cerro de Agua, Galeana	1883	14.8
El Berrendo, Galeana	1897	15.0
San J. de Raíces, Galeana	1878	15.0
El Cuije, Galeana	1896	15.4
Sandia, Aramberri	1770	16.5
Bustamante, Bustamante	425	21.1
Altavista, Linares	427	21.1
El Barretal, Hualahuises	446	21.5

El Naranjo, Montemorelos	593	21.7
Sabinas Hidalgo, Sabinas	274	21.9
Allende, Allende	419	21.9
Rancho María J., Cadereyta	307	21.9
Chihuahuita, Cadereyta	307	21.9
Vivero El Llano, Mont.	360	22.05
INIFAP, Gral. Terán	262	22.2
Fac. de Agronomía, Marín	355	22.3
San Isidro, Los Ramones	250	22.6
CRFGV-UANL, Vallecillo	192	22.4
Rancho El Popote, Linares	293	22.6
La Barreta, China	120	23.0

Para cada localidad se identificaron los meses con condiciones: frías, óptimas, calientes y muy calientes con codificación 1, 2, 3 y 4 en la Tabla 3, respectivamente.

Tabla 3. Clasificación de las localidades en cada mes utilizando el criterio descrito por Castilla (2004) en cada mes del año: **1** = Requiere calefacción; **2** = Temperatura óptima; **3** = Se requiere enfriar el invernadero; y **4** = Calor excesivo.

Table 3. Classification of locations in each month using the criteria described by Castilla (2004) in each month of the year: **1** = Requires heating; **2** = Optimal temperature; **3** = Greenhouse cooling is required; and **4** = Excessive heat.

Localidad	Mes											
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Ciénega del Toro Galeana	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1
L. de Sánchez, Santiago	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1
La Ascensión, Aramberri	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1
Casa Blanca, Galeana	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1
Cerro de Agua, Galeana	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1
El Berrendo, Galeana	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1
San J. de Raíces, Galeana	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	1	1
El Cuije, Galeana	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	1	1
Sandia, Aramberri	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	1	1
Bustamante, Bustamante	1	2	2	3	3	4	4	4	3	2	2	1
Altavista, Linares	1	2	2	3	3	3	3	3	3	2	2	1
El Barretal, Hualahuises	1	2	2	3	3	4	4	3	3	2	2	1
El Naranjo, Montemorelos	1	2	2	3	3	4	4	4	3	2	2	1
Sabinas Hidalgo, Sabinas	1	2	2	3	3	4	4	4	3	2	2	1
Allende, Allende	1	2	2	3	3	4	4	4	3	2	2	1
Rancho María J., Cadereyta	1	2	2	3	3	4	4	4	3	3	2	1
Chihuahuita, Cadereyta	1	2	2	3	3	4	4	4	3	3	2	1
Vivero El Llano, Mont.	1	2	2	3	3	4	4	4	3	3	2	1
INIFAP, Gral. Terán	1	2	2	3	3	4	4	4	3	3	2	1

Fac. de Agronomía, Marín	1	2	2	3	4	4	4	4	3	3	2	1
San Isidro, Los Ramones	1	2	2	3	4	4	4	4	3	3	2	1
CRFGV-UANL, Vallecillo	1	2	2	3	4	4	4	4	3	3	2	1
Rancho El Popote, Linares	1	2	2	3	3	4	4	4	3	3	2	1
La Barreta, China	1	2	2	3	4	4	4	4	3	3	2	2

Otro de los métodos utilizados para la estratificación de las localidades fue el análisis de conglomerados con el método de las k-medias, considerando como variables a la altura sobre el nivel del mar y la temperatura media anual (promedio de temperaturas medias mensuales). Este método considera la partición de los individuos en k grupos, en donde k es predeterminado (Ferran-Aranaz, 2001). En este estudio se seleccionó k=4, k=5 y k=6. La selección de estos valores predeterminados de grupos se debió a que un análisis preliminar mostró dos grupos muy discrepantes definidos por las partes altas y bajas del Estado de Nuevo León y se esperaba una sub clasificación dentro de cada grupo.

Otros análisis estadísticos realizados fueron un análisis de correlación de Pearson entre las variables altitud y temperatura media mensual, así como un análisis de correlación de Spearman para las variables altitud y el promedio de los índices que se presentan en la Tabla 3. Adicionalmente, se realizaron análisis de regresión con las variables de altitud y temperatura media mensual.

Resultados y discusión

En el análisis de la relación de las temperaturas diarias externas e internas del invernadero mediante modelos de regresión se encontró una relación altamente significativa ($p<0.01$), donde el modelo cúbico obtuvo el mayor ajuste, con un R^2 de 0.867 (Fig. 1). El modelo mostró que a temperaturas superiores a 25 °C la temperatura en el invernadero se incrementa en forma exponencial, lo que indica que en regiones con altas temperaturas puede verse afectado el crecimiento y desarrollo de los cultivos. El modelo final fue: $Y = 4.665 + 1.619X - 0.79X^2 + 0.002X^3$. Donde: Y = Temperatura del invernadero (°C); X= Temperatura externa (°C).

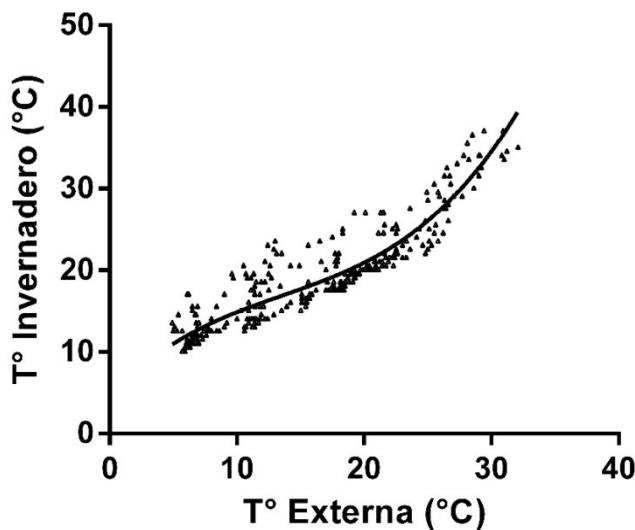


Fig. 1. Modelo de regresión entre la temperatura media diaria externa y la temperatura media diaria en el interior del invernadero.

Fig. 1. Regression model between external and internal mean daily temperature in the greenhouse.

Los resultados anteriores coinciden con los reportados por Serrano (2005), mostrando la misma tendencia en el aumento de la temperatura del invernadero con respecto a la temperatura externa. Estos resultados muestran que la temperatura externa pudiera utilizarse como indicador productivo de cultivos en invernadero, como se plantea en el criterio de clasificación presentado por Castilla (2004).

Considerando la metodología de temperaturas externas, los resultados mostraron que las regiones analizadas se clasificaron en dos grandes grupos, los cuales están relacionados con la altura sobre el nivel del mar (asn_m) (Tabla 2), a estas regiones les llamaremos región alta (asn_m>1700) y región baja (asn_m<600).

En la región alta se encuentran los municipios de Galeana, Aramberri, y la sierra de Santiago, en donde están ubicadas estaciones meteorológicas con un rango de altitud de 1770 a 2138 m. Las temperaturas medias anuales en estas regiones están entre 12.43 a 16.52 °C (Tabla 2). Desde el punto de vista de la clasificación fisiográfica de las regiones, la región alta corresponde a la “Provincia Sierra Madre Oriental” y subprovincias “Pliegues Saltillo Parras”, “Sierras Transversales”, “Gran Sierra Plegada”, y “Sierras y Llanuras Occidentales” (INEGI, 2019).

En la región baja se encuentran los municipios de Bustamante, Linares, Hualahuises, Montemorelos, Sabinas Hidalgo, Allende, Cadereyta, Gral. Terán, Marín, Los Ramones, Vallecillo y China. Las estaciones meteorológicas analizadas en estos municipios se encuentran en un rango de altitud de 120 a 593 msnm y las temperaturas medias anuales en estas regiones están en el rango de 21.12 a 23.02 °C (Tabla 2). En cuanto a la clasificación fisiográfica, estas localidades están en la Provincia “Gran Llanura de Norteamérica”, con subprovincias “Llanura de Coahuila y Nuevo León” y “Llanuras y Lomeríos”, también incluye una parte de la “Provincia Sierra Madre Oriental”, en particular la subprovincia “Sierras y Llanuras Coahuilenses” (INEGI, 2019).

Considerando la misma metodología de clasificación citada por Castilla (2004), en la región alta se clasificaron tres subregiones. El estrato con mejores condiciones corresponde a las localidades de San José de Raíces, El Cuije y Sandia, en donde se cuenta con siete meses del año (abril-octubre) con temperaturas aceptables para la producción, sin embargo, si se invierte en calefacción, el período de producción se puede ampliar. El segundo estrato incluye a cinco localidades: Laguna de Sánchez, La Ascensión, Casa Blanca, Cerro de Agua y El Berrendo, las cuales presentan temperaturas adecuadas para la producción durante seis meses (Abril-Septiembre). Por último, en la región alta se encontró a la localidad de Ciénaga del Toro como la más desfavorable para practicar agricultura protegida debido a que sólo cuenta con cuatro meses (Mayo-Agosto) con clima favorable para realizar esta actividad (Tabla 3).

En la región baja se identificaron tres grupos: En el primer grupo se puede producir adecuadamente durante cuatro meses, estos son: Bustamante, Altavista, El Barretal, El Naranjo, Sabinas Hidalgo y Allende. Estas localidades se encuentran en un rango de altitud de 274 a 593 m y son las que tienen mayor altitud en la parte baja del Estado, a excepción de Sabinas Hidalgo (Tabla 2); el segundo grupo está integrado por las localidades de Rancho María Josefina, Chihuahuita, Vivero El Llano, INIFAP, Facultad de Agronomía, San Isidro y CRFGV-UANL, las cuales presentan tres meses con temperaturas óptimas para la producción de cultivos en invernadero, sin embargo, en los meses fríos es posible tener cultivos con calefacción en el invernadero sin la necesidad de utilizar mucha energía debido a que las temperaturas no son extremosas en la mayoría de los años. Por último, hay dos localidades en donde se encontraron cuatro meses óptimos debido a que un mes que se clasificó como frío en el grupo anterior, en este grupo se clasifica como adecuado; estas localidades son Rancho El Popote, Linares y La Barreta,

China. Estas localidades son las de menor altura y de mayor temperatura media, por lo que se pueden clasificar como las menos adecuadas para la producción de tomate en invernadero.

En cuanto al análisis de clasificación utilizando estadística multivariada, el análisis de k-medias para $k = 4$ identificó cuatro grupos, los grupos uno y dos pertenecen a las localidades altas del Estado de Nuevo León y los grupos tres y cuatro a las localidades bajas. En las partes altas se agrupan, como las más extremosas en clima, a las localidades de Ciénaga del Toro, Laguna de Sánchez, La Ascensión, Casa Blanca, Cerro de Agua y El Berrendo, y las más adecuadas para producir en invernadero a las localidades de San José de Raíces, El Cuije y Sandia (Tabla 4).

Tabla 4. Clasificación de regiones mediante análisis de conglomerados con el método de k-medias para $k=4$, $k=5$ y $k=6$.

Table 4. Classification of regions by cluster analysis using the k-means method for $k=4$, $k=5$ and $k=6$.

Localidad	k=4	k=5	k=6
Ciénega del Toro, Galeana	1	1	1
L. de Sánchez, Santiago	1	2	2
La Ascensión, Aramberri	1	1	2
Casa Blanca, Galeana	1	2	2
Cerro de Agua, Galeana	1	2	2
El Berrendo, Galeana	1	2	2
San J. de Raíces, Galeana	2	2	2
El Cuije, Galeana	2	2	2
Sandia, Aramberri	2	2	3
Bustamante, Bustamante	3	4	4
Altavista, Linares	3	4	4
El Barretal, Hualahuises	3	4	4
El Naranjo, Montemorelos	3	3	5
Sabinas Hidalgo, Sabinas	3	5	6
Allende, Allende	3	4	4
Rancho María J., Cadereyta	3	4	4
Chihuahuita, Cadereyta	3	4	4
Vivero El Llano, Mont.	3	4	4
INIFAP, Gral. Terán	4	5	6
Fac. de Agronomía, Marín	4	4	4
San Isidro, Los Ramones	4	5	6
CRFGV-UANL, Vallecillo	4	5	6
Rancho El Popote, Linares	4	5	6
La Barreta, China	4	5	6

El análisis de k medias para k=5 mostró que en la región alta se identificaron dos grupos, situando a las localidades Ciénega del Toro y La Ascensión como las más extremosas y las otras localidades de la región alta en el mismo nivel y con las mejores condiciones climáticas para cultivar en invernaderos. En esta misma región, para k=6, se clasificó únicamente a Ciénega del toro como la más extremosa y las otras localidades de la región alta al mismo nivel, excepto la localidad de Sandia, la cual se identificó como la de mejor clima.

En el análisis para k=4, en la región baja se identificaron las siguientes localidades con mejor clima para la producción en invernaderos: El Naranjo, seguido por Bustamante, Altavista, El Barretal, Allende, Rancho María Josefina, Chihuahuita y Vivero El Llano. Finalmente, en el grupo con menores posibilidades de éxito para cultivos en invernadero se identificaron seis localidades, las cuales coinciden con las de menor altitud. Para k=5 y k=6 los resultados fueron similares a los descritos anteriormente (Tabla 4).

El análisis de correlación entre la altitud y la temperatura media anual mostró una correlación de -0.990 ($p<0.01$), lo que indica que la temperatura media es inversamente proporcional a la altura, con una relación muy alta. El análisis de correlación para las localidades de la parte alta resultó con un coeficiente de -0.652 ($p<0.01$) y de la parte baja de -0.751 ($p<0.01$).

Por otro lado, los análisis de regresión lineal registraron una relación altamente significativa ($p<0.01$) entre las variables de altitud y temperatura media mensual para ambas regiones. Para la zona baja, se encontró un R^2 de 0.55, donde el modelo final estimado fue: $Y = 23.15 - .003X$ (Fig. 2A). Con base en el modelo anterior, se concluye que, por cada metro de aumento en la altitud, la temperatura media disminuye 0.003 °C. En cuanto a la zona alta, se encontró un R^2 de 0.80, donde el modelo final estimado fue: $Y = 34.04 - 0.10X$ (Fig. 2B). Con base en el modelo anterior, se concluye que, por cada metro de aumento en la altitud, la temperatura media disminuye 0.10 °C. Los análisis de regresión en ambas regiones demuestran la disminución de la temperatura media conforme aumenta la altitud, sin embargo, en la región alta se encontró una mayor pendiente en el modelo, comparada con la región baja, lo cual debe considerarse cuando se pretenda establecer un proyecto de agricultura protegida.

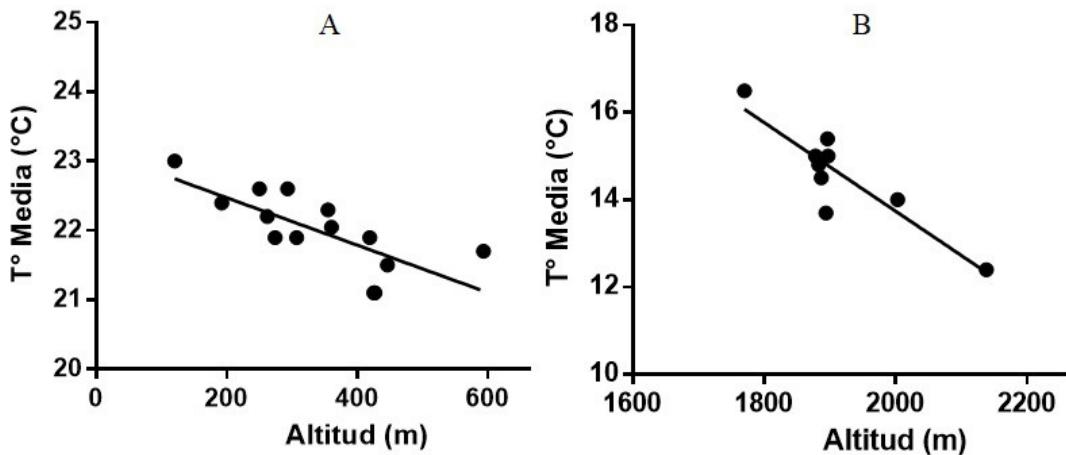


Fig. 2. Modelos de regresión entre la altitud y temperatura media. **A:** Región baja; **B:** Región alta

Fig. 2. Regression models between altitude and mean temperature. **A:** Low region; **B:** High region.

Para la región alta, se obtuvo el promedio de los índices sobre todos los meses del año que se presentan en la Tabla 2, en donde se observa que entre mayor sea el promedio de los índices indica que hay mejores condiciones para la producción de cultivos en invernadero. Este promedio se correlacionó con la altitud utilizando el método no paramétrico de Spearman, encontrando un coeficiente de correlación de -0.671 ($p<0.05$), lo que indica que se puede utilizar la altitud como un indicador preliminar para conocer la factibilidad de éxito en alguna localidad en la producción de cultivos en invernadero; debido a que el coeficiente es negativo, se deduce que las localidades de la región alta con menor altitud tendrán el mayor índice, indicando mejores condiciones para la producción de tomate en invernadero. En la región baja también se utilizó este procedimiento, encontrando un coeficiente de correlación de Spearman de -0.605 ($p<0.01$); en esta región las temperaturas altas son el factor limitante, por lo que el coeficiente negativo indica que las altitudes más bajas tienen un promedio del índice mayor, por lo que tendrían condiciones más pobres para producir en invernadero.

Considerando el criterio de las correlaciones de Spearman, en la región alta se seleccionarían las localidades con menor altitud debido a que presentan el mayor número de meses con temperaturas óptimas para la producción de tomate y en la región baja, por el contrario, se seleccionarían las localidades con mayor altitud, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Clasificación de meses del año para producir tomate en invernadero en 24 localidades utilizando los métodos de Castilla (2004), k-medias y correlación de Spearman.

Table 5. Classification of months to produce tomato in greenhouse in 24 localities using the methods of Castilla (2004), k-means and Spearman correlation.

Localidad	Altitud (m)	Temperatura media (°C)	Región	Métodos*		
				1	2	3
Ciénega del Toro, Galeana	2138	12.4	ALTA	F	F	F
La Ascensión, Aramberri	2003	14		F	F	F
El Berrendo, Galeana	1897	15		F	O	O
El Cuije, Galeana	1896	15.4		O	O	O
L. de Sánchez, Santiago	1894	13.7		F	O	O
Casa Blanca, Galeana	1887	14.5		F	O	O
Cerro de Agua, Galeana	1883	14.8		F	O	O
San J. de Raíces, Galeana	1878	15		O	O	O
Sandia, Aramberri	1770	16.5		O	O	O
El Naranjo, Montemorelos	593	21.7		O	O	O
El Barretal, Hualahuises	446	21.5	BAJA	O	C	O
Altavista, Linares	427	21.1		C	C	O
Bustamante, Bustamante	425	21.1		O	C	O
Allende, Allende	419	21.9		O	C	O
Vivero El Llano, Mont.	360	22.05		C	C	C
Fac. de Agronomía, Marín	355	22.3		MC	C	C
Rancho María J., Cadereyta	307	21.9		C	C	C
Chihuahuita, Cadereyta	307	21.9		C	C	C
Rancho El Popote, Linares	293	22.6		C	MC	C
Sabinas Hidalgo, Sabinas	274	21.9		O	MC	C
INIFAP, Gral. Terán	262	22.2		C	MC	MC
San Isidro, Los Ramones	250	22.6		MC	MC	MC
CRFGV-UANL, Vallecillo	192	22.4		MC	MC	MC
La Barreta, China	120	23		O	MC	MC

*1: Castilla (2004); 2: k-medias; 3: Correlaciones de Spearman. F: Frío; O: Óptimo; C: Caliente; MC: Muy Caliente.

*1: Castilla (2004); 2: k-means; 3: Spearman correlations. F: Cold; O: Optimal; C: Hot; MC: Very hot.

La región alta del Estado cuenta con siete meses óptimos para la producción de cultivos en invernadero en el período abril-octubre y con ayuda de calefacción se puede ampliar a marzo-diciembre. Este período de producción se ha comprobado en la práctica en los invernaderos de los Tecnoparques Sandia y Galeana, así como en los invernaderos Terranova, La Fortuna, El

Centenario y otros pequeños invernaderos. En esta región se trasplanta en el mes de marzo y la cosecha inicia en el mes de junio, prolongándose hasta diciembre, lo que se puede lograr utilizando calefacción en los meses de noviembre y diciembre; el período de cosecha coincide con los meses en donde se presentan los mejores precios en el mercado nacional debido a que no hay traslape con el período de cosecha del Estado de Sinaloa. Esta es una ventaja estratégica para los productores que comercializan en el mercado nacional, sin embargo, también pueden exportar en los meses de octubre-diciembre, debido a que los precios internacionales tienden a incrementarse, específicamente en Estados Unidos (USDA, 2019), principal destino de las exportaciones.

La región alta del estado cuenta con un clima en donde las temperaturas nocturnas son bajas y las diurnas óptimas o altas en el período de producción, lo que ocasiona que la planta se torne más generativa que vegetativa, además, cuenta con humedades relativas bajas, irradiación solar alta y vientos favorables que desplazan el aire caliente del invernadero. Estas condiciones propician buen desarrollo y producción de las plantas, encontrando en esta región rendimientos de tomate hasta de 450 t ha^{-1} por ciclo productivo en invernaderos de tecnología media baja (siembra en suelo con sistemas de fertiriego y sistemas de apertura de ventanas manual) y hasta 600 t ha^{-1} en invernaderos de alta tecnología (sistemas hidropónicos, procesos 100% automatizados). Sin embargo, en esta región se presentan temperaturas altas en el verano y muy bajas en el invierno, por lo que en el verano se recomienda instalar sistemas de aislamiento de radiación solar excesiva como mallas sombra o encalado y construir invernaderos con una altura mínima de 4.0 m a la canaleta (Castilla, 2004). En esta región el principal problema de clima son las temperaturas bajas, por lo que se recomienda instalar equipo que controle de una manera eficiente las temperaturas bajas, como son calentadores que emitan el calor en la parte de baja del cultivo y que éste se distribuya uniformemente en el invernadero (Sánchez del Castillo y Moreno, 2017).

La mayoría de los sistemas de calefacción que se utilizan en esta región son a base de gas butano y se encuentran situados entre 3 y 4 m de altura, sin ningún sistema de distribución del aire caliente. Por otra parte, es importante reducir las pérdidas de calor del invernadero, lo cual se puede lograr limitando las superficies de intercambio de calor del invernadero con el exterior (Kawasaki, 2010). Esto se puede lograr con la instalación de doble plástico en la cumbre con la finalidad de interponer un espacio de aire entre los dos plásticos como aislante, técnica que ha

demostrado ser efectiva en la conservación del calor (Sánchez del Castillo y Moreno, 2017). Otra tecnología que se recomienda para esta región son las pantallas térmicas en los lados del invernadero y arriba del sistema de tutoreo, para limitar el volumen de aire a calentar (González-Real y Baille, 2000).

En el presente estudio se identificó variabilidad en el clima de la región alta, debido a que hay localidades demasiado frías en donde pudiera haber un excesivo gasto en combustibles para calentar el invernadero o hacer inversiones costosas para instalar un equipo eficiente de calefacción. En las localidades más favorables para la producción en invernadero en esta región, el periodo de cultivo es durante nueve meses (marzo-noviembre), utilizando calefacción en los meses de marzo y noviembre y eventualmente en abril y octubre. Por lo que antes de instalar un invernadero es importante hacer un estudio del clima y seleccionar aquellas áreas menos frías de esta región.

En la región baja del Estado se cuenta con temperaturas demasiado calientes en el verano y con una menor cantidad de meses óptimos para la producción de cultivos en invernadero (3 a 4), comparada con la región alta del Estado (4 a 7). El período de producción es septiembre a mayo, sin embargo, en algunas áreas se pueden presentar temperaturas demasiado calientes en el mes de septiembre (mayores a 35 °C), lo que puede ocasionar aborto de flores en los primeros racimos, además, las plantas tienen un excesivo desarrollo vegetativo; por otra parte, en los meses de abril y mayo se presentan también temperaturas muy calientes, causando frutos de mala calidad y mayor incidencia de plagas como mosca blanca. Considerando lo anterior, el periodo de producción más conveniente para esta región es de octubre a marzo. En el invierno se pueden presentar bajas temperaturas en algunos días, sin embargo, pueden ser controladas con calefacción; en estos meses también se presentan vientos fuertes del norte, los cuales pueden causar daños a los plásticos. Estos factores climáticos adversos ocasionan que los rendimientos no sean tan altos como en la región alta; en la mayoría de los invernaderos de tecnología media-baja se han observado rendimientos de tomate que oscilan entre 200 y 250 t ha⁻¹.

En la región baja, el período de cosecha inicia a finales del mes de noviembre por lo que la comercialización en el mercado nacional es adecuada en los meses de noviembre, diciembre y parte de enero, cuando los precios del tomate normalmente son altos en los principales mercados de abastos del país (Ciudad de México, Guadalajara y Monterrey), sin embargo, en los meses de febrero a abril los precios bajan considerablemente por la gran cantidad de tomate que entra al

mercado procedente de Sinaloa (SNIIM, 2019). En cuanto a la exportación, esta región puede ser estratégica, puesto que el período de producción coincide con el período en donde se presentan los precios más altos en Estados Unidos (USDA, 2019). Además, es una región complementaria a la del Sur del Estado, debido a que sembrando en ambas regiones es posible tener producción todos los meses del año.

Considerando los análisis de correlación de Pearson y de Spearman, se deduce que en la región baja es recomendable instalar invernaderos en lugares con mayor altura sobre el nivel del mar, preferentemente cercanos a la Sierra Madre, además, instalar invernaderos con una altura a la canaleta mayor de 4.5 m, un área de ventilación mayor a 25%, instalar nebulizadores, utilizar ventilación forzada, instalar mallas sombra o blanquear plásticos, utilizar plásticos que bloquen una fracción de la radiación infrarroja (López-García, 2000).

Para instalar invernaderos en las partes altas del Estado se deben evitar lugares con temperaturas demasiado frías y localidades con alturas mayores a 2000 msnm. De acuerdo con Sánchez del Castillo y Moreno (2017) en regiones frías se deben seleccionar invernaderos con las siguientes características:

- a) Sistemas eficientes de calefacción.
- b) Doble capa plástica en la parte superior.
- c) Pantallas térmicas.
- d) Cobertura plástica lo más hermético posible.
- e) Manejo adecuado de apertura y cierre de ventanas laterales y cenitales.
- f) Utilización de mallas sombra o encalado de la cubierta en los meses más calientes.
- g) Utilización de nebulizadores.

Para instalar invernaderos en las partes bajas del Estado se deben de seleccionar lugares cercanos a la sierra madre con la mayor altitud posible. Además, se deben seleccionar invernaderos con las siguientes características:

- a) Altura a la canaleta no menor de 4 m.
- b) Área de ventilación no menor a 25%.
- c) Considerar el uso de nebulizadores cuando se presenten bajas humedades relativas.
- d) Utilización de extractores.

- e) Blanqueo de plásticos o malla sombra.
- f) Utilización de plásticos térmicos.

Conclusiones

El análisis multivariado de k-medias resultó una estrategia adecuada para clasificar regiones para instalar invernaderos considerando la altitud y la temperatura media mensual. La limitación de esta tecnología es que el usuario deberá definir previamente el número de grupos que se deberán obtener en el sistema de clasificación

El análisis multivariado mostró resultados semejantes a los obtenidos con la metodología aplicada por Castilla (2004), basada en temperaturas medias mensuales, la cual se describe en la presente publicación.

La altitud de la región también puede utilizarse como un indicador preliminar para definir las posibilidades de éxito en la producción de cultivos en invernadero.

Agradecimientos

Al Centro de Agricultura Protegida de la Facultad de Agronomía – UANL.

Referencias

- Benton, J. J. (2007). Tomato plant culture: In the field, greenhouse and home Garden. 2nd Edition CRC press Taylor and Francis Group. 420 p.
- Castilla, N. (2004). *Invernaderos de plástico: tecnología y manejo*. Ediciones Mundi-Presa. Pp. 457.
- Ferran-Aranaz, M. (2001). *SPSS para Windows. Análisis Estadístico*. McGraw Hill. Pp. 317-325.
- Flores V., J., Mejía S., E., Montero C., J., Rojano, A. 2011. Análisis numérico del clima interior en un invernadero de tres naves con ventilación mecánica. *Agrociencia*, 45: 545-560.

- González-Real, M. M. y A. Baille. (2000). Control del clima bajo invernadero. En *Tecnología para cultivos de alto rendimiento*. Ed. A. L. Alarcón. Novedades Agrícolas, S. A. Pp. 337-360.
- INEGI. (2019). *Mapa digital de México V.6.3.0*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF0OjIzLjMyMDA4LGxvbjotMTAxLjUwMDAwLHo6MSxsOmMxMTFzZXJ2aNpb3N8dGMxMTFzZXJ2aNpb3M=> Consultado el 15 de octubre de 2019.
- Kawasaki, Y., A. Taketoyo, K. Suzuki, K. Yasuba, H. Kawashima, H. Sasaki, and M. Takaichi. (2010). Effect of local heating around the tomato shoot apex and flower clusters on plant surface temperature and characteristics related to fruit yield. *Horticultural Research*, 9(3): 345-350.
- López-García, J. I. (2000). Control climático de invernaderos en el sudeste español. Aspectos prácticos. En *Tecnología para cultivos de alto rendimiento*. Ed. A. L. Alarcón. Novedades Agrícolas, S. A. Pp. 361-367.
- Sánchez del Castillo, F. y Moreno P., E. C. (2017). *Diseño agronómico y manejo de invernaderos*. 1^a Ed. Universidad Autónoma Chapingo, México. 405 p.
- Serrano C., Z. (2005). *Construcción de invernaderos*. 3^a Edición. Mundi-Prensa. España. 512 p.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera) (2019). *Producción Agrícola*. Disponible en: <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119> Consultado el 15 de octubre de 2019.
- SNIIM (Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados (2019). *Mercados Nacionales. Frutas y Hortalizas*. Disponible en: <http://www.economia-sniim.gob.mx/Nuevo/Home.aspx?opcion=Consultas/MercadosNacionales/PreciosDeMercado/Agricolas/ConsultaFrutasYHortalizas.aspx> Consultado el 15 de octubre de 2019.
- Taiz L., E. Zeiger, I. A. Moller and A. Murphy. 2014. *Plant physiology and development*. 6th Ed. Oxford University Press. 761 p.
- USDA (United States Department of Agriculture) (2019). *Agricultural Marketing Service. Specialty Crops*. Disponible en: <https://www.marketnews.usda.gov/mnp/fv-nav-byCom?navClass=VEGETABLES&navType=byComm> Consultado el 15 de octubre de 2019.

Van Der Ploeg, A. and E. Heuvelink. (2005). Influence of sub-optimal temperature on tomato growth and yield: a Review. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 80(6): 652-659.