

Análisis y modelamiento espacial de información climática en la cuenca de Cuitzeo, México

Recibido: 20 de enero de 2009. Aceptado en versión final: 18 de marzo de 2009.

Oscar Adrián Leal-Nares *

Manuel E. Mendoza**

Eleazar Carranza González***

Resumen. La disponibilidad de información climática de calidad y espacialmente distribuida es importante para el desarrollo de investigación en distintas disciplinas como la Hidrología, Agronomía, Climatología y Ecología. Este artículo se propone obtener un modelo espacialmente distribuido de precipitación y temperatura de la cuenca del lago de Cuitzeo, a partir de métodos de interpolación que utilizan variables climáticas y geográficas apoyado en la aplicación de los análisis de correlación y regresión simple y múltiple, uso de herramientas propias de los sistemas de información geográfica. Para ello se elaboraron tres diferentes modelos: el primero con las 17 estaciones que se encuentran en la cuenca (Modelo cuenca); el segundo con 24 estaciones localizadas a menos de 10 km del límite de la cuenca (*Modelo buffer 10*) y el tercero con 30, localizadas a menos de 20 km de distancia del parteaguas (*Modelo buffer 20*). Con base en los resultados de confiabilidad, el mapa final de temperatura media, fue el mapa de regresión basado en el *modelo buffer 20* corregido por la adición del mapa de anomalías, el cual presentó un valor de $R^2 = 0.73$ y un RMSE=0.64 °C. En los mapas de

precipitación se observaron mejores resultados de confiabilidad para los modelos elaborados con la información del modelo buffer 20. El mapa final de precipitación anual fue el obtenido a partir del mapa de regresión sin corrección por residuales, presentando un coeficiente de determinación $R^2 = 0.746$ y un RMSE de 55.51. Con base en el análisis de confiabilidad, ambos modelos tienen coeficientes de determinación aceptables ($Prob > F = 0.05$); sin embargo, los modelos podrían mejorarse de contar con una mayor cantidad de estaciones al interior de la cuenca, ya que la cantidad y calidad de los datos es una variable que afecta los resultados de un modelamiento. Los mapas finales, son de importancia para modelar la distribución espacial de tipos de vegetación, así como especies vegetales, ya que el clima es un factor fundamental que junto con otras variables como la altitud, suelos, pendientes, exposición, entre otros, determinan la distribución de las comunidades vegetales y sus especies.

Palabras clave: Estaciones meteorológicas, modelamiento climático, sistemas de información geográfica, interpolación.

Spatial analysis and modeling of climate variables in the Cuitzeo Basin, Mexico

Abstract. Climatic information with sufficient quality and spatially distributed is an essential requirement for deve-

loping research in several disciplines, such as Hydrology, Agronomy, Climatology and Ecology. In the present paper

* Ducks Unlimited de México A. C., Av. Vasconcelos 209 Ote., Residencial San Agustín, 66260, Garza García, Nuevo León, México. E-mail: neo_aqua@yahoo.com.mx.

** Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro, No. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de la Huerta, 58190, Morelia, Michoacán, México. E-mail: mmendoza@ciga.unam.mx.

*** Instituto de Ecología, A. C., Bajío, Av. Lázaro Cárdenas 253, 61600, Pátzcuaro, Michoacán, México. E-mail: eleazarcg_04@yahoo.com.

we attempt to reach to a model of the spatial distribution of precipitation and temperature in the lake Cuitzeo basin, based on interpolation methods using climatic and geographic variables and supported by the application of correlation analysis, simple and multiple regression and the use of geographic information systems. Three models were developed: one including 17 stations within the basin (Basin model); a second including 24 stations located at less than 10 km from the basin's water shed (Buffer 10 model); and a third using 30 stations located at less than 20 km from the catchment's water divide (Buffer 20 model). Based on the results of confidence analysis, the final average temperature map was the regression map resulting from the Buffer 20 model corrected by the addition of the anomaly map, with $R^2=0.72$ and RMSE of 0.64°C . In precipitation maps, the highest confidence results were derived from the data from the Buffer 20 model. The final annual precipitation map

was obtained from the regression map without correction by residuals, with $R^2=0.746$ and RMSE= 55.51°C . Confidence analysis shows that both models had statistically significant determination coefficients (Prob. $> F=0.05$), however, models could be improved by the availability of more stations within the basin, given that the quantity and quality of data is a variable having an effect on the output of model application. The resulting final maps are relevant for modeling the spatial distribution of types of vegetation cover and of plant species, because climate, together with altitude, slope, exposure and other factors, is fundamental for determining the distribution of plant communities and of their component species.

Key words: Meteorological stations, climatic modeling, geographic information systems, interpolation.

INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de información climática de calidad es importante para el desarrollo de investigación en distintas disciplinas como la Hidrología, Agronomía, Climatología y Ecología. En México se tienen registros de temperatura, precipitación, tipos y subtipos climáticos para 3 266 estaciones meteorológicas distribuidas en todo el país (García, 2004). Sin embargo, existe falta de calidad en la información climática debido a factores relacionados con la cobertura espacial y temporal de los datos, así como falta de homogeneidad en los métodos para registrar la información. Mendoza (2002) menciona que la disponibilidad espacial de los datos climáticos en la cuenca de Cuitzeo se encuentra de manera dispersa, obedeciendo principalmente a criterios agroclimáticos, lo que dificulta la disponibilidad de información meteorológica para toda la cuenca; sin embargo, la información proveniente de los monitoreos de precipitación y temperatura es considerada moderadamente buena para esta área.

En la actualidad se han desarrollado técnicas que permiten la aplicación de métodos estadísticos de regresión simple y múltiple combinados con los sistemas de información geográfica (SIG), con el fin de obtener información climática continua en áreas donde no existen datos de estaciones meteorológicas (Hartkamp *et al.*, 1999; Vicente-Serrano *et al.*, 2003).

Los interpoladores globales utilizan datos externos (*e.g.* geográficos y topográficos) como variables predictivas para desarrollar los mapas de temperatura y precipitación; entre los más utilizados se encuentran las coordenadas geográficas de las estaciones climáticas, la elevación, la exposición y la pendiente. Estos métodos son considerados inexactos debido a que los valores predichos no coinciden con los valores reales registrados en las estaciones climáticas (Marquínez *et al.*, 2003; Ninyerola *et al.*, 2005; Attorre *et al.*, 2007).

La espacialización de variables meteorológicas y climáticas es valiosa en la generación de modelos de distribución potencial de especies o estimación de balances hídricos espacialmente distribuidos, por lo que esta investigación se propone obtener un modelo de precipitación y temperatura a partir de métodos de interpolación que utilizan variables climáticas y geográficas. Lo cual tiene como requisito analizar y crear una base de datos con la información de las estaciones meteorológicas de la cuenca de Cuitzeo.

ÁREA EN ESTUDIO

La cuenca de Cuitzeo está localizada entre los $19^{\circ}30'$ y $20^{\circ}05'$ N de latitud y $100^{\circ}30'$ y $101^{\circ}35'$ W de longitud, con una superficie de alrededor de $4\,000\text{ km}^2$, y abarca un total de 28 municipios, de los cuales 23 corresponden a la parte norte de Michoacán.

cán (92.8%) y cinco a la parte sur del estado de Guanajuato (7.2%). La parte baja de la cuenca tiene una altitud de 1 830 m mientras que la parte más alta tiene 3 420 m. Al interior de la misma se ubica el lago de Cuitzeo, segundo cuerpo de agua continental más grande de México, calificado como la zona lacustre más importante de Michoacán (Figura 1) y considerado como uno de los cuerpos de agua más susceptibles a la alteración, debido a que es un vaso plano y extenso en el cual se produce una gran evaporación (Mendoza *et al.*, 2001; Israde, 2005).

MÉTODO

Análisis y sistematización de la información climática

Se analizó la información de 30 estaciones meteorológicas que se encuentran a una distancia máxima

de 30 km del parteaguas de la cuenca y con al menos 20 años de registros; debido a que se han obtenido resultados satisfactorios en modelamiento de precipitación y temperatura con series de 15 a 25 años (Marquínez *et al.*, 2003; Ninyerola *et al.*, 2005). Los datos de temperatura y precipitación fueron proporcionados por la Comisión Nacional del Agua (CNA). A partir de éstos se calcularon los valores anuales de precipitación y temperatura, la oscilación de la temperatura y los tipos climáticos para cada una de las estaciones (García, 2004).

Selección de las variables climáticas de interés

Para realizar el análisis estadístico, se elaboró una matriz de datos en el programa JMP® utilizando los datos de precipitación y temperatura de las estaciones; se usaron siete diferentes variables climáticas: *a)* temperatura media, *b)* temperatura mínima, *c)* temperatura máxima, *d)* precipitación, *e)* relación

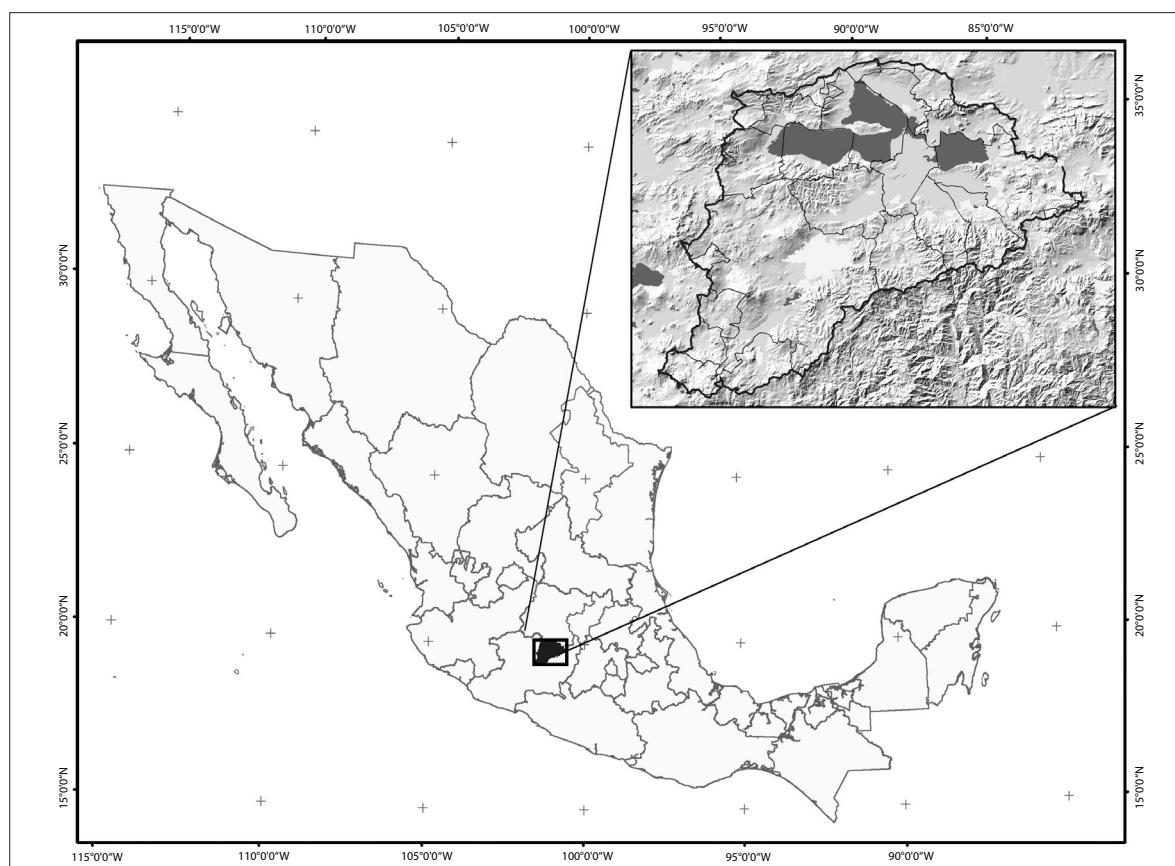


Figura 1. Cuenca de Cuitzeo.

precipitación/temperatura, f) porcentaje de lluvias de invierno y g) oscilación de la temperatura (*Ibid.*).

Se realizó un análisis de correlación múltiple, el cual es una medida de la relación que existe entre dos o más variables, mediante el uso de los coeficientes de correlación (R^2) de acuerdo con la ecuación 1. El más comúnmente usado es el coeficiente de correlación de Pearson, el cual es una medida del ajuste del modelo y representa la porción de la variación, por lo que es útil para detectar redundancias en la información (Marquínez *et al.*, 2003; Yang, 2004). Los coeficientes de correlación fueron calculados con la siguiente función:

$$r_i = \frac{\sum XY - \frac{\sum X \sum Y}{n}}{\sqrt{\left(\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}\right) \left(\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n}\right)}} \quad (1)$$

En donde X y Y son las variables a correlacionar y n son las observaciones. Existe una relación lineal exacta entre las dos variables cuando la relación es 1 o -1, dependiendo de si las variables están relacionadas positiva o negativamente; en caso de que no exista relación lineal la correlación tiende a 0.

Las variables geográficas utilizadas fueron la altitud (metros), la exposición de ladera (grados) y la posición geográfica de las estaciones analizadas, expresada en coordenadas métricas en el sistema UTM (Ninyerola *et al.*, 2005). La obtención de los valores fue realizada mediante la sobreposición de los mapas de distribución de las estaciones climáticas y el Modelo Digital de Elevación (MDE) y el de exposición de laderas (orientación de la ladera en relación con el norte). El mapa de altitud fue elaborado con base en un MDE, obtenido a partir de la interpolación en ILWIS de las cartas vectoriales 1:50 000 de INEGI, con una resolución espacial de 20 m; el mapa de exposición de la ladera fue derivado a partir del MDE utilizando algoritmos para su generación en este mismo SIG.

MODELAMIENTO DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS

Modelo de regresión

Los coeficientes de correlación de Pearson son utilizados para estimar las relaciones entre las variables

climáticas y las variables geográficas independientes (Touazi *et al.*, 2004). La base de datos de las estaciones meteorológicas se complementó con la información de las variables geográficas necesarias para desarrollar el análisis de regresión múltiple (nombre de la estación, coordenadas geográficas, altitud, temperatura media, precipitación anual, oscilación de la temperatura y exposición de ladera), posteriormente los datos fueron analizados en el programa estadístico JMP (Bennartz y Michelson, 2003; Attorre *et al.*, 2007).

Se realizaron tres distintos modelos de regresión para evaluar en cuál de ellos se obtienen mejores resultados (Ninyerola *et al.*, 2005); el primero con las estaciones que se encuentran al interior de la cuenca (17 estaciones), el segundo que incluye las estaciones a una distancia de 10 km (24 estaciones) y el tercero a una distancia de 20 km (30 estaciones); la distancia fue calculada con base en buffers elaborados en ARCVIEW 3. De éstas, el 70% de las estaciones fueron utilizadas para la elaboración del modelo y el 30% para su validación con el apoyo de ARCGIS 9 (*Ibid.*). La regresión fue calculada con base en la siguiente función:

$$Z(X) = b_0 + b_1 P_1 + b_2 P_2 + \dots + b_n P_n \quad (2)$$

En donde Z es el valor a predecir en un punto X , b_0, \dots, b_n los coeficientes de regresión, y P_1, \dots, P_n son los valores de las diferentes variables independientes en el punto X (Johnson, 2000).

El análisis de regresión múltiple en JMP® permitió conocer los coeficientes que indican el peso que debe tener cada variable y explicar su relación con la temperatura, para predecir el valor climático en un determinado punto del territorio, mediante la aplicación de la ecuación obtenida de la relación de la variable climática con las geográficas en un SIG (Hartkamp *et al.*, 1999; Spellman, 2000; Xu y Singh, 2001; Marquínez *et al.*, 2003; Diodato, 2005; Ninyerola *et al.*, 2005).

Para la evaluación de la confiabilidad de los distintos modelos de regresión, se utilizó el coeficiente de determinación (R^2). Una vez obtenidos los coeficientes de regresión múltiple (Marquínez *et al.*, 2003), se aplicó la ecuación mediante álgebra de mapas en ILWIS® (ILWIS, 2003) para la elaboración

de las matrices raster, utilizando las variables climáticas y geográficas mencionadas anteriormente.

Ajuste del modelo de regresión por corrección residual

Los residuales del ajuste de regresión reflejan la variación inexplicada para cada estación. La obtención de residuos se realizó en el paquete estadístico JMP®, para el cual se restaron los valores observados (información registrada en las estaciones climáticas) de los valores predichos por el modelo de regresión lineal.

$$\text{Residuales} = \text{datos observados} - \text{datos predichos} \quad (3)$$

Los residuales fueron interpolados espacialmente en ARCVIEW 3.2®, utilizando *splines* ($\phi=400$), el cual es un interpolador de tipo local que no utiliza información geográfica auxiliar (Vicente-Serrano *et al.*, 2003). Posteriormente, los mapas de anomalías se integraron a los generados mediante regresión múltiple utilizando álgebra de mapas en ILWIS, para la obtención de los mapas finales, mediante la siguiente ecuación.

$$\text{Mapa final} = \text{Mapa de regresión} + \text{Mapa de anomalías} \quad (4)$$

Este proceso de corrección es utilizado para mejorar el resultado obtenido a partir de un interpolador global inexacto (regresión múltiple), (Ninyerola *et al.*, 2005; Attorre *et al.*, 2007).

Estimación de la confiabilidad del modelo

Este proceso de validación se realizó en el paquete estadístico JMP®, el cual consiste en la comparación de los valores predichos por los mapas reales con los valores observados en las estaciones meteorológicas que no fueron designadas para la calibración del modelo (ajuste de regresión), ni en el proceso de corrección de residuales. Se realizó un análisis de regresión entre los valores predichos y observados para el 30% de las estaciones que fueron elegidas para el proceso de validación de manera preliminar (Ninyerola *et al.*, 2005; Attorre *et al.*, 2007).

Los resultados de la validación se expresan a través del coeficiente de determinación (R^2) obtenido a partir de efectuar la regresión. Este índice

de fiabilidad tiene la particularidad de ser independiente de las unidades de medida de las variables y por lo tanto es posible comparar distintos modelos, además, posee una magnitud adimensional por lo que dificulta la evaluación de calidad del mapa. Por otro lado, el RMSE es una de las mejores medidas del error de un modelo debido a que permite conocer el error asociado en términos de unidades reales (Willmott, 1982).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis y sistematización de la información climática

La estación que tiene más años de registro es la de Zinapécuaro (82) y la de menor es Álvaro Obregón (21), las estaciones se encuentran distribuidas desde los 1 565 m hasta los 2 509 m de altitud. La información de precipitación y temperatura de las estaciones fue analizada y estructurada con base en los criterios de García (2004) para conformar una base de datos para el análisis estadístico (Tabla 1).

El promedio de precipitación registrado en las estaciones es de 851.9 mm, el registro mínimo corresponde a la estación Álvaro Obregón (646 mm), la cual se encuentra a una altitud de 1 851 m, y la precipitación más alta se registra en El Temascal de Morelia (1 402 mm), la cual se encuentra a los 2 240 m. Mientras que el promedio de la temperatura media para las estaciones es de 17.2° C, el registro mínimo corresponde a Pucuáto (14.3° C), con una altitud de 2 508 m, la máxima pertenece a Tzitzio (20.5° C) ubicada a los 1 565 m. La distribución de las estaciones se encuentra en su mayoría por debajo de los 1 900 m.

Selección de las variables climáticas de interés

El análisis de correlación múltiple mostró que las variables de temperatura máxima y mínima no fueron consideradas debido a que tienen una estrecha relación con la temperatura media anual (0.843 y 0.766, respectivamente). Asimismo, la variable de precipitación/temperatura (P/T) tiene un coeficiente de correlación de 0.944 con la precipitación y debido a esto fue también descartada. Por lo que

Tabla 1. Resumen de información climática de las estaciones meteorológicas proporcionadas por CNA con más de 20 años de registro

Estación	Altitud	T° media	T° máx	T° mín	Prec	Prec / T° C	Porcentaje Prec invernal	Oscilación	Clima
Acúitzio del Canje	2 076	16.70	27.88	4.94	992.34	59.41	5.30	6.00	Cb(w2)(i)gw"
Álvaro Obregón	1 851	18.72	30.23	6.02	646.09	34.51	5.30	7.20	BShw(e)g
Carrillo Puerto	1 840.2	16.57	26.83	5.56	698.46	42.16	3.90	6.90	Cb(wo)(w)(i)g
Ciudad Hidalgo	2 069.5	16.56	29.77	4.27	823.04	49.70	5.00	6.10	Cb(w1)(i)g
Coínzio	2 010	17.60	29.54	6.60	810.03	46.03	3.50	6.20	Cb(w1)(w)(i)g
Copánbaro de Jiménez	1 847.6	15.52	26.93	3.03	850.10	54.77	3.50	6.90	Cb(w1)(w)(i)g
Cuitzeo	1 840.2	18.04	29.43	6.91	682.83	37.84	4.70	6.90	(A)Cb(wo)(w)(i)g
Cuitzillo Grande	1 850.8	17.07	28.98	4.43	647.34	37.92	3.80	6.60	Cb(wo)(w)(i)g
El Puerto San Isidro	2 000.4	16.18	27.72	3.66	825.76	51.03	5.40	6.80	Cb(w1)(i)
El Temascal de Morelia	2 240	16.99	26.41	8.26	1 402.59	82.54	3.40	5.10	Cb(w2)(w)(i)g
Huaniqueo	2 042.8	17.90	28.48	7.50	887.63	49.60	3.50	6.60	Cb(w1)(w)(i)g
Huingo	1 860	17.51	29.03	5.15	741.27	42.33	3.50	7.00	Cb(wo)(w)(e)g
Jesús del Monte	2 150.9	17.24	28.80	7.26	887.90	51.49	3.80	6.30	Cb(w1)(w)(i)g
Maravatío	2 018	17.86	30.00	5.78	899.38	50.36	4.10	6.60	Cb(w1)(w)(i)g
Morelia (Centro)	1 899.5	18.03	30.02	6.41	788.69	43.74	3.80	7.00	(A)Cb(w1)(w)(e)g
Pátzcuaro	2 143.8	16.45	28.06	4.81	926.02	56.28	4.10	6.50	Cb(w2)(w)(i)
Presa Malpaís	1 880	17.44	29.30	4.77	728.83	41.79	3.60	7.20	Cb(wo)(w)(e)g
Pucuáu	2 508.5	14.30	25.43	3.10	1 184.90	83.00	4.70	6.00	Cb(w2)(w)(i)g
Puruandiro	1 921.2	19.09	30.92	7.39	817.88	42.84	2.90	7.50	(A)Ca(wo)(w)(e)g
Quirio	1 859.2	17.81	29.15	6.26	725.19	40.73	4.90	7.00	Cb(wo)(w)(i)g
Quiroga (Santa Fe Quiroga)	2 071.3	16.38	28.45	5.12	827.16	50.48	4.10	5.60	Cb(w1)(w)(i)g
San Miguel Curahuango	2 018.5	16.98	29.10	5.34	794.31	46.77	3.50	6.50	Cb(w1)(w)(i)g
San Miguel del Monte	2 157.9	15.92	27.35	4.71	1 040.17	65.36	3.30	6.70	Cb(w2)(w)(i)g
San Sebastián Querétaro	1 915.5	16.48	27.73	4.54	669.23	40.61	3.70	7.10	Cb(wo)(w)(e)g
Santa Rita	1 840.1	20.00	32.17	8.49	723.87	36.19	3.70	5.50	(A)Ca(wo)(w)(i)g
Santiago Undameo	2 013.1	16.13	27.87	3.84	837.77	51.95	3.90	7.00	Cb(w1)(w)(e)g
Senguo	2 278.3	15.61	27.31	4.97	906.94	58.11	4.20	6.40	Cb(w2)(w)(i)g
Teremendo Morelia	2 145.7	16.57	27.90	5.99	724.24	43.70	3.10	6.30	Cb(w1)(w)(i)g
Tzitzio	1 565	20.54	30.12	10.99	1 225.25	59.65	3.00	5.60	(A)Ca(w2)(w)(i)g
Zinapécuaro	1 892.9	17.85	28.41	7.51	840.12	47.07	3.00	6.80	Cb(w1)(w)(i)g

T° media= Temperatura media anual (°C); T° máx= Promedio de la Temperatura máxima anual (°C); T° mín=Promedio de la Temperatura mínima anual (°C); Prec= Precipitación anual (mm); P/T= Relación precipitación / temperatura; %PI=Porcentaje de lluvias invernales; Osc= oscilación de la temperatura (°C).

la variabilidad de este conjunto de datos puede ser explicado con las variables de la temperatura media anual y precipitación anual.

Con base en el análisis de correlación múltiple, las variables elegidas para el modelamiento climático fueron la temperatura media anual, precipitación anual y oscilación de la temperatura (Tabla 2). Este análisis constituye una herramienta muy importante para reducir el número de variables a utilizar en el modelamiento climático.

Modelamiento de las variables climáticas

Para la elaboración de los modelos se conformó una base de datos con las variables climáticas seleccionadas mediante el análisis de correlación múltiple; ésta se complementó con los valores de las variables geográficas (altitud, orientación de laderas y posición) de los puntos donde se encuentran las estaciones.

Modelo de regresión

La base de datos que contenía únicamente la información de las estaciones al interior de la cuenca está conformada por un total de 17, de las cuales 11 fueron seleccionadas para la construcción del modelo y seis para su validación (*Modelo cuenca*), (Tabla 3). Para las estaciones localizadas dentro del *Buffer* de 10 km se incluyeron 24, de éstas, 16 fueron usadas la elaboración del modelo y ocho para la estimación de la fiabilidad (*Modelo buffer 10*), (Tabla 4). En el caso del *Buffer* de 20 km se consideraron las 30 estaciones, utilizando 21 en la

construcción del modelo y nueve para la validación (*Modelo buffer 20*), (Tabla 5).

Se realizó un análisis de regresión lineal en cada una de las bases de datos, utilizando como variables independientes *X* la información geográfica (latitud, longitud, altitud y exposición de laderas) para expresar la variabilidad climática, y a las variables dependientes *Y* (T° Media, Precipitación y Oscilación), para obtener los valores de correlación y los coeficientes de determinación a fin de establecer las relaciones entre las variables (Touazi *et al.*, 2004).

En el análisis de correlación y regresión realizado para el *Modelo cuenca*, se observó una correlación significativa (Prob>F= 0.01) de la precipitación con la altitud, obteniendo un coeficiente de correlación del 0.85, lo cual significa que el 73% de la variación está explicada por la altitud. La T° Media mostró un coeficiente de correlación del 0.84, explicando un 71% de la variación con el modelo; sin embargo, éste no fue tomado en cuenta debido a que la variación de la temperatura media no está relacionada directamente a esta variable, aunque sí puede influir indirectamente en ésta (Tabla 6).

Como producto del análisis en el *Modelo buffer 10*, hay una correlación significativa únicamente para la oscilación de la temperatura con la latitud con un coeficiente de 0.63 que explica el 40% de la variabilidad en el modelo; sin embargo, no fue tomado en cuenta debido a que al interpolarlo con una variable lineal se

Tabla 2. Matriz de correlación múltiple para la selección de las variables climáticas

Variable	T° media	T° máx	T° mín	Prec	P/T	Porcentaje PI	Osc
T° media	1.0000	0.8430	<u>0.7663</u>	-0.3517	-0.6352	-0.0580	0.4162
T° máx	0.8430	1.0000	0.4979	-0.2819	-0.5225	<u>0.0509</u>	0.2166
T° mín	0.7663	0.4979	1.0000	-0.0701	-0.3306	-0.2704	0.0782
Prec	-0.3517	-0.2819	-0.0701	1.0000	<u>0.9448</u>	<u>-0.0549</u>	-0.4125
P/T	-0.6352	-0.5225	-0.3306	0.9448	1.0000	<u>-0.0129</u>	-0.4660
%PI	-0.0580	0.0509	-0.2704	-0.0549	-0.0129	1.0000	-0.1715
Osc	0.4162	0.2166	0.0782	-0.4125	-0.4660	-0.1715	1.0000

T° media= Temperatura media anual (° C); T° máx= Promedio de la Temperatura máxima anual (° C); T° mín=Promedio de la Temperatura mínima anual (° C); Prec=Precipitación anual (mm); P/T=Relación precipitación/temperatura; %PI=Porcentaje de lluvias invernales; Osc=oscilación de la temperatura (° C).

Tabla 3. Información de las estaciones ubicadas al interior de la cuenca, utilizadas para la construcción del modelo de regresión y su validación

REGRESIÓN (estaciones utilizadas para la construcción del modelo)							
Estación	X	Y	Altitud	T° media	Prec	Osc	Exp
Acuítzio del Canje	255183.33	2157305.74	2076	16.70	992.34	6.00	90
Álvaro Obregón	286491.41	2193431.80	1851	18.72	646.09	7.20	356
Copándaro de Jiménez	267913.38	2200911.82	1848	15.52	850.10	6.90	22
Cuitzeo	275882.40	2209425.83	1840	18.04	682.83	6.90	361
Cuitzillo Grande	278507.39	2188644.79	1851	17.07	647.34	6.60	0
Jesús del Monte	274374.38	2174056.77	2151	17.24	887.90	6.30	270
Morelia (Centro)	271120.37	2178493.78	1900	18.03	788.69	7.00	270
Presa Malpaís	303859.44	2191063.79	1880	17.44	728.83	7.20	183
Quirio	290614.42	2190199.79	1859	17.81	725.19	7.00	180
San Miguel del Monte	276227.38	2170751.76	2158	15.92	1040.17	6.70	6
Santa Rita	264835.37	2202543.82	1840	20.00	723.87	5.50	361
VALIDACIÓN (estaciones utilizadas para la validación)							
Carrillo Puerto	286697.41	2201647.81	1840	16.57	698.46	6.90	225
Coíntzio	262914.38	2171975.20	2010	17.60	810.03	6.20	45
Huingo	308461.46	2201935.81	1860	17.51	741.27	7.00	270
San Sebastián Queréndaro	301131.44	2190657.79	1916	16.48	669.23	7.10	316
Santiago Undaméo	260246.64	2168486.64	2013	16.13	837.77	7.00	0
Zinapécuaro	308801.45	2197019.80	1893	17.85	840.12	6.80	285

Altitud=Altura sobre el nivel medio del mar; T° media=Temperatura media anual (° C); Prec=Precipitación anual (mm); Osc=oscilación de la temperatura (° C); Exp=Exposición de ladera expresado en grados (°).

presentaría una redundancia en la información (Tabla 7).

En el *Modelo buffer 20* se obtuvieron correlaciones significativas (Prob>F= 0.01) de la T° Media con la variable altitud con un coeficiente de correlación de -0.6518, la cual significa que el 42% de la variabilidad es explicada por la altitud, también se presentó un coeficiente de correlación significativo con la exposición de ladera (0.61) el cual explica un 37% de la variabilidad en el modelo de regresión. Para la precipitación se obtuvo un coeficiente de correlación con la altitud de 0.81, mediante el cual explica el 65% de la variabilidad en el modelo (Tabla 8).

Modelos de regresión de la temperatura

Mediante el análisis de regresión múltiple con la información de la base de datos del *Modelo buffer 20*, se obtuvo la ecuación de la relación de la temperatura con las variables independientes altitud y exposición (Figura 2), la cual fue utilizada para integrar el análisis estadístico en el programa ILWIS (Figura 4).

$$T^{\circ} \text{media} = 24.041148 + (-0.003934) (MDE) + (10.0045038) (\text{Exposición}) \quad (5)$$

Se realizó también una regresión simple de la temperatura con la altitud como variable indepen-

Tabla 4. Información de las estaciones ubicadas en un buffer de 10 km de la cuenca, utilizadas para la construcción del modelo de regresión y su validación

REGRESIÓN (estaciones utilizadas para la construcción del modelo)							
Estación	X	Y	Altitud	T° media	Prec	Osc	Exp
Acuítzio del Canje	255183.33	2157305.74	2076	16.70	992.34	6.00	90
Carrillo Puerto	286697.41	2201647.81	1840	16.57	698.46	6.90	225
Coíntzio	262914.38	2171975.20	2010	17.60	810.03	6.20	45
Copándaro de Jiménez	267913.38	2200911.82	1848	15.52	850.10	6.90	22
Cuitzeo	275882.40	2209425.83	1840	18.04	682.83	6.90	361
Cuitzillo Grande	278507.39	2188644.79	1851	17.07	647.34	6.60	0
El Puerto San Isidro	236163.32	2198337.83	2000	16.18	825.76	6.80	225
El Temascal de Morelia	294527.42	2173855.76	2240	16.99	1402.59	5.10	156
Jesús del Monte	274374.38	2174056.77	2151	17.24	887.90	6.30	270
Pátzcuaro	225909.28	2160147.76	2144	16.45	926.02	6.50	274
Quiroga (Santa Fe)	235282.30	2176161.79	2071	16.38	827.16	5.60	209
San Miguel del Monte	276227.38	2170751.76	2158	15.92	1040.17	6.70	6
San Sebastián Queréndaro	301131.44	2190657.79	1916	16.48	669.23	7.10	316
Teremendo Morelia	240471.32	2189658.81	2146	16.57	724.24	6.30	57
Tzitzio	297986.42	2166545.74	1565	20.54	1225.25	5.60	45
Zinapécuaro	308801.45	2197019.80	1893	17.85	840.12	6.80	285
VALIDACIÓN (estaciones utilizadas para la validación)							
Álvaro Obregón	286491.41	2193431.80	1851	18.72	646.09	7.20	356
Huaniqueo	237856.32	2202151.84	2043	17.90	887.63	6.60	245
Huingo	308461.46	2201935.81	1860	17.51	741.27	7.00	270
Morelia (Centro)	271120.37	2178493.78	1900	18.03	788.69	7.00	270
Presa Malpaís	303859.44	2191063.79	1880	17.44	728.83	7.20	183
Quirio	290614.42	2190199.79	1859	17.81	725.19	7.00	180
Santa Rita	264835.37	2202543.82	1840	20.00	723.87	5.50	361
Santiago Undaméo	260246.64	2168486.64	2013	16.13	837.77	7.00	0

Altitud=Altura sobre el nivel medio del mar; T° media=Temperatura media anual (° C); Prec=Precipitación anual (mm); Osc=oscilación de la temperatura (° C); Exp=Exposición de ladera expresado en grados (°).

diente utilizando la información del *Modelo buffer 20*, mediante el cual se obtuvo la ecuación con los coeficientes de ambas variables, espacializada posteriormente en ILWIS (Figuras 3 y 4).

$$T° media = 27.6942 - (0.00532) (MDE) \quad (6)$$

Modelos de regresión de la precipitación

El modelamiento de la precipitación se realizó mediante un análisis de regresión simple, utilizando únicamente como variable independiente la altitud (Figura 5). Para el *Modelo cuenca*, se obtuvo la siguiente ecuación que indica la relación que guarda

Tabla 5. Información de las estaciones ubicadas en un buffer de 20 km de la cuenca, utilizadas para la construcción del modelo de regresión y su validación

REGRESIÓN (estaciones utilizadas para la construcción del modelo)							
Estmeteo	X	Y	Altitud	T° media	Prec	Osc	Exp
Acuítzio del Canje	255183.00	2157306.00	2076	16.70	992.34	6.00	90
Álvaro Obregón	286491.00	2193432.00	1851	18.72	646.09	7.20	356
Carrillo Puerto	286697.00	2201648.00	1840	16.57	698.46	6.90	225
Ciudad Hidalgo	337233.00	2178566.00	2070	16.56	823.04	6.10	135
Coíntzio	262914.00	2171975.00	2010	17.60	810.03	6.20	45
Copándaro de Jiménez	267913.00	2200912.00	1848	15.52	850.10	6.90	22
Cuitzeo	275882.00	2209426.00	1840	18.04	682.83	6.90	361
El Puerto San Isidro	236163.00	2198338.00	2000	16.18	825.76	6.80	225
Huaniqueo	237856.00	2202152.00	2043	17.90	887.63	6.60	245
Huingo	308461.00	2201936.00	1860	17.51	741.27	7.00	270
Morelia (Centro)	271120.00	2178494.00	1900	18.03	788.69	7.00	270
Pucuáto	323039.00	2170834.00	2509	14.30	1184.90	6.00	205
Puruándiro	237048.00	2222522.00	1921	19.09	817.88	7.50	331
Quirio	290614.00	2190200.00	1859	17.81	725.19	7.00	180
Quiroga (Santa Fe Quiroga)	235282.00	2176162.00	2071	16.38	827.16	5.60	209
San Miguel del Monte	276227.00	2170752.00	2158	15.92	1040.17	6.70	6
San Sebastián Queréndaro	301131.00	2190658.00	1916	16.48	669.23	7.10	316
Santa Rita	264835.00	2202544.00	1840	20.00	723.87	5.50	361
Santiago Undaméo	260247.00	2168487.00	2013	16.13	837.77	7.00	0
Teremendo Morelia	240471.00	2189659.00	2146	16.57	724.24	6.30	57
Zinapécuaro	308801.00	2197020.00	1893	17.85	840.12	6.80	285
VALIDACIÓN (estaciones utilizadas para la validación)							
Cuitzillo Grande	278507.00	2188645.00	1851	17.07	647.34	6.60	0
El Temascal de Morelia	294527.00	2173856.00	2240	16.99	1402.59	5.10	156
Jesús del Monte	274374.00	2174057.00	2151	17.24	887.90	6.30	270
Maravatío	349165.00	2200124.00	2018	17.86	899.38	6.60	135
Pátzcuaro	225909.00	2160148.00	2144	16.45	926.02	6.50	274
Presa Malpaís	303859.00	2191064.00	1880	17.44	728.83	7.20	183
San Miguel Curahuango	348429.00	2198570.00	2019	16.98	794.31	6.50	90
Senguio	358374.00	2182370.00	2278	15.61	906.94	6.40	315
Tzítzio	297986.00	2166546.00	1565	20.54	1225.25	5.60	45

Altitud=Altura sobre el nivel medio del mar; T° media=Temperatura media anual (° C); Prec=Precipitación anual (mm); Osc=oscilación de la temperatura (° C); Exp=Exposición de ladera expresado en grados (°).

Tabla 6. Análisis de correlación y regresión de las estaciones del *Modelo cuenca*

	T° media		Precipitación		Oscilación	
	Correlación	R ²	Correlación	R ²	Correlación	R ²
Longitud	0.1010	0.0102	-0.4816	0.2319	0.6968	0.4855
Latitud	0.4102	0.1683	-0.6454	0.4555	0.2188	0.0478
Altitud	-0.4600	0.2116	0.8594	0.7387	-0.2954	0.0873
Exposición	0.8458	0.7154	-0.4847	0.2349	-0.0609	0.0037

Prob >F= 0.01

Tabla 7. Análisis de correlación y regresión de las estaciones del *Modelo buffer 10*

	T° media		Precipitación		Oscilación	
	Correlación	R ²	Correlación	R ²	Correlación	R ²
Longitud	0.4484	0.2012	0.1818	0.0330	0.0757	0.0057
Latitud	-0.1549	0.0240	-0.5984	0.3580	0.6325	0.4000
Altitud	-0.5940	0.3528	0.2048	0.4195	-0.2604	0.0678
Exposición	0.0162	0.0003	-0.2575	0.0663	0.2763	0.0763

Prob >F= 0.01

Tabla 8. Análisis de correlación y regresión de las estaciones del *Modelo buffer 20*

	T° media		Precipitación		Oscilación	
	Correlación	R ²	Correlación	R ²	Correlación	R ²
Longitud	-0.1931	0.0373	0.0610	0.0037	0.5312	0.0028
Latitud	0.5183	0.2686	-0.5321	0.2831	0.4639	0.2152
Altitud	-0.6518	0.4248	0.8110	0.6578	-0.4719	0.2227
Exposición	0.6148	0.3781	-0.4412	0.1946	0.1948	0.0380

Prob >F= 0.01

la precipitación con la altitud, la cual fue utilizada para la elaboración del mapa de precipitación en ILWIS (Figura 7).

$$\text{Precipitación} = -999.87 + (0.89898) (\text{MDE}) \quad (7)$$

Este mismo análisis de regresión simple fue realizado para el *Modelo buffer 20* obteniendo la relación entre la precipitación y la altitud (Figura 6). La ecuación también se aplicó mediante la álgebra de mapas en ILWIS (Figura 7).

$$\text{Precipitación} = -489.69 + (0.65813) (\text{MDE}) \quad (8)$$

Ajuste del modelo de regresión por corrección residual

Para la obtención de residuos en los modelos, se restaron los valores observados en las estaciones meteorológicas de los valores predichos por el modelo de regresión en JMP®. Los residuales de la regresión en cada estación reflejan la variación inexplicada por otras variables no consideradas como los errores metodológicos acumulados (Vicente-Serrano *et al.*, 2003; Ninyerola *et al.*, 2005).

A partir de este análisis de regresión múltiple de la temperatura con las variables geográficas (altitud y exposición de laderas) y de la regresión simple

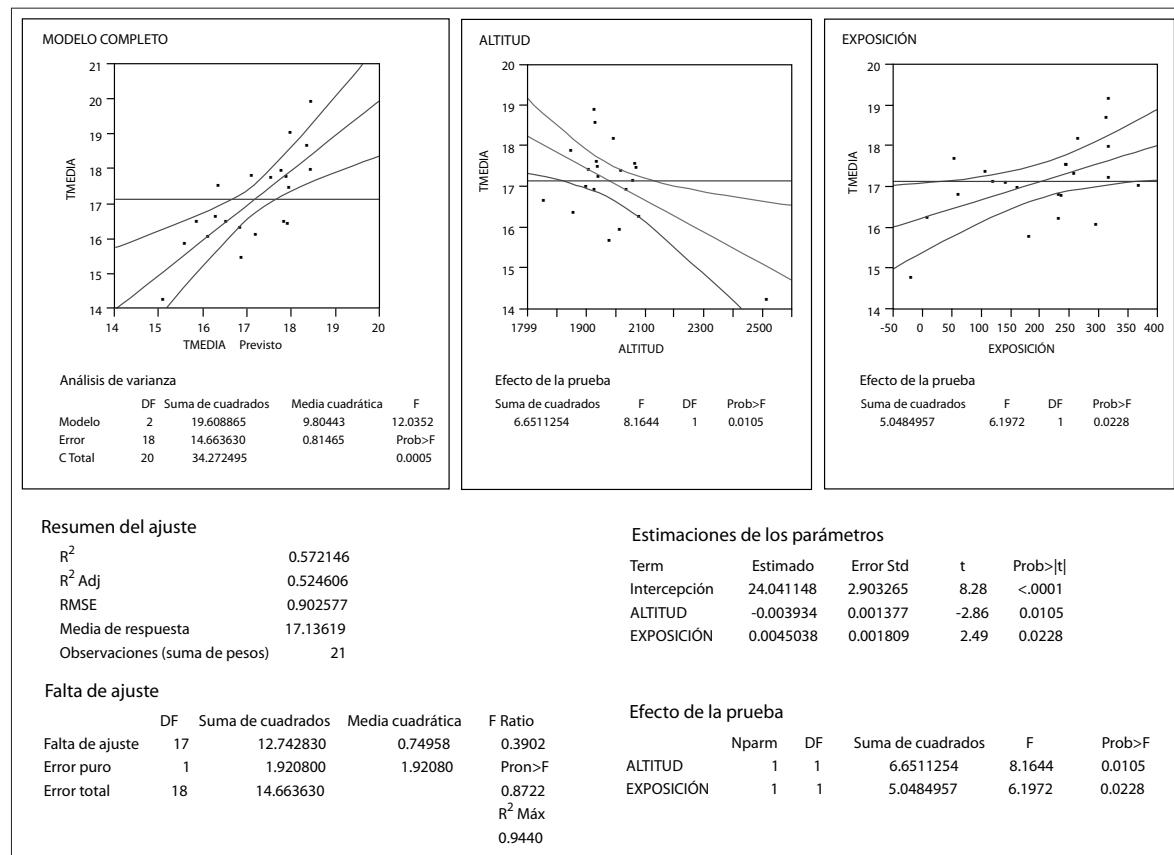


Figura 2. Análisis de regresión múltiple de la temperatura del *Modelo buffer 20*, utilizando como variables independientes la altitud y la exposición.

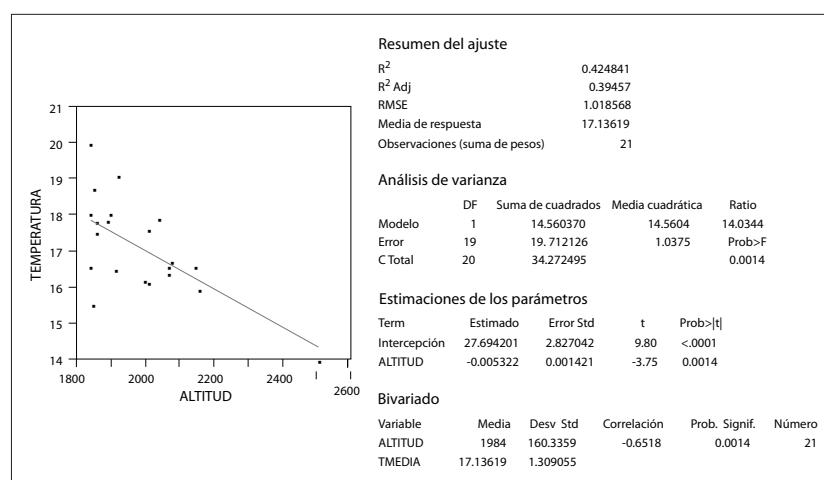


Figura 3. Análisis de regresión simple de la temperatura del *Modelo buffer 20*, utilizando como variable independiente la altitud.

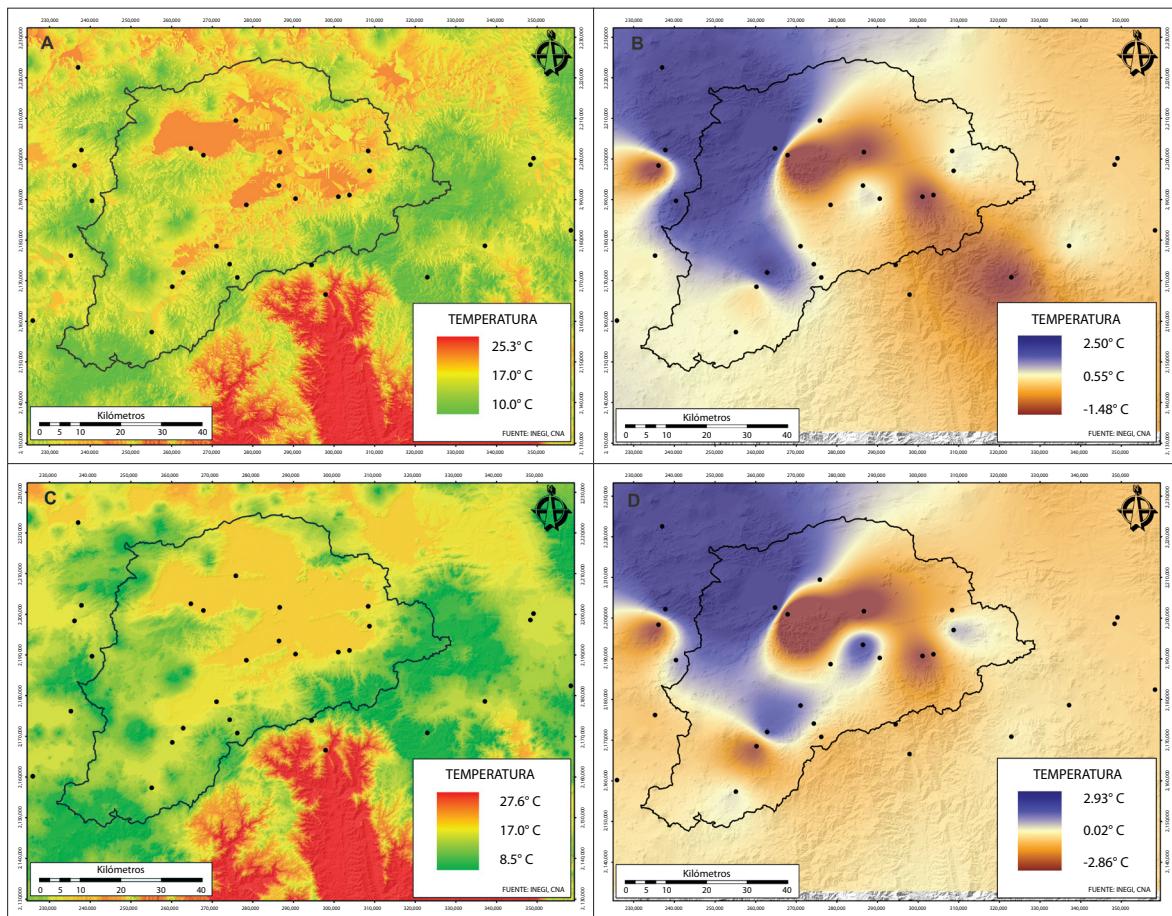


Figura 4. Mapas de temperatura resultantes del análisis de regresión y corrección residual. A) Temperatura media anual, obtenido mediante el análisis de regresión múltiple con información del *Modelo buffer 20*; B) Anomalías, obtenido mediante la interpolación de residuales de la correlación múltiple de la temperatura *Modelo buffer 20*; C) Temperatura media anual, obtenido mediante el análisis de regresión simple con información del *Modelo buffer 20*; D) Anomalías, obtenido mediante la interpolación de residuales de la correlación simple de la temperatura *Modelo buffer 20*.

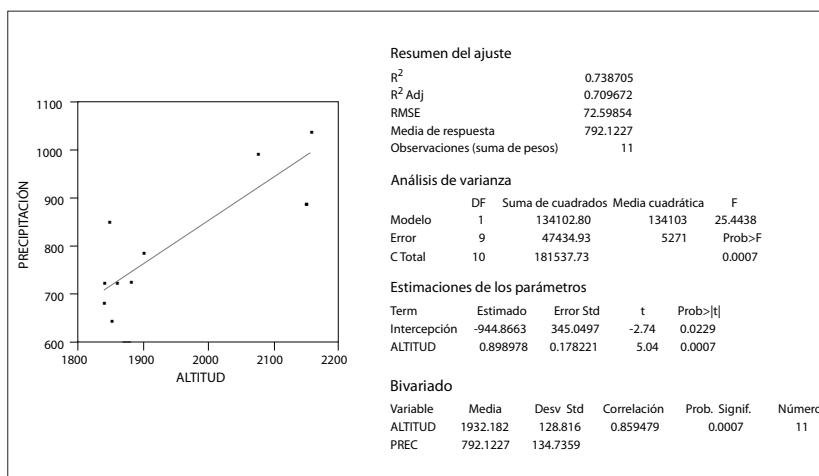


Figura 5. Análisis de regresión simple de la precipitación del *Modelo cuenca*, utilizando como variable independiente la altitud.

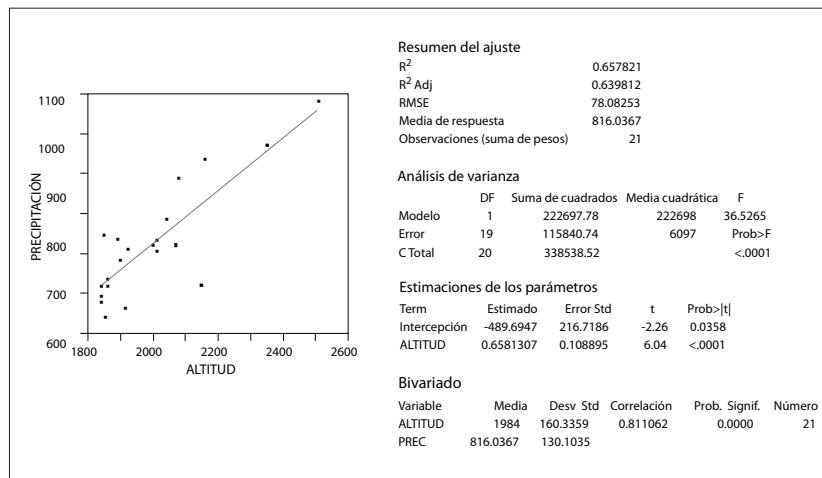


Figura 6. Análisis de regresión simple de la precipitación del Modelo buffer 20, utilizando como variable independiente la altitud.

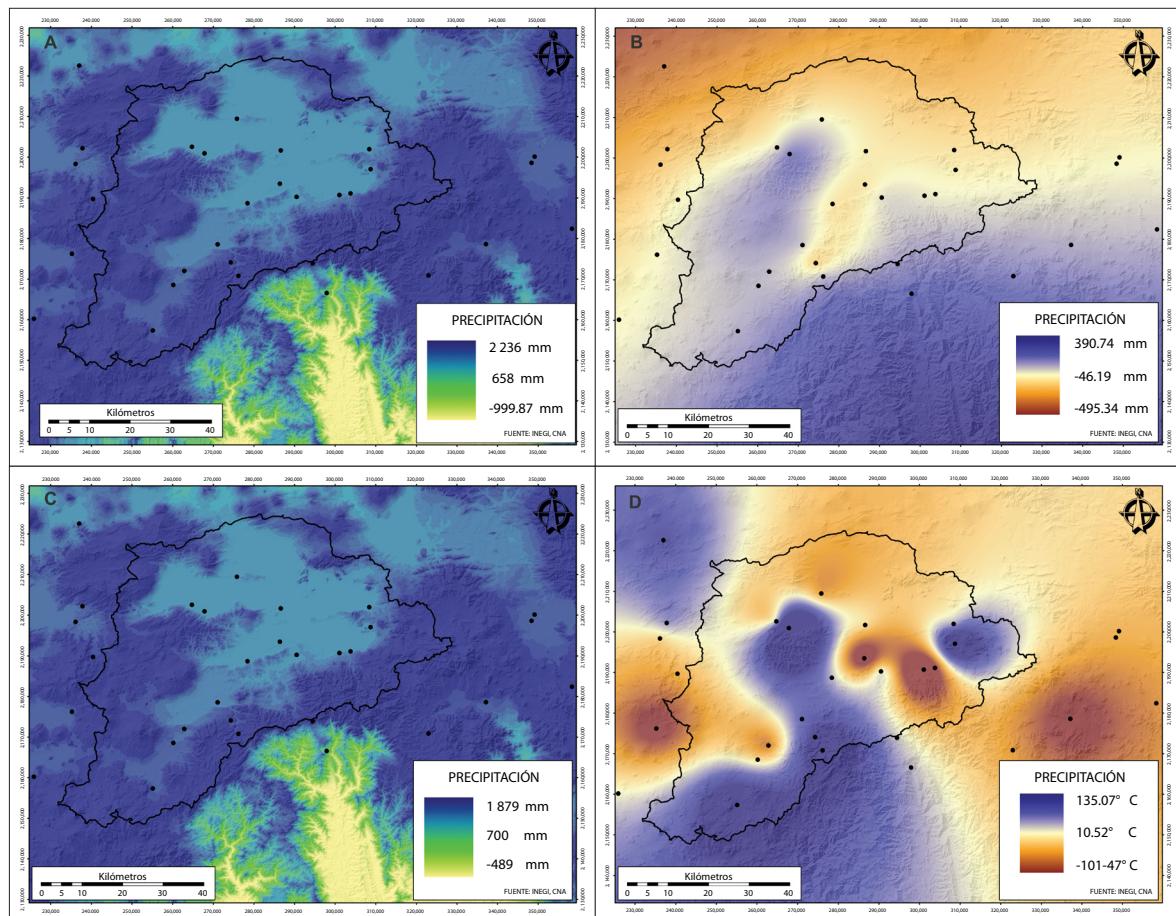


Figura 7. Mapas de precipitación resultantes del análisis de regresión y corrección residual. A) Precipitación anual, obtenido mediante el análisis de regresión simple con información del *Modelo cuenca*; B) Anomalías, obtenido mediante la interpolación de residuales de la correlación simple de la precipitación (*Modelo cuenca*). C) Precipitación anual, obtenido mediante el análisis de regresión simple con información del *Modelo buffer 20*. D) Anomalías, obtenido mediante la interpolación de residuales de la correlación simple de la precipitación (*Modelo buffer 20*).

de la temperatura con la altitud, se obtuvieron los valores residuales, presentando las diferencias más altas entre el valor predicho por la regresión y el dato observado las estaciones de Copándaro de Jiménez (-2.34) y Santa Rita (2.10). Con los residuos se construyeron nuevas bases de datos para la elaboración de nuevos datos vectoriales en ARCVIEW 3.2°, y para posteriormente efectuar una interpolación, los resultados de esta operación fueron nombrados mapas de anomalías (Figura 4).

Para la precipitación se realizó el mismo procedimiento, obteniendo los residuales de las dos regresiones simples (*Modelo cuenca* y *Modelo buffer 20*) obteniendo los mayores residuales para las estaciones de Copándaro de Jiménez (133.65) y Jesús del Monte (-100.94) para el *Modelo Cuenca* y para el *Modelo buffer 20* la de Copándaro de Jiménez (128.32) y la de San Sebastián Queréndaro (-106.81), posteriormente se conformó una nueva base de datos vectorial; a partir de ésta se elaboraron los mapas de anomalías mediante la interpolación en ARCVIEW 3.2° (Figura 7).

Por último, los mapas de anomalías obtenidos a partir de la interpolación de residuales, se agregaron a los mapas de regresión mediante álgebra de mapas en ILWIS (Attorre *et al.*, 2007). Ninyerola *et al.* (2005) mencionan que existe una mejora sustancial en los resultados, ya que se convierte de un interpolador inexacto (regresión múltiple) en un interpolador exacto, modificando los resultados iniciales del modelo de regresión. Este procedimiento se efectuó para los modelos de regresión elaborados para la precipitación y la temperatura, y sus respectivos mapas de anomalías, para la obtención de los mapas climáticos corregidos (Figura 8).

Confiabilidad del modelo

Los resultados fueron validados mediante métodos estadísticos que indican el grado de concordancia entre los modelos y la realidad. Este proceso consiste en la comparación de los valores predichos por los mapas elaborados *vs.* los valores de las estaciones climáticas, correspondientes al conjunto de datos que no intervinieron en la calibración del modelo de regresión (30%).

Los resultados han sido expresados a través del coeficiente de determinación (R^2), el cual es el

índicador más recomendado para medir la fiabilidad (Vicente-Serrano *et al.*, 2003; Ninyerola *et al.*, 2005), obtenido a partir de una regresión de los datos reales y predichos. Este índice es adimensional, por lo que permite la comparación de distintos mapas; sin embargo, esto también dificulta tener una idea clara de la exactitud de la predicción. Por lo que también se empleó el RMSE (*Root mean square error*) ya que permite conocer el error en términos de las unidades del mapa (Willmott, 1982).

Los coeficientes de determinación (R^2) más altos para la temperatura se obtuvieron en el modelo de regresión simple del *Modelo buffer 20*. Con base en los resultados de confiabilidad, el mapa final de temperatura media de la cuenca de Cuitzeo fue el mapa de regresión corregido por la adición del mapa de anomalías, el cual presentó un valor de $R^2=0.73$ y un RMSE=0.64° C. El mapa de regresión simple sin corrección por residuales presenta los mismos valores en la prueba de confiabilidad exceptuando por la R^2 , con un valor de 0.72 (Tabla 9). Con base en el mapa obtenido, se presentan temperaturas medias anuales de 14.41° C para la cuenca, obteniendo una mínima de 9.5° C para las partes con mayor altitud de la cuenca, y una máxima de 17.95° C para la zona aledaña al vaso de la cuenca (Figura 9).

En los mapas de precipitación se observaron mejores resultados de confiabilidad para los modelos elaborados con la información *Modelo buffer 20*. El mapa final de precipitación anual fue el obtenido a partir del mapa de regresión sin corrección por residuales, presentando un coeficiente de determinación $R^2 = 0.746$ y un RMSE de 55.51 (Tabla 10). El valor medio de precipitación para la cuenca fue de 900 mm, el cual fue calculado con base en estadísticas en ILWIS, los valores de precipitación máxima son de 1 761.1 mm, los cuales se presentan en la zona correspondiente a Los Azufres en el oriente de la cuenca, así como en las principales elevaciones al sur de la misma; en cuanto a los valores mínimos (714 mm) se presentan en las partes cercanas al vaso del lago de Cuitzeo (Figura 10).

Con base en las pruebas de confiabilidad, los mejores resultados en el modelamiento de las variables climáticas se obtuvieron en los modelos realizados con las estaciones del *Modelo buffer*

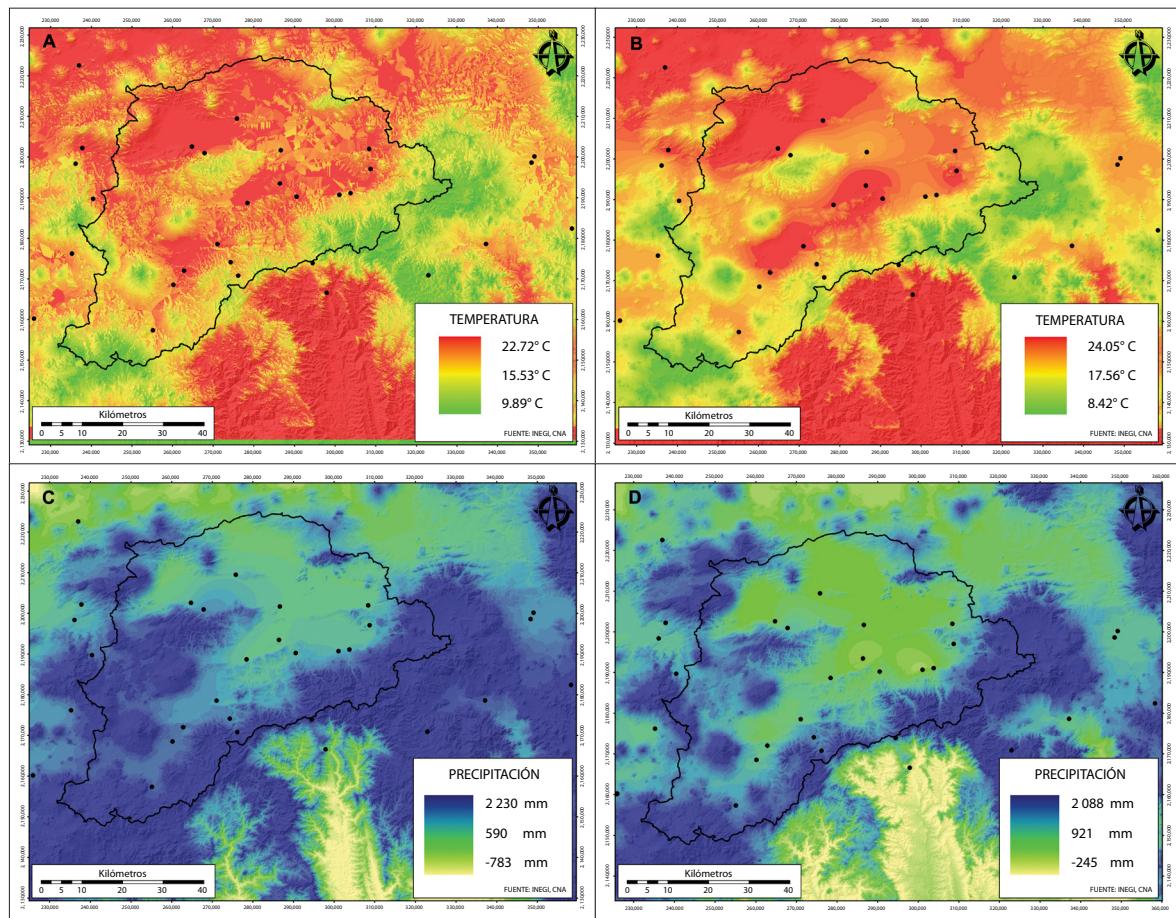


Figura 8. Mapas de temperatura y precipitación corregidos mediante residuales. A) Temperatura media anual corregido, obtenido mediante el análisis de regresión múltiple corregido con residuales con información del *Modelo buffer 20*; B) Temperatura media anual corregido, obtenido mediante análisis de regresión simple corregido con residuales con información del *Modelo buffer 20*; C) precipitación anual corregido, obtenido mediante corrección por residuales con información del *Modelo cuenca*; D) Mapa de precipitación anual corregido, obtenido mediante corrección por residuales con información del *Modelo buffer 20*.

Tabla 9. Medidas de exactitud para la validación de la cartografía de la temperatura, mediante la obtención de coeficientes de determinación (R^2) y RMSE

	REGRESIÓN MÚLTIPLE MODELO BUFFER 20		REGRESIÓN SIMPLE MODELO BUFFER 20	
	modelo	corregido	modelo	corregido
R^2	0.57	0.468	0.72	0.73
RMSE	0.42	0.44	0.64	0.64
CORR	0.759	0.68	0.85	0.855
PROB F	0.018	0.042	0.003	0.003

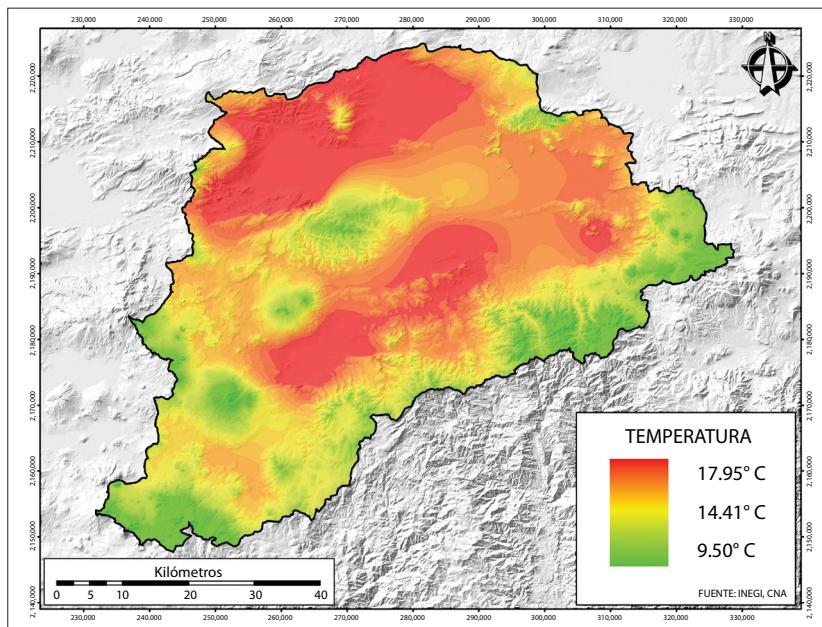


Figura 9. Mapa final de temperatura media anual de la cuenca de Cuitzeo.

Tabla 10. Medidas de exactitud para la validación de la cartografía de la precipitación, mediante la obtención de coeficientes de determinación (R^2) y RMSE

	MODELO CUENCA		MODELO BUFFER 20	
	REGRESIÓN	CORREGIDO	REGRESIÓN	CORREGIDO
R^2	0.34	0.246	0.746	0.6
RMSE	60.46	121.59	55.51	66.18
CORR	0.58	0.496	0.86	0.77
PROB F	0.22	0.316	0.012	0.04

20. No se obtuvieron mejoras significativas en la confiabilidad de los mapas mediante el proceso de corrección por residuales, caso similar al reportado por Vicente-Serrano *et al.* (2003). Por el contrario, se observó un decremento en los coeficientes de determinación mediante la aplicación de esta técnica a los modelos de precipitación.

CONCLUSIONES

Los datos climáticos en ocasiones pueden ser requeridos para puntos determinados en el espacio o para algún área en específico, para lo cual existe la necesidad de disponer de datos climáticos

continuos. Con este objetivo se han desarrollado técnicas de interpolación para la modelación de la precipitación y la temperatura, con la finalidad de conocer los datos climáticos en lugares donde no existe información. Sin embargo, para el caso de la cuenca de Cuitzeo, es deseable que las autoridades federales (CNA) y locales (COAPAS) instalen nuevas estaciones meteorológicas que garanticen la continuidad en la toma de datos, así como la calidad de la información, ubicadas con base en estudios previos que tomen en cuenta criterios físicos, orográficos y ecológicos.

Las variables climáticas elegidas para el modelamiento, mediante un análisis de correlación múltiple fueron precipitación, temperatura y os-

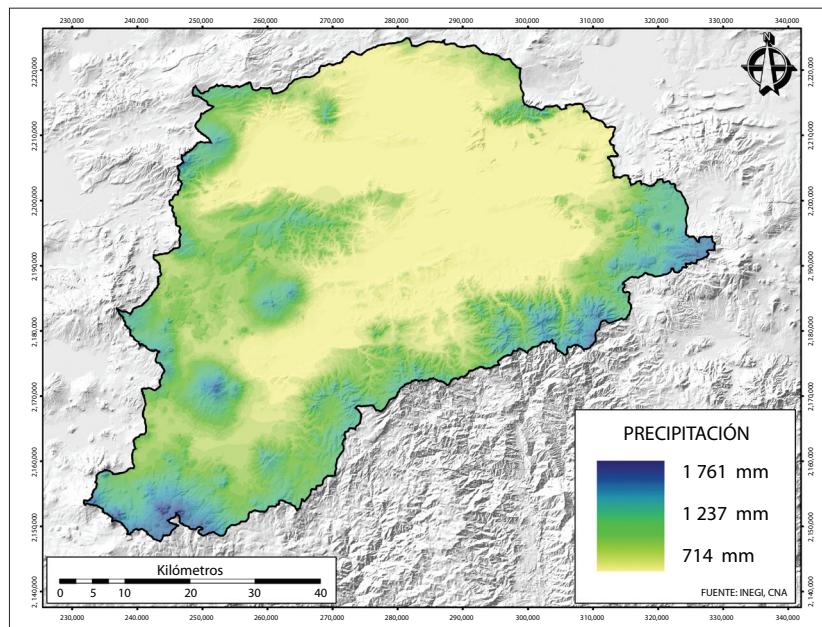


Figura 10. Mapa final de precipitación anual de la cuenca de Cuitzeo

cilación. Las variables geográficas como la latitud y la longitud no mostraron tener una correlación significativa con la temperatura, la precipitación y la oscilación, por lo que no fueron tomadas en cuenta al realizar un modelo de regresión múltiple. La exposición de ladera, aunque tuvo una correlación significativa con la temperatura, no mejoró los resultados de la confiabilidad del modelo.

Los resultados de la regresión simple de las variables climáticas con la altitud, mostraron los coeficientes más altos de determinación (R^2) en las pruebas de confiabilidad. El uso de técnicas de corrección de residuales no proporcionó mejoras significativas en los modelos, contrario a lo esperado, los coeficientes de determinación (R^2) disminuyeron y los *RMSE* aumentaron, exceptuando para el mapa de temperatura de regresión simple.

Con base en estos modelos para la cuenca de Cuitzeo, la variabilidad climática puede ser explicada en un alto porcentaje por la altitud. En el caso de la precipitación el 74% de la variabilidad del modelo está explicada por la altitud y para la temperatura en un 73%. Las proporciones no explicadas están relacionadas con factores extrínsecos al modelo o pueden ser parte del error del modelo mismo. El análisis estadístico del mapa de temperatura mostró una media anual de 14.41°C , mientras que los cál-

culos de precipitación anual son de 900 mm. Ambos modelos tienen coeficientes de determinación aceptables ($\text{Prob}>\text{F}=0.05$); sin embargo, los modelos podrían mejorarse de contar con una mayor cantidad de estaciones al interior de la cuenca, ya que la cantidad y calidad de los datos es una variable que afecta los resultados de un modelamiento.

Los mapas climáticos finales son valiosos instrumentos para modelar la distribución espacial de tipos de vegetación, así como especies vegetales, ya que el clima es un factor fundamental que junto con otras variables como la altitud, suelos, pendientes, exposición, entre otros, determinan la distribución de las comunidades vegetales y sus especies.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los proyectos de la UNAM, denominados: “Evaluación espacial y multitemporal de los cambios de cobertura y uso del terreno en la cuenca del lago de Cuitzeo: implicaciones para la sucesión forestal y el mantenimiento de la diversidad vegetal” (clave IN304408) y “Manejo de Ecosistemas e Impacto Humano” (clave SDEI-PTID-02) por el apoyo proporcionado para la elaboración de esta investigación, la cual forma

parte de la tesis de maestría del primer autor, quien agradece al CONACYT y a la DGEP UNAM las becas otorgadas durante la realización de la maestría en Geografía. Los autores agradecen a la CNA la cesión de datos climáticos.

REFERENCIAS

- Attorre F., M. Alfo, M. De Sanctis, F. Francesconi et F. Bruno (2007), "Comparison of interpolation methods for mapping climatic and bioclimatic variables at regional scale", *Int. J. Climatol.*, 27, pp. 1825-1843.
- Bennartz, D. and B. Michelson (2003), "Correlation of precipitation estimates from spaceborne passive microwave sensors and weather radar imagery for BALTEX PIDCAP", *Int. J. Remote Sensing.*, vol. 24, no. 4, pp. 723-739.
- Diodato, N. (2005), "The influence of topographic variables on the spatial variability of precipitation over small regions of complex terrain", *International Journal of Climatology*, 25, pp. 351-363.
- García, E. (2004), *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köepen*, Serie Libros, núm. 6, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Hartkamp, A. D., K. De Beurs, A. Stein and J. W. White (1999), "Interpolation techniques for climate variables", *NRG-GIS Series*, 99-01, Mexico, CIMMYT.
- ILWIS (2003), *Integrated Land and Water Management Information System*, User's Manual, ITC, The Netherlands.
- Israde A., I. (2005), "Los cuerpos de agua", en Villaseñor G., L. E. y O. A. Leal-Nares (eds.), *La biodiversidad en Michoacán: estudio de estado*, CONABIO, UMSNH, SUMA, México.
- Johnson, E. D. (2000), *Métodos multivariados aplicados al análisis de datos*, International Thomson Publishing, México.
- Marquínez J., J. Lastra and P. García (2003), "Estimation models for precipitation in mountainous regions: the use of GIS and multivariate analysis", *Journal of Hydrology*, 270, pp. 1-11.
- Mendoza C., M. E., E. López y G. Bocco (2001), *Regionalización ecológica, conservación de recursos naturales y ordenamiento territorial de la Cuenca de Cuitzeo, Michoacán*, Informe SIMORELOS- CONACYT (proyecto 98306024).
- Mendoza C., M. E. (2002), *Implicaciones del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo en el balance hídrico a nivel regional. El caso de la Cuenca del Lago de Cuitzeo*, tesis de Doctorado, Instituto de Geofísica, UNAM, México.
- Ninyerola M., X. Pons y J.M. Roure (2005), *Atlas Climático Digital de la Península Ibérica. Metodología y aplicaciones en bioclimatología y geobotánica*, Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra.
- Spellman, G. (2000), "The use of an ardex-based regression model for precipitation analysis on the Iberian peninsula", *Theor. Appl. Climatol.*, 66, pp. 229-239.
- Touazi, M., J. L. Pierre and N. Bhiry (2004), "Modelling rainfall-discharge at a mean inter-yearly scale in northern Algeria", *Journal of Hydrology*, 296, pp. 179-191.
- Vicente-Serrano, S. M., M. A. Saz and J. M. Cuadrat (2003), "Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro valley (Spain): application to annual precipitation and temperature", *Climate Research*, 24, pp. 161-180.
- Willmott C., J. (1982), "Some comments on the evaluation of model performance", *Bull Am. Meteorol. Soc.*, 63, pp. 1309-1313.
- Xu, C. Y. and V. P. Singh. (2001), "Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation", *Hydrol. Process.*, 15, pp. 305-319.
- Yang, X. (2004), *Modelling the spatial distribution of Tricholoma matsutake*, tesis de Maestría, Geo-information Science and Earth Observation (Environmental Systems Analyses and Management).