

INTERPOLACIÓN ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO/GRANDE

• Daniel Núñez-López* •

Universidad Autónoma de Nuevo León / Instituto de Ecología, A.C., México

*Autor de correspondencia

• Eduardo Javier Treviño-Garza •

Universidad Autónoma de Nuevo León, México

• Víctor Manuel Reyes-Gómez •

Instituto de Ecología, A.C., México

• Carlos Alfonso Muñoz-Robles •

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México

• Oscar Alberto Aguirre-Calderón • Javier Jiménez-Pérez •

Universidad Autónoma de Nuevo León, México

Resumen

La precipitación es una de las principales variables climáticas empleadas para describir procesos hidrológicos; sin embargo, su representación espacial es difícil en áreas con efecto orográfico complejo y escasa disponibilidad de estaciones. En el presente estudio se analizaron datos mensuales de precipitación para representar de manera fiable la distribución espacial de la precipitación media mensual (PMM) en la cuenca del río Bravo/Grande (CRB). Se utilizaron datos de 201 estaciones climáticas ubicadas al interior y en los alrededores de la cuenca. Con la información del 60% de estaciones seleccionadas de forma aleatoria se ajustaron modelos de regresión múltiple para predecir la PMM a partir de la elevación, la complejidad del relieve, la proximidad de zonas marítimas y la localización geográfica de estaciones climáticas, que explicaron entre 70 y 82% la variabilidad espacial de la precipitación que ocurre durante los meses del periodo húmedo. Se obtuvieron mapas mensuales de PMM calibrados espacialmente con la interpolación de los residuales. Con el restante 40% de estaciones se llevaron a cabo pruebas de validación estadística antes y después de la calibración. Las pruebas de validación mostraron valores de eficiencia (*EF*) comprendidos entre 0.41 y 0.82, y valores porcentuales del error medio absoluto (*%EMA*) entre 19.1 y 39.5%, siendo los modelos del periodo comprendido entre mayo y agosto los de mejor capacidad predictiva. La calibración de los modelos mejoró de manera significativa la fiabilidad de las interpolaciones en la totalidad de los modelos (*EF* entre 0.60 y 0.90, y *%EMA* entre 16.2 y 30.1), permitiendo obtener coberturas geográficas fiables de alta resolución espacial y con potencial de poder considerarlas como variables de entrada en modelos orientados a evaluar procesos hidrológicos en la CRB.

Palabras clave: regresión lineal múltiple, fiabilidad, prueba de eficiencia.

Introducción

La precipitación es una de las principales variables climáticas requeridas para la estimación

de balances hídricos, recargas de frontera en la modelación de flujos de agua subterránea, evaluar procesos de erosión, así como para definir las condiciones climáticas actuales. Sin

embargo, representar de manera fiable su distribución espacial es particularmente difícil en zonas montañosas con escasa disponibilidad de estaciones climáticas, en donde el efecto orográfico es grande (Daly *et al.*, 2002; Huade *et al.*, 2005). Diversos estudios comparan la eficiencia de procedimientos geoestadísticos y de métodos locales de interpolación espacial, con el fin de determinar el método más apropiado para representar de forma espacial la precipitación (Vicente-Serrano *et al.*, 2003; Apaydin *et al.*, 2004; Hong *et al.*, 2005). No obstante, estos métodos de interpolación consideran sólo las relaciones espaciales de las estaciones climatológicas situadas geográficamente y no toman en cuenta características del paisaje que influyen en la distribución de la precipitación, por lo que tienden a efectuar predicciones sesgadas. La influencia de la elevación del relieve sobre la distribución de la precipitación muestra en diversos estudios relaciones significativas que indican que la precipitación tiende a incrementarse con la elevación del relieve debido al efecto orográfico de las montañas (Daly *et al.*, 2002); sin embargo, esta relación es más complicada debido a que existen otros factores, como la exposición y complejidad del relieve, que juegan un papel determinante en la distribución de la precipitación en zonas montañosas (Daly *et al.*, 2002; Hession y Moore, 2011). Modelos estadísticos multivariados se han desarrollado en otros estudios para predecir la precipitación, considerando como variables predictivas: rasgos geográficos, mediciones regionales del relieve y factores de continentalidad. (Ninyerola *et al.*, 2000; Vicente-Serrano *et al.*, 2003; Diodato, 2005; Oettli y Camberlin, 2005). La combinación de modelos de regresión con métodos geoestadísticos hace posible el desarrollo de cartografía climática con predicciones precisas y mínima varianza espacial (Vicente-Serrano *et al.*, 2003).

La cuenca del río Bravo/Grande (CRB), situada en el norte de México, por su carácter binacional es considerada como una de las más importantes de país. En los últimos años

se ha intensificado la presión sobre el uso del agua al interior de la cuenca por los sectores agrícola, doméstico e industrial, situación que se ha complicado por la ocurrencia de sequías (Velasco *et al.*, 2004). Aunado a esto, existe presión internacional debida al cumplimiento del Tratado Internacional de 1944, que estipula la entrega anual de 432 millones m³ de agua a Estados Unidos de Norteamérica en el cauce del río Bravo/Grande (Kelly, 2001; Velasco *et al.*, 2004).

Comprender el desarrollo de procesos hidrológicos y, en términos generales, el funcionamiento hidrológico de la CRB, requiere una fiable representación de la distribución espacial y temporal de la precipitación que ocurre en la cuenca, por lo que en el presente estudio se propone el análisis de datos de Precipitación Media Mensual (PMM) de estaciones climáticas localizadas al interior y en los alrededores de la CRB, con los siguientes objetivos: (1) obtener la distribución espacial de la PMM en la CRB mediante modelos de regresión lineal múltiple, concebidos en función de la longitud, latitud, altitud sobre el nivel del mar, complejidad del relieve y proximidad de las zonas costeras, y (2) evaluar estadísticamente la fiabilidad de las interpolaciones obtenidas para cada mes.

Materiales y métodos

Área de estudio

La cuenca del río Bravo del lado mexicano (CRB) es identificada en términos de su manejo como la Región Hidrológica 24, denominada Bravo-Conchos (CNA, 2003). Geográficamente se sitúa entre los 107° 45' y 97° 15' de longitud oeste, y los 31° 50' y 24° 55' de latitud norte; cubre una superficie aproximada de 224 000 km², y se distribuye en parte de los estados de Durango, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas (figura 1).

La distribución de la precipitación que ocurre sobre la cuenca se caracteriza por la presencia de un periodo de lluvias abundantes,

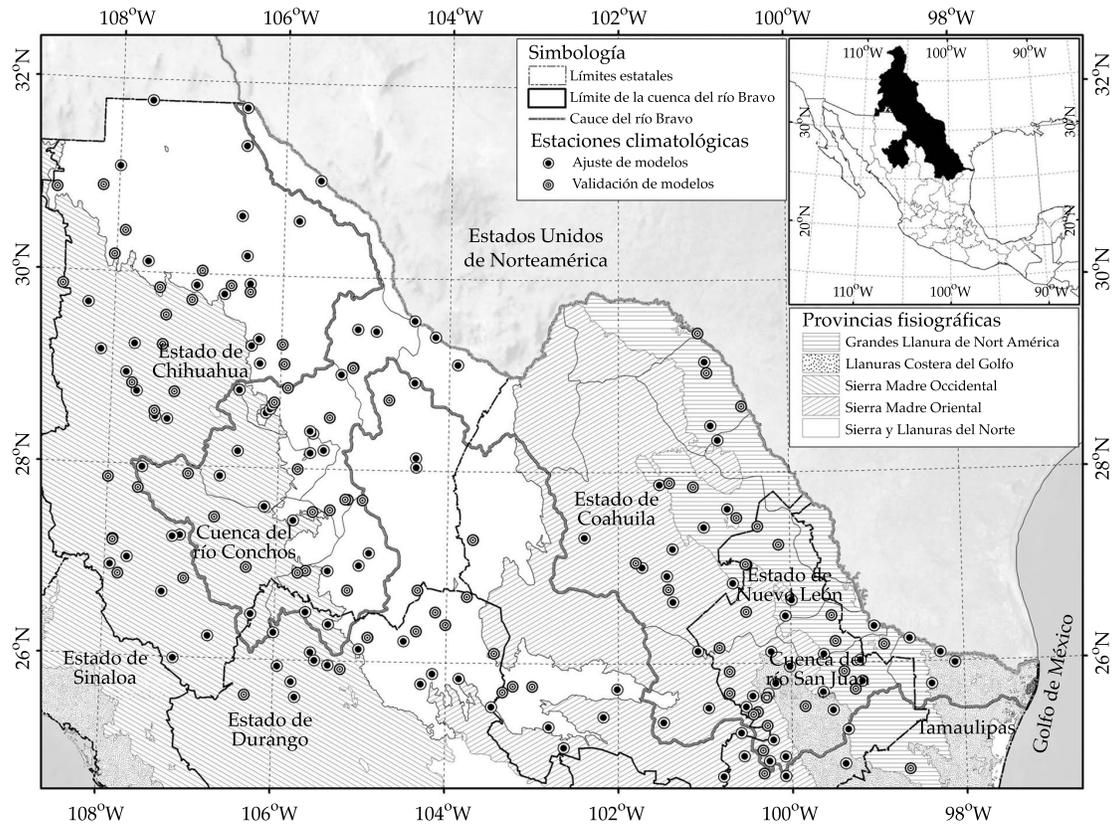


Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca del río Bravo y red de estaciones climáticas utilizadas. El mapa pequeño ubicado en la parte superior derecha muestra la totalidad de la cuenca del río Bravo/Grande.

claramente definido en el verano entre los meses de junio a septiembre, siendo agosto y septiembre los meses más húmedos del periodo. La precipitación media acumulada durante los meses lluviosos representa aproximadamente el 66% de la precipitación total anual captada en la cuenca (CNA, 2010).

Metodología

Se recopilaron series históricas de precipitación mensual provenientes de estaciones climatológicas administradas por la Comisión Nacional del Agua y el Servicio Meteorológico Nacional, que se encuentran distribuidas tanto al interior como al exterior de la CRB. En total se seleccionaron 201 estaciones que cumplieron con al menos 85% de los registros mensuales completos de precipitación en el periodo

comprendido de 1970 a 2004 (figura 1). Series de datos faltantes se determinaron en función de análisis de regresión entre estaciones con datos completos e incompletos de acuerdo con el procedimiento sugerido por Wanielista *et al.* (1997); finalmente, para cada estación climatológica se obtuvo la precipitación media mensual. Dado que los valores de PMM no se ajustan a una distribución normal, se llevaron a cabo transformaciones con funciones cuadráticas y logarítmicas para la normalización de las series de datos mensuales, previo al desarrollo de análisis de regresión.

Como variables independientes se consideraron las siguientes: ubicación geográfica de las estaciones; la proximidad de las estaciones a las zonas de costa; la elevación del relieve, y la influencia de la complejidad del relieve mediante el índice de sinuosidad topográfica

(TRI, *Topographic Ruggedness Index*), que fue derivado a partir de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE), con resolución espacial de 90 m (INEGI, 2008). El TRI es un parámetro que permite cuantificar la heterogeneidad de la topografía, expresando el cambio de la elevación promedio que existe en cada píxel de un MDE, respecto a la de los ocho pixeles que de inmediato lo rodean (Riley et al., 1999).

Para explorar el efecto combinado de las variables independientes sobre la PMM, se llevaron a cabo análisis de regresión lineal múltiple mediante procesos por pasos, con selección de variables hacia delante *Forward stepwise*. Las variables significativas fueron seleccionadas en función del nivel de significancia expresado por el valor de $p < 0.05$. Del total de estaciones climatológicas en estudio, se seleccionaron de manera aleatoria 60% para la obtención y el ajuste de modelos de regresión lineal múltiple. Los supuestos de normalidad de residuales y homogeneidad de varianzas fueron verificados para cada modelo de regresión mediante las pruebas estadísticas de Kolmogórov-Smirnov y Durbin Watson (Ninyerola et al., 2000; Vicente-Serrano et al., 2003).

La interpolación espacial se llevó a cabo empleando el programa especializado para el procesamiento de información geográfica *Arc/Info 9.2*©. Para cada modelo de regresión mensual se introdujeron los valores de longitud, latitud, elevación del relieve con la información proveniente del MDE, la proximidad de las zonas de costa y los valores del índice de sinuosidad topográfica (TRI), obteniéndose de este modo coberturas geográficas continuas de PMM. Los valores residuales obtenidos para cada estación climática fueron interpolados espacialmente empleando la técnica *spline*, con un valor de 400 en el parámetro de tensión, tal y como lo sugieren Vicente-Serrano et al. (2003), con lo que se derivaron coberturas geográficas de los residuos de cada modelo. Por último y mediante procesos de álgebra de mapas, las coberturas de valores residuales se integraron a los valores de PMM interpolados

con los modelos de regresión para el proceso de calibración espacial (Ninyerola et al., 2000; Vicente-Serrano et al., 2003).

La capacidad predictiva de cada modelo de regresión fue evaluada en función de los valores de PMM observados en el restante 40% de estaciones descartadas en los procesos de ajuste de modelos. Los parámetros estadísticos obtenidos para determinar la fiabilidad de cada modelo de regresión previo y posterior al proceso de calibración fueron el error medio absoluto *EMA* (ecuación (1), el valor porcentual del error medio absoluto *%EMA* (ecuación (2), y la prueba de eficiencia de modelos de Nash-Sutcliffe *EF* (ecuación (3)):

$$EMA = \frac{\sum |y_i - \hat{y}_i|}{n} \quad (1)$$

$$\%EMA = 100 * \frac{\sum \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{|y_i|}}{n} \quad (2)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

Donde *EMA* es el error medio absoluto; *%EMA*, el valor porcentual del error medio absoluto; *EF*, la eficiencia Nash-Sutcliffe del modelo; y_p , el valor de precipitación media mensual observada en el 40% de estaciones no consideradas en el ajuste; \hat{y} , el valor de precipitación estimado por el modelo de regresión, y \bar{y} es la precipitación media observada.

Resultados

En términos generales, los coeficientes de regresión múltiple r oscilaron entre 0.70 y 0.91, en tanto que los coeficientes de determinación r^2 se mantuvieron entre 0.49 y 0.82 (cuadro

1). Los modelos correspondientes al periodo comprendido entre mayo y agosto mostraron el mejor desempeño (r entre 0.83 y 0.91; r^2 entre 0.70 y 0.82); el resto de los meses presentaron coeficientes de correlación múltiple y de determinación ligeramente más bajos (r entre 0.70 y 0.82; r^2 entre 0.50 y 0.68), aunque con significancia estadística.

La proximidad de las zonas de costa mostró significancia estadística negativa en la totalidad de los meses del año, reflejando un claro efecto de continentalidad, que indica una

disminución de los valores de precipitación conforme más lejana se encuentra la zona marítima; este mismo efecto se observó también en la variable longitud geográfica, que muestra una significancia positiva en la mayoría de los modelos de regresión, exceptuando julio y agosto, lo cual indica que la precipitación tiende a incrementarse en valores de longitud próximos al este de la cuenca, es decir, en longitudes próximas a la costa del Golfo de México. Las variables topográficas representadas a través de la elevación del

Cuadro 1. Calidad de los modelos de regresión lineal múltiple obtenidos con el 60% de estaciones climatológicas y resultados de las pruebas de validación estadística, calculadas con el 40% de estaciones climatológicas no consideradas en los ajustes de modelos.

	Log (Ene.)	Log (Feb.)	Log (Mar.)	Log (Abr.)	Log (May.)	Log (Jun.)	Log (Jul.)	Log (Ago.)	Log (Sep.)	Log (Oct.)	Log (Nov.)	Log (Dic.)
R^*	0.82	0.73	0.82	0.75	0.83	0.87	0.91	0.91	0.70	0.81	0.73	0.72
R^2	0.68	0.53	0.68	0.56	0.70	0.77	0.82	0.82	0.50	0.65	0.53	0.53
EE	0.13	0.22	0.19	0.13	0.13	0.13	0.11	0.12	0.13	0.10	0.14	0.16
DW	1.93	1.85	1.45	1.84	1.88	2.08	2.00	1.78	1.94	1.87	2.02	1.94

Coefficientes de los modelos de regresión múltiple B

B_0	-0.9157	-3.8953	-5.0225	-4.4073	-2.0026	2.2096	2.9625	1.9470	0.9705	-0.6664	-0.5834	-0.9874
$B_1(X)$	3.6E-07	7.2E-07	1.1E-06	1.3E-06	1.1E-06	1.7E-07	-4.9E-07	-2.5E-07	1.9E-07	3.9E-07	2.9E-07	2.3E-07
$B_2(Y)$	6.2E-07	1.3E-06	1.5E-06	1.1E-06	4.6E-07	NS	NS	2.2E-07	2.9E-07	5.9E-07	5.2E-07	7.2E-07
$B_3(Z)$	7.8E-05	NS	9.6E-05	1.0E-04	NS	NS	7.6E-05	8.6E-05	NS	NS	NS	NS
$B_4(DC)$	-1.8E-06	-2.1E-06	-2.3E-06	-1.3E-06	-5.8E-07	-7.8E-07	-9.3E-07	-1.2E-06	-1.1E-06	-1.1E-06	-1.3E-06	-1.7E-06
$B_5(TRI)$	9.7E-04	1.6E-03	1.6E-03	7.9E-04	NS	NS	5.7E-04	5.3E-04	NS	1.1E-03	7.1E-04	1.2E-03

Pruebas de validación previo a calibración **

EF	0.59	0.58	0.49	0.41	0.74	0.82	0.77	0.76	0.42	0.49	0.45	0.53
EMA	4.6	3.6	4.1	4.1	6.5	10.7	14.9	14.8	18.1	7.6	4.4	5.5
%EMA	26.6	29.4	39.5	25.1	23.4	21.9	19.1	18.6	22.2	21.7	28.6	32.1

Pruebas de validación posterior a calibración **

EF	0.70	0.73	0.71	0.64	0.80	0.84	0.79	0.90	0.63	0.60	0.60	0.74
EMA	4.0	3.1	3.1	4.0	5.0	8.4	12.6	13.2	13.7	6.8	3.8	4.2
%EMA	23.3	25.3	30.1	24.2	18.1	17.1	16.2	16.6	16.8	19.4	24.7	24.5

* $p < 0.001$; EE = error estándar; DW = prueba de Durbin Watson; $B_1(X)$ = longitud; $B_2(Y)$ = latitud; $B_3(Z)$ = elevación; $B_4(DC)$ = proximidad a la costa; $B_5(TRI)$ = índice de sinuosidad topográfica; NS = sin significancia estadística ($p > 0.05$).

** Pruebas de validación obtenidas empleando el 40% de estaciones no consideradas en los ajustes de modelos.

EF = prueba de eficiencia de modelo de Nash-Sutcliffe.

MAE = error medio absoluto (mm).

MAE% = por ciento del error medio absoluto.

relieve y del índice de rugosidad topográfica mostraron significancia estadística de forma variable; la primera de éstas fue significativa sólo en los modelos correspondientes a los meses de enero, marzo, abril, julio y agosto, con una tendencia que indica un incremento en la precipitación conforme aumenta la elevación del relieve de la cuenca; en tanto que el índice topográfico que representa la heterogeneidad del relieve es significativa en la mayoría de los modelos, exceptuando mayo, junio y septiembre, lo cual indica que la precipitación tiende a ser mayor en zonas donde la altitud del relieve presenta alta variabilidad. Las pruebas estadísticas efectuadas para verificar los supuestos de normalidad e independencia de los residuales en cada modelo ajustado confirmaron la inexistencia de autocorrelación entre los residuos, así como la distribución normal de los residuos. Las pruebas de eficiencia obtenidas para las interpolaciones obtenidas con los modelos de regresión previamente al proceso de calibración arrojaron valores comprendidos entre 0.41 y 0.82; en tanto que el valor porcentual del error medio absoluto se mantuvo entre 19.1 y 39.5%. Los modelos correspondientes a los meses del periodo húmedo fueron los más destacados por su capacidad predictiva, presentando valores de *EF* que fluctuaron entre 0.74 y 0.82. Tal y como puede constatarse en el cuadro 1, la calibración de los modelos mediante la incorporación de valores residuales mejoró de manera notable la fiabilidad en todos los modelos de regresión; por una parte, los valores de *EF* se incrementaron a un rango comprendido entre 0.60 y 0.90 y, por otra, el valor porcentual del error medio absoluto disminuyó a un rango de valores comprendidos entre 16.2 y 30.1%.

Discusión

Los resultados de ajuste de modelos de regresión, los parámetros de la calidad de ajuste y las pruebas de eficiencia obtenidas para cada modelo son indicadores que ponen en evidencia la relación que guardan los

rasgos geográficos, la distancia continental a las zonas marítimas y la complejidad del relieve con la PMM que ocurre sobre la CRB (cuadro 1). La contribución de las variables independientes permitió explicar entre el 70 y 82% la variabilidad espacial de la PMM que se presenta particularmente durante los meses que comprenden el periodo húmedo en la CRB. La precipitación del periodo húmedo muestra sus máximos valores en las partes altas de la cuenca del río Conchos y se reduce conforme la elevación y complejidad del relieve disminuyen en dirección al río Bravo, situación que refleja un claro efecto orográfico producido por las montañas (figura 2). Este patrón de distribución de la precipitación concuerda con lo señalado por Brito-Castillo *et al.* (2010), quienes mencionan que en esa región del monzón en particular existe un patrón de distribución de la precipitación de sur a norte y de este a oeste. Las precipitaciones que ocurren durante el periodo húmedo en la parte alta de la cuenca del río Conchos parecieran estar influenciadas por el sistema atmosférico regional denominado circulación monzónica, que ocurre entre los meses de junio y septiembre (Douglas *et al.*, 1993; Reyes *et al.*, 1994). En la región oriental de la CRB, por su parte, los máximos valores de precipitación ocurren en las proximidades de la costa del Golfo de México y disminuyen conforme se aproxima la altiplanicie mexicana y aumenta la lejanía de la zona marítima, esto sugiere un patrón de distribución espacial de lluvia similar a lo indicado por García (2003), quien destaca que la zona del altiplano norte de México llueve menos por influencia de la continentalidad (lejanía del Golfo de México). Los coeficientes de determinación obtenidos en el presente estudio fueron ligeramente mayores a los obtenidos por Ninyerola *et al.* (2000) y Vicente-Serrano *et al.* (2003), al generar coberturas geográficas de precipitación y temperatura con modelos de regresión, considerando factores geográficos y topográficos como variables predictivas; de manera similar al presente estudio, las variables topográficas

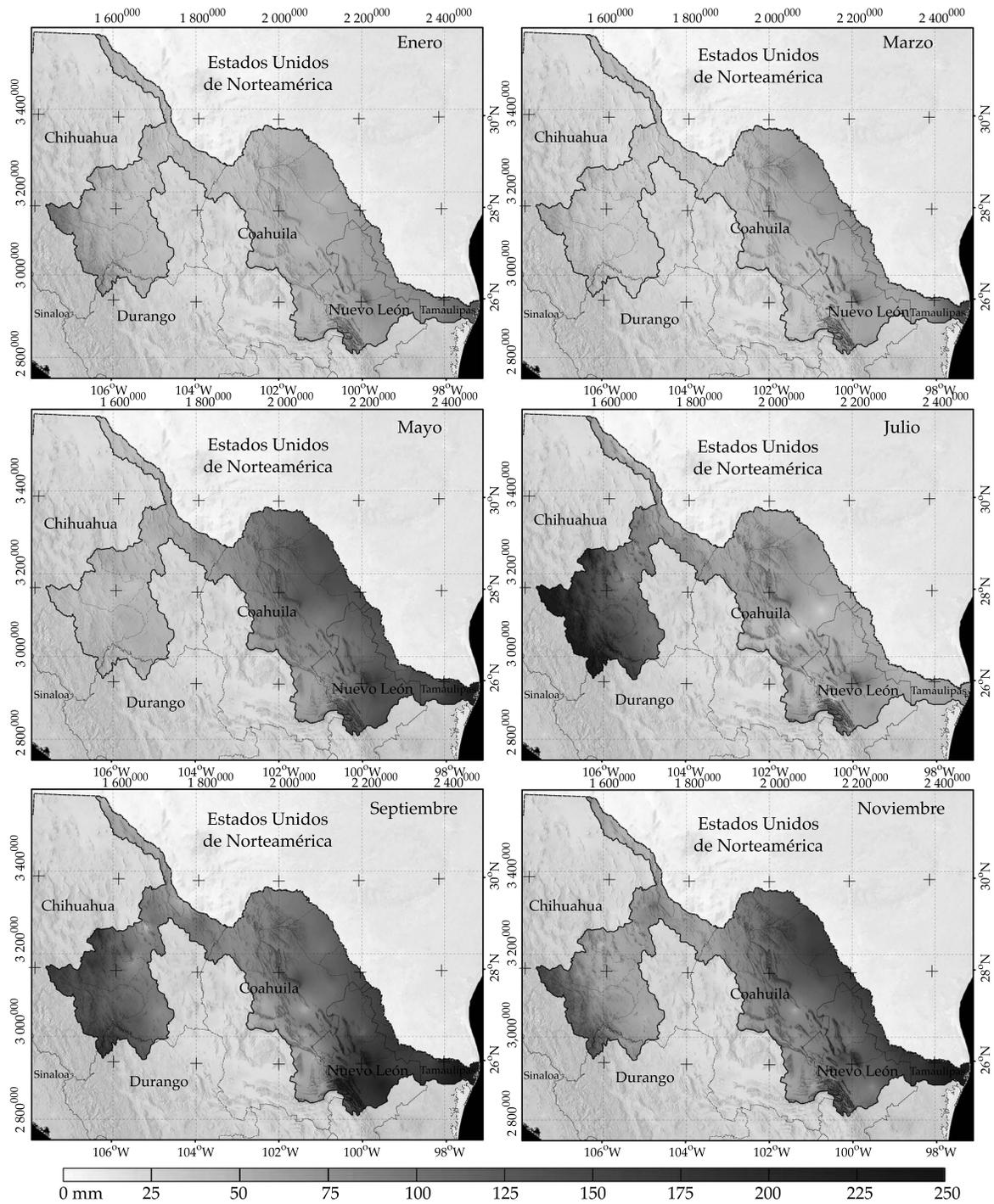


Figura 2. Ejemplos de coberturas de precipitación media mensual obtenidas con modelos de regresión lineal múltiple, calibrados espacialmente con los valores residuales interpolados espacialmente.

mostraron significancia estadística positiva en la contribución de los modelos de regresión. La calibración de los valores predichos por

los modelos mediante la integración de los residuales correspondientes permitió reducir la variabilidad espacial en cada modelo y

mejorar de forma significativa la calidad espacial de las interpolaciones, obteniendo de este modo coberturas geográficas de PMM confiables (figura 2).

Conclusiones

La estimación de la precipitación media mensual, en función de la proximidad de las zonas marítimas, de la ubicación geográfica de estaciones climáticas y de la elevación y complejidad del relieve, mediante el uso de modelos de regresión lineal múltiple calibrados con los valores residuales, permitió la obtención de coberturas continuas de PMM estadísticamente confiables y de alta resolución espacial para la CRB. La principal contribución del presente estudio radica en la generación de coberturas continuas de PMM de alta resolución espacial y estadísticamente fiables, tal y como lo demostraron las pruebas de validación (cuadro 1). Los mapas generados cuentan con el potencial de constituirse como una herramienta de gran utilidad para evaluar y/o modelar las variaciones espaciales y temporales de los procesos hidrológicos que ocurren en la CRB.

Recibido: 17/01/12

Aceptado: 31/08/12

Referencias

- APAYDIN, H., KEMAL, F.S., and ERSOY, Y.Y. Spatial interpolation techniques for climate data in the GAP region in Turkey. *Climate Research*. Vol. 28, 2004, pp. 31-40.
- BRITO-CASTILLO, L., VIVONI, E.R., GOCHIS, D.J., FILONOV, A., TERESHCHENKO, L., and MONZON, C. An anomaly in the occurrence of the month of maximum precipitation distribution in northwest Mexico. *J. Arid Environ.* Vol. 74, 2010, pp. 531-539.
- CNA. *Programa Hidráulico Regional 2002-2006. Región Río Bravo*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua, 2003, 242 pp.
- CNA. *Estadísticas del Agua en México. Edición 2010*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua, 2010, 249 pp.
- DALY, C., GIBSON, W.P., TAYLOR, G.H., JOHNSON, G.L., and PASTERIS, P. A knowledge-based approach to the statistical mapping of climate. *Climate Research*. Vol. 22, 2002, pp. 99-113.
- DIODATO, N. The influence of topographic co-variables on the spatial variability of the precipitation over small regions of complex terrain. *Int. J. Climatol.* Vol. 25, 2005, pp. 351-363.
- DOUGLAS, M.W., MADDOX, R.A., HOWARD, K., and REYES, S. The Mexican Monsoon. *J. Climate*. Vol. 6, 1993, pp. 1665-1677.
- GARCÍA, E. Distribución de la precipitación en la República Mexicana. *Investigaciones Geográficas*. Vol. 50, 2003, pp. 67-76.
- HESSION, S.L. and MOORE, N. A spatial regression analysis of the influence of topography on monthly rainfall in East Africa. *Int. J. Climatol.* Vol. 31, 2011, pp. 1440-1456.
- HUADE, G., WILSON, J.L., and MAKHNIN, O. Geostatistical mapping of mountain precipitation incorporating autosearched effects of terrain and climatic characteristics. *J. Hydrometeorol.* Vol. 6, 2005, pp. 1018-1031.
- HONG, Y., NIX, H.A., HUTCHINSON, M.F., and BOOTH, T.H. Spatial interpolation of monthly mean climate data for China. *Int. J. Climatol.* Vol. 25, 2005, pp. 1369-1379.
- INEGI. *Sistema de descarga del continuo de elevaciones mexicano* [en línea]. Instituto Nacional de Geografía Estadística e Informática, 2008. Disponible para World Wide Web: <http://mapserver.inegi.org.mx/DescargaMDEWeb/> [descargado el 22 de marzo de 2008].
- KELLY, E.M. *The Río Conchos: A Preliminary Overview* [online]. Texas Center for Policy Studies. Available from: <http://www.texascenter.org/publications.html#texasmexico2001> [accessed January, 7, 2011].
- NINYEROLA, M., PONS, X., and ROURE, J.M. A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques. *Int. J. Climatol.* Vol. 20, 2000, pp. 1823-1841.
- OETTLI, P. and CAMBERLIN, P. Influence of topography on monthly rainfall distribution over East Africa. *Climate Research*. Vol. 283, 2005, pp. 199-212.
- REYES, S., DOUGLAS, M.W., and MADDOX, R.A. El monzón del suroeste de Norteamérica (TRAVASON/SWAMP). *Atmósfera*. Vol. 7, 1994, pp. 117-137.
- RILEY, S.J., DEGLORIA, S.D., and ELLIOT, R. A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. *Intermountain Journal of Sciences*. Vol. 5, 1999, pp. 1-4.
- VICENTE-SERRANO, S.M., SAZ-SÁNCHEZ, M.A., and CUADRAT, J.M. Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro Valley (Spain): application to annual precipitation and temperature. *Climate Research*. Vol. 24, 2003, pp. 161-180.
- VELASCO, V.I., APARICIO, F.J., VALDÉS, J. y VELÁZQUEZ, J. Evaluación de índices de sequía en las cuencas afluentes del Río Bravo/Grande. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. IX, núm. 3, 2004, pp. 37-53.
- WANIELISTA, M.P., KERSTEN, R., and EAGLIN, R. *Hydrology*. New York: Wiley and Sons, 1997, 567 pp.

Abstract

NÚÑEZ-LÓPEZ, D., TREVIÑO-GARZA, E.J., REYES-GÓMEZ, V.M., MUÑOZ-ROBLES, C.A., AGUIRRE-CALDERÓN, O.A. & JIMÉNEZ-PÉREZ, J. *Spatial interpolation of monthly mean precipitation in the Rio Bravo/Grande basin*. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*. Vol. IV, No. 2, April-June, 2013, pp. 185-193.

Precipitation is one of the primary climatic variables used to describe hydrological processes. Nevertheless, their spatial representation is difficult in areas with complex orographic effects and limited coverage of weather stations. The present study analyzed monthly rainfall data in order to reliably represent the spatial distribution of monthly mean precipitation (MMP) in the Bravo/Grande River Basin (CRB). Data were used from 201 weather stations located inside and around the basin. With information from 60% of the stations, selected randomly, multiple linear regression models were fitted to predict MMP as a function of elevation, complexity of the topography, coastal proximity and geographic location of stations, which explained between 70 and 82% of the spatial variability of precipitation occurring during the rainy period. Monthly maps of MMP were obtained, which were spatially calibrated by interpolating the residuals. Validation tests of the spatial calibration were conducted before and after for the remaining 40% of the stations. The validation tests showed efficiency values (EF) between 0.41 and 0.82 and mean absolute percentage error values (%EMA) between 19.1% and 39.5%. The best predictive months were from May to August. The calibration of the models significantly improved the reliability of the interpolations for every month (EF between 0.60 and 0.90, %EMA between 16.2% and 30.1%), making it possible to obtain reliable geographical coverage and high spatial resolution, with the potential for considering them as input variables in models to assess hydrological processes in the CRB.

Keywords: multiple linear regression, reliability, efficiency test.

Dirección institucional de los autores

M.C. Daniel Núñez-López
Dr. Eduardo Javier Treviño-Garza
Dr. Oscar Alberto Aguirre-Calderón
Dr. Javier Jiménez-Pérez

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ciencias Forestales
Carretera Nacional, km 145
Apartado Postal 41
67700 Linares, Nuevo León, México
Teléfono: +52 (821) 212 4895
Fax: +52 (821) 212 4895, extensión 111
daniel.nunez@live.com.mx
eduardo.trevinogr@uanl.edu.mx
oscar.aguirrecl@uanl.edu.mx
javier.jimenezp@uanl.edu.mx

Dr. Víctor Manuel Reyes-Gómez

Instituto de Ecología, A.C.
Red de Medio Ambiente y Sustentabilidad
Km 33.3, carretera Chihuahua-Ojinaga
32910 Cd. Aldama, Chihuahua, México
Teléfono: +52 (614) 4510 905
victor.reyes@inecol.edu.mx

Dr. Carlos Alfonso Muñoz-Robles

Instituto de Investigación de Zonas Desérticas
Coordinación de Ciencias Sociales y Humanidades
Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Altair número 200, Colonia del Llano
78377 San Luis Potosí, San Luis Potosí, México
Teléfono: +52 (444) 8422 359
carlos.munoz@uaslp.mx