

Metodología para investigar tendencias espacio-temporales en eventos meteorológicos extremos: caso Durango, México

• Ma. Esperanza Blanco* • Humberto Vaquera • José A. Villaseñor •

• J. René Valdez-Lazalde •

Colegio de Postgraduados, México

*Autor de correspondencia

• Michel Rosengaus •

Consultor privado en hidrometeorología

Resumen

Blanco, M. E., Vaquera, H., Villaseñor, J. A., Valdez-Lazalde, J. R., & Rosengaus, M. (noviembre-diciembre, 2014). Metodología para investigar tendencias espacio-temporales en eventos meteorológicos extremos: caso Durango, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(6), 25-39.

Se propone una metodología basada en la teoría de valores extremos para investigar cambios espacio temporales en la tendencia a largo plazo de las variables meteorológicas precipitación y temperatura. Se presenta un ejemplo de aplicación para el estado de Durango, México, analizando los máximos anuales de las variables temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación ocurridos de 1961 a 2000. Los resultados se presentan en mapas de tendencias de eventos extremos. Para el caso del estado de Durango se observan cambios en el comportamiento de eventos extremos, manifestándose una clara tendencia a la ocurrencia de años más secos y más cálidos en algunas zonas del estado.

Palabras clave: series de tiempo, teoría de valores extremos, modelo lineal vectorial generalizado, interpolación espacial.

Introducción

La variabilidad temporal del clima, en particular de la intensidad y frecuencia de fenómenos climáticos extremos, puede afectar a la sociedad con más fuerza que los cambios en los promedios de dichos fenómenos (Katz & Brown, 1992). En el mundo, los eventos climáticos extremos son causa de desastres naturales (inundaciones, incendios, sequías, etc.), lo cual afecta severamente el ambiente y la vida humana (Min,

Abstract

Blanco, M. E., Vaquera, H., Villaseñor, J. A., Valdez-Lazalde, J. R., & Rosengaus, M. (November-December, 2014). *Methodology to Investigate Spatio-Temporal Trends in Extreme Weather Events: Case Durango, Mexico*. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 5(6), 25-39.

A methodology based on extreme value theory is proposed to investigate spatio-temporal changes in the long-term trend of the meteorological variables precipitation and temperature. We present an application for the state of Durango Mexico, analyzing maximum annual values of maximum temperature, minimum temperature, and precipitation registered during the time period 1961-2000. The presented results are trend maps of extreme events. For the case of Durango State, time changes in the behavior of extreme events are present, showing a clear trend towards the occurrence of dryer years and warmer temperatures in some areas of the state.

Keywords: Time series, extreme value theory, vector generalized linear model, spatial interpolation.

Recibido: 16/10/12

Aceptado: 21/07/14

Zhang, Zwiers, & Hegerl, 2011). En México, los estados de Coahuila, Chihuahua, Durango, Zacatecas, San Luis Potosí, Tamaulipas, Aguascalientes, Sonora y norte de Guanajuato fueron declarados zonas de desastre por una inusual sequía durante los años 2011 y 2012.

Según Allan y Soden (2008), y Min *et al.* (2011), es probable que la inusual frecuencia de eventos meteorológicos extremos esté relacionada con el incremento de los gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera por la actividad humana

y que causan el calentamiento global. La predicción de este tipo de eventos en el ámbito regional presenta un reto considerable; sin embargo, el esfuerzo bien vale la pena, dado lo esencial de la predicción en la formulación de estrategias para la adaptación y mitigación de los efectos negativos provocados por dichos cambios (Allan, 2011). Contar con métodos estadísticos adecuados para analizar el comportamiento espacio-temporal de variables meteorológicas extremas (temperatura máxima y mínima, precipitación máxima y mínima, velocidad máxima de vientos, etc.) es de suma importancia para la implementación de acciones de mitigación de dichos eventos.

Recientemente se ha realizado un esfuerzo científico importante (Rahmstorf & Coumou, 2011) para analizar las mediciones de temperatura inusualmente calientes (récord) y su relación con las tasas de calentamiento global y de eventos de precipitación extremos (She et al., 2013). De acuerdo con varios autores (Katz, Parlange, & Naveau, 2002; Cooley, 2009; Min et al., 2011; Rahmstorf & Coumou, 2011), el modelo probabilístico de la distribución de Valores Extremos Generalizada (*DGEV*) ofrece una base firme para modelar extremos climáticos. Una amplia base teórica sobre el modelo de *DGEV* se puede encontrar en Rolf-Dieter-Reiss (1997) y Coles (2001). Por otro lado, Yee y Stephenson (2007) proponen un caso particular del *VGAM* (*Vector Generalized Additive Models*), el *VGLM* (*Vector Generalized Linear Models*), para modelar los parámetros de la distribución de valores extremos como funciones lineales de covariables.

Objetivo general

Proponer una metodología estadística para identificar las tendencias espacio-temporales extremas de las variables climáticas temperatura máxima ($T_{\text{máx}}$), precipitación máxima (P) y temperatura mínima ($T_{\text{mín}}$), utilizando conjuntamente el modelo de *DVEG*, el modelo *VGAM* y herramientas geoestadísticas.

Objetivos particulares

- Investigar si las series climáticas del estado de Durango presentan comportamientos inusuales.
- Elaborar y mostrar mapas de tendencias espacio-temporales en variables climáticas del estado de Durango, como posible evidencia de áreas en donde pueden presentarse desastres naturales.

Metodología

Base de datos

La fuente de información utilizada en este trabajo es la malla uniformemente distribuida *Maya v1.0*, obtenida de las interpolaciones de *CLICOM* (México Climatological Station Network Data) del Servicio Meteorológico Nacional.

Se ubican, según coordenadas (latitud, longitud), los 270 nodos del estado de Durango de la *Maya v1.0*, que registran la información diaria de las observaciones de las variables meteorológicas (temperatura máxima ($T_{\text{máx}}$), temperatura mínima ($T_{\text{mín}}$) y precipitación máxima (P), del estado de Durango, en el periodo 1961-2000.

Se ordena la información de cada nodo por fecha y se obtienen los valores extremos (máximos, mínimos, percentiles), por bloques anuales, según el teorema de Fischer-Tippet en la teoría de valores extremos; los valores máximos (mínimos, percentiles) se modelan con la Distribución de Valores Extremos Generalizada (*DGEV*) como sigue:

Modelo estadístico propuesto

Distribución de valores extremos

Sean X_1, \dots, X_n variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas, con función de distribución F . Sea el máximo de las observaciones $M_n = \max\{X_1, \dots, X_n\}$. El teorema de Fischer Tippet (Rolf-Dieter Reiss,

1997) indica que $\left[\lim_{n \rightarrow \infty} P\left(\frac{M_n - a_n}{b_n} \leq z\right) \rightarrow G(z) \right]$ con $\{a_n\} \in \mathbb{R}$ y $\{b_n > 0\}$; $G(z)$ es llamada la Distribución de Valor Extremo Generalizada (DVEG), definida por:

$$G(z) = \exp \begin{cases} -\exp\left[-\left(\frac{z-\mu}{\sigma}\right)\right], \xi = 0 \\ \exp\left\{-\left[1 + \xi\left(\frac{z-\mu}{\sigma}\right)\right]^{\frac{1}{\xi}}\right\}, \xi \neq 0, 1 \\ +\xi\left(\frac{z-\mu}{\sigma}\right) > 0 \end{cases} \quad (1)$$

Donde μ es el parámetro de localidad, σ es el parámetro de escala y ξ es el parámetro de forma.

Según el límite de DGEV (1), cuando $\xi \rightarrow 0$, tenemos la llamada distribución Gumbel, la distribución Fréchet con $\xi > 0$ y la distribución Weibull con $\xi < 0$.

Modelo de regresión usando la DGEV

Un modelo que puede usarse para realizar regresión en los parámetros de DGEV (1) es el Modelo Lineal Generalizado Vectorial (VGLM), un caso particular del Modelo Lineal Generalizado de Vectores Aditivos (VGAM) propuesto por Yee y Stephenson (2007). El modelo VGLM permite que los parámetros de la distribución de valores extremos se puedan modelar como funciones lineales o suavizadas de covariables. Esto es:

$$y_i | x_i \sim DGEV(\mu(x_i), \sigma(x_i), \xi(x_i)) \quad (2)$$

La regresión en (2) de los parámetros del modelo DGEV (1) se realiza como sigue:

$$\eta_1 = \log\left(\xi + \frac{1}{2}\right) \beta_{11} + \beta_{12} x_i \quad (3)$$

$$\eta_2 = \log(\sigma) = \beta_{21} + \beta_{22} x_i \quad (4)$$

$$\eta_3 = \mu = \beta_{31} \quad (5)$$

con coeficientes de regresión desconocidos y donde $\eta = (\eta_3, \eta_2, \eta_1) = \left(\mu, \log(\sigma), \log\left(\xi + \frac{1}{2}\right)\right)$ representa la coordenada de funciones monótonas, llamadas "función liga". Es posible estimar los parámetros de la distribución DVEG y del modelo VGLM usando un paquete computacional del programa R, llamado VGAM (Yee, 2008).

Se utiliza una prueba de razón de verosimilitudes generalizada para probar la estacionariedad, usando la verosimilitud de los modelos completo y reducido.

Prueba de razón de verosimilitudes generalizada para tendencia en la serie de extremos

Se investiga la existencia de tendencia en series de valores extremos, se incluye el factor tiempo (t) como covariable x_i en la regresión (3), (4), (5) de los parámetros del modelo DGEV (1). Así, para $Y_t \sim DGEV(\mu, \sigma(t), \xi(t))$, los valores máximos (mínimos) anuales tomados en el tiempo (t). Se plantea la hipótesis de interés, como sigue:

H_0 : no existe evidencia estadística de tendencia en los parámetros de la distribución de valores extremos generalizada:

$$\begin{aligned} &\text{Modelo reducido } (M_0) \\ &= Y_1 \sim GEV(\eta_3^{-1}(\beta_3), \eta_2^{-1}(\beta_2), \eta_1^{-1}(\beta_1)) \end{aligned} \quad (6)$$

H_1 : existe evidencia estadística de tendencia con respecto a los parámetros de escala y de forma:

$$\begin{aligned} &\text{Modelo completo } (M_1) \\ &= Y_t \sim GEV(\eta_3^{-1}(\beta_{31}), \eta_2^{-1}(\beta_{21} + \beta_{22}t), \eta_1^{-1}(\beta_{11} + \beta_{12}t)) \end{aligned} \quad (7)$$

Se utiliza la estadística de prueba:

$$\chi_0^2 = 2[\ell(M_1) - \ell(M_0)] \sim \chi_{P_1 - P_0}^2 \quad (8)$$

Donde p_i es el número de parámetros de M_i ; $\ell(M_i)$ es la log-verosimilitud del modelo M_i con $i = 1, 0$.

La regla de decisión es rechazar la hipótesis nula si χ_0^2 es mayor que un valor de tablas de la distribución $\chi_{p_1-p_0}^2$. Se utiliza el paquete *VGLM* bajo el programa *R* (Team, 2008) para ajustar el modelo completo (7) (cuando el tiempo es la variable predictora), donde se asume que la serie es no estacionaria y suponiendo estacionariedad en el modelo reducido (sin el tiempo como covariable). Los coeficientes β_{12} y β_{22} del modelo (7) representan el efecto de tendencia en la variable de extremos.

Se estiman los coeficientes de tendencias bajo el modelo *VGLM*, los cuales, dado que se obtienen usando el método de máxima de verosimilitud para muestras grandes, se distribuyen normalmente.

Método de Interpolación

Se aplica el método kriging ordinario para interpolar las tendencias. Se presentan los mapas de tendencia para las variables meteorológicas utilizando la aplicación *ArcGIS 8.1*.

Kriging es un método de interpolación espacial usado en investigación climática (Drignei, 2009). El modelo ordinario de kriging es el siguiente:

$$Z(s) = \mu + \varepsilon(s) \tag{9}$$

donde $s = (x, y)$ es un punto en el espacio. El predictor está formado por la suma ponderada de los datos:

$$Z(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \tag{10}$$

donde s_0 es el punto sobre el que se requiere la estimación. N es el número de puntos alrededor de s_0 que se usan para la predicción. Los λ_i son los pesos para cada una de las mediciones. $Z(s_i)$ son los valores observados en el punto S_i , $\tilde{Z}(S_0)$ es la estimación sobre S_0 .

Los estimadores λ_i son los valores que minimizan:

$$\left(Z(s_0) - \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \right)^2 \tag{11}$$

Sujetos a la restricción de que la suma de los pesos λ_i sea igual a 1.

La solución a la minimización, sujeto a la restricción, está dada por la ecuación kriging siguiente:

$$\tilde{\lambda} = \Gamma^{-1}g \tag{12}$$

Donde:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \dots & \gamma_{1N} & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{N1} & \dots & \gamma_{NN} & 1 \\ 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_N \\ m \end{bmatrix} \quad g = \begin{bmatrix} \gamma_{10} \\ \vdots \\ \gamma_{N0} \\ 1 \end{bmatrix}$$

Donde m es desconocido y es estimado de forma que se cumpla con la restricción $\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1$, los γ_{ij} son las semivarianzas calculadas con el semivariograma ajustado, con la distancia entre los puntos s_i y s_j ; y los γ_{i0} son las semivarianzas calculadas con el semivariograma ajustado, con la distancias entre el punto s_0 y los puntos s_i .

El semivariograma ajustado es el modelo que ajusta al semivariograma empírico, el cual es una gráfica entre las distancias y la semivarianza promedio observada en dicha distancia. La semivarianza entre dos puntos es igual a 0.5 multiplicado por la diferencia entre los valores elevada al cuadrado.

El modelo esférico para el semivariograma es definido como sigue:

$$\gamma(h, \theta) = \begin{cases} \theta_s \left[\frac{3 \|h\|}{2 \theta_r} - \left(\frac{\|h\|}{2 \theta_r} \right)^3 \right] & \text{para } 0 \leq \|h\| \leq \theta_r \\ \theta_s & \text{para } \theta_r \leq \|h\| \end{cases} \tag{13}$$

Donde $\theta_s \geq 0$ es el parámetro de umbral y $\theta_r \geq 0$ es el parámetro de rango.

Validación del modelo

La validación del modelo es usando los valores de log verosimilitud reportados por VGAM.

Descripción esquemática

En las figuras 15 y 16 se muestra la síntesis de la metodología propuesta y el diagrama en general de la propuesta para analizar datos de eventos extremos, con la finalidad de que el uso de esta metodología aporte información, con otro conjunto de datos, en el análisis de valores extremos.

Resultados

Análisis descriptivo de las variables temperatura máxima ($T_{m\acute{a}x}$), temperatura mínima ($T_{m\acute{i}n}$) y precipitación máxima (P)

La variable $T_{m\acute{a}x}$ muestra una marcada variación en las pendientes de regresión asociadas con el parámetro de escala, lo cual indica que a lo largo de los cuarenta años analizados, los valores se han alejado de la media en temperatura máxima, significativamente. La ubicación de los 270 nodos (*Maya v1.0*) y de algunas localidades (puntos grises) en el estado de Durango se muestran en la figura 1.

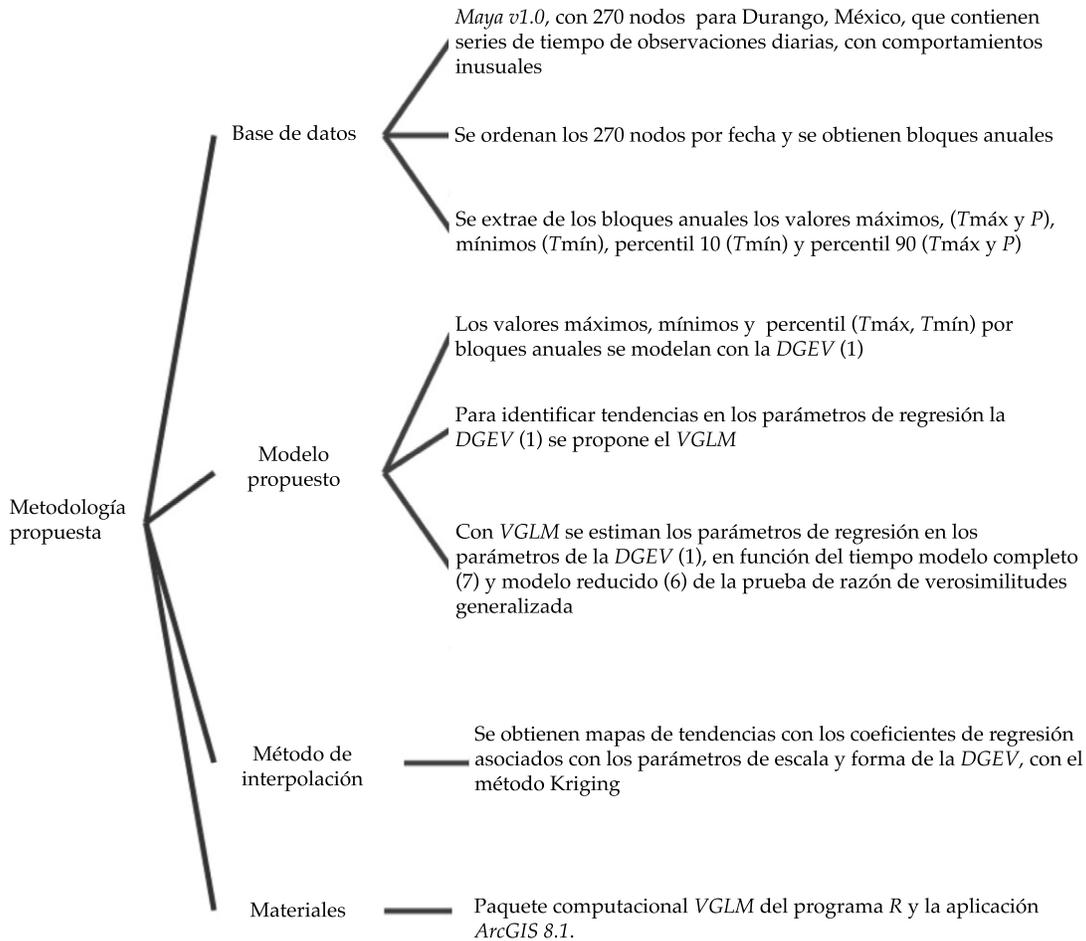


Figura 15. Descripción esquemática de la metodología que se propone.

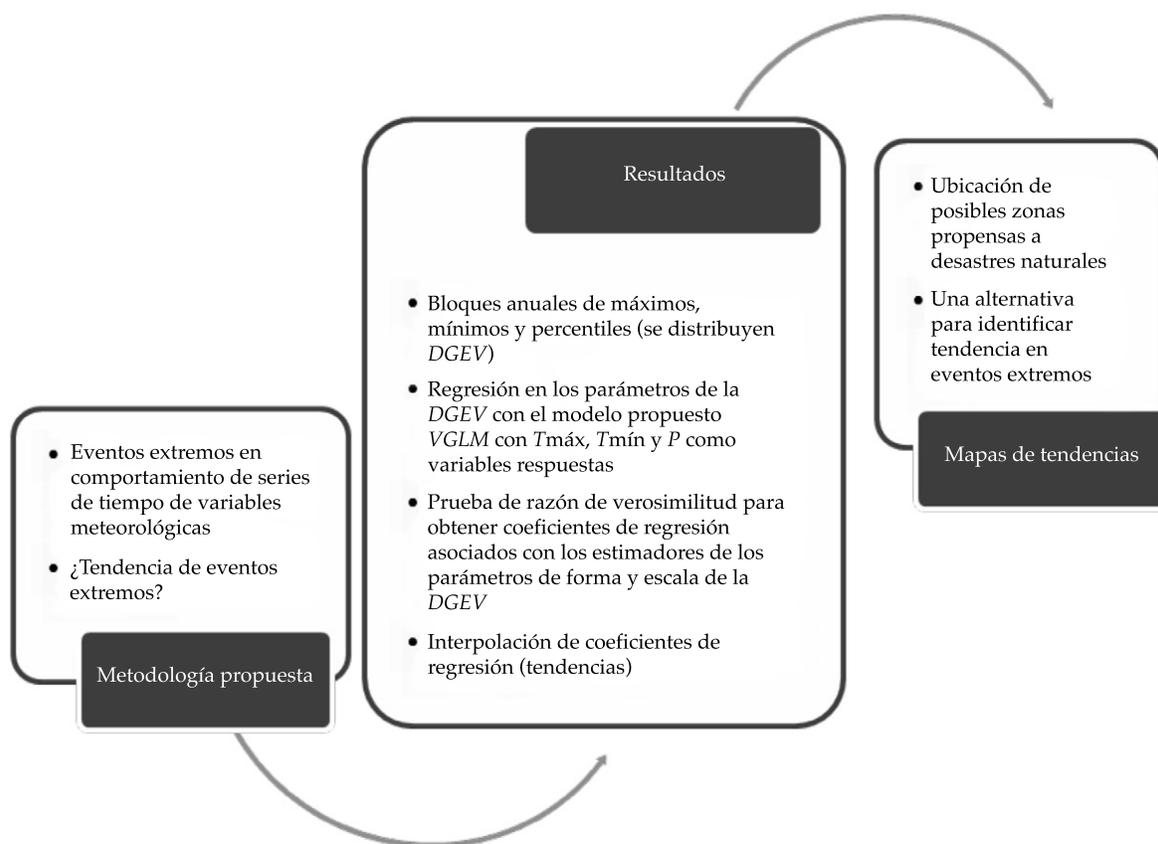


Figura 16. Diagrama en general de la propuesta para analizar datos de eventos extremos.

En las figuras 2, 3 y 4 se plasma el comportamiento de las series de tiempo de las variables climáticas temperatura máxima anual, temperatura mínima anual y precipitación, en algunas localidades señaladas.

Algunas localidades al norte del estado de Durango presentan temperatura máxima mayor que algunas localidades al sur; El Salto registra la temperatura máxima menor.

En la figura 3, algunas localidades al sur del estado de Durango presentan temperaturas mínimas menores que algunas localidades al norte a lo largo de cuarenta años; la localidad El Salto registra las temperaturas mínimas menores.

En la figura 4 se indica la variación anual en la precipitación máxima (milímetros) de las localidades. Las localidades de El Salto y Durango presentan en el inicio de la tercera

década una tendencia positiva; sin embargo, es complicado observar alguna tendencia.

En la figura 5 se presenta el comportamiento de los valores máximos y mínimos de temperatura (promedio diario de 14 600 días), del percentil 90 ($T_{máx}$, P) y del percentil 10 ($T_{mín}$). Los valores representan el promedio diario de los 270 nodos.

Los valores de percentil y los valores de máximos de los promedios diarios de las variables ($T_{máx}$, $T_{mín}$, P) indican que no hay tendencia, aunque el comportamiento de la serie de tiempo en las observaciones de percentil muestra que es posible cometer errores; a pesar de los cambios bruscos que se observan, ello no es evidencia de tendencia con los valores máximos. Luego es preciso realizar un estudio por nodo, en vez de los

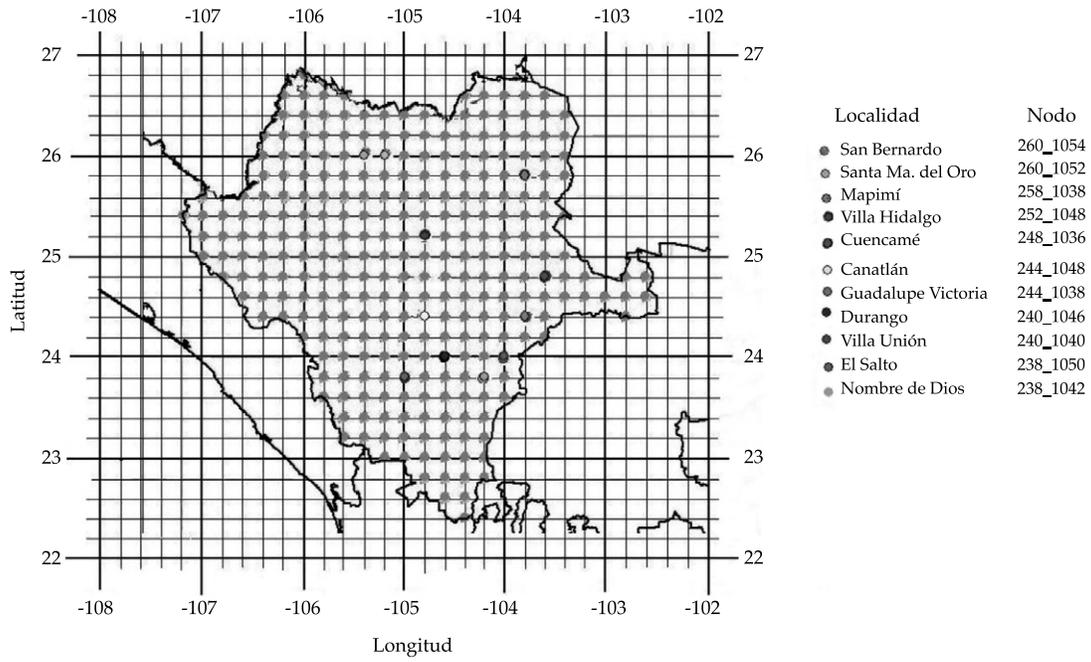


Figura 1. Nodos de *Maya v1.0* ubicados en el área de estudio.

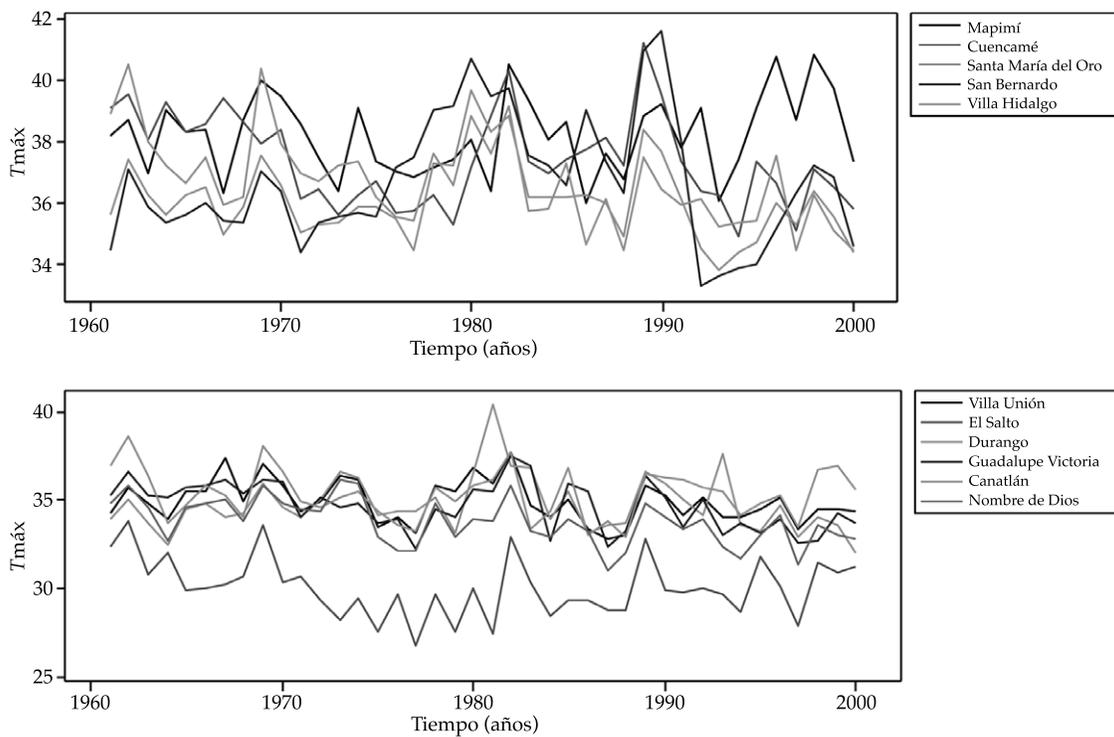


Figura 2. Series de tiempo anuales de $T_{máx}$ (grados) de algunas localidades del estado de Durango (1961-2000).

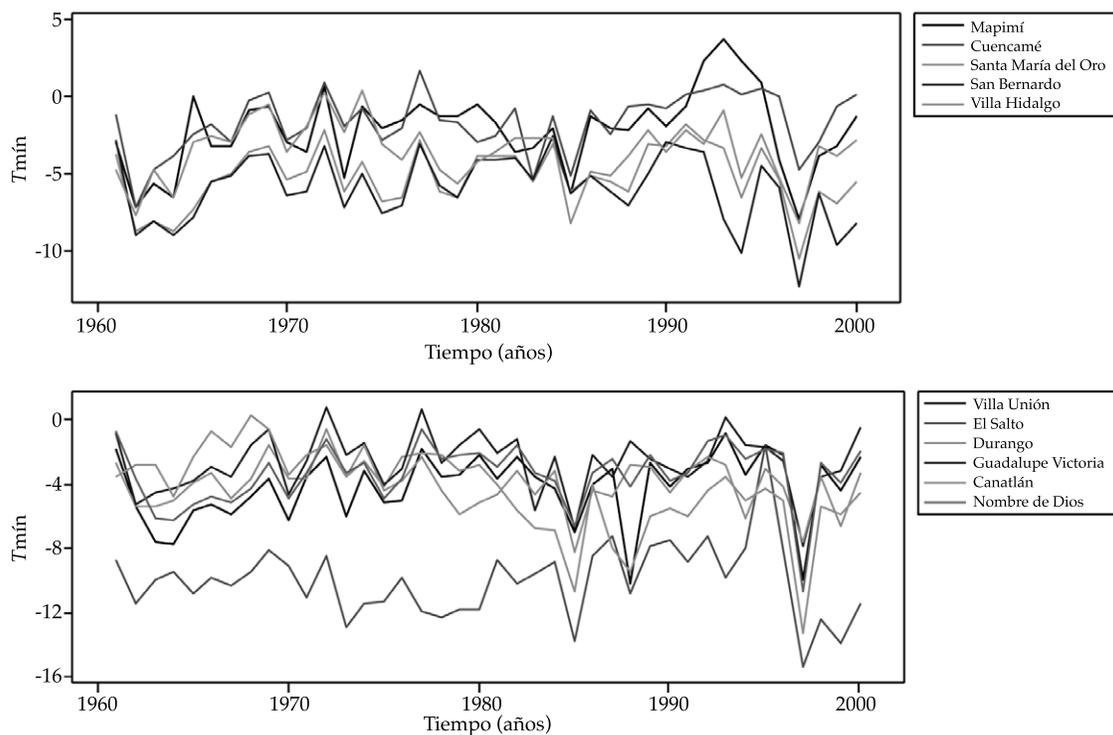


Figura 3. Series de tiempo anuales de $T_{mín}$ (grados) de algunas localidades del estado de Durango (1961-2000).

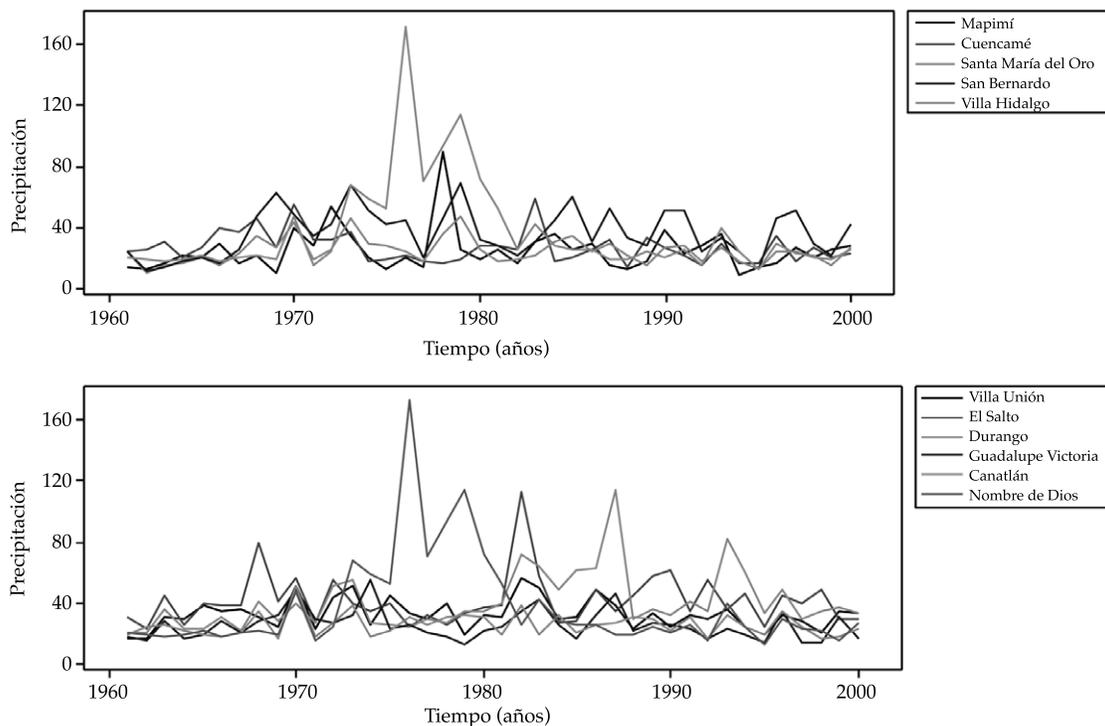


Figura 4. Series de tiempo de precipitaciones máximas (milímetros) anuales de algunas localidades del estado de Durango (1961-2000).

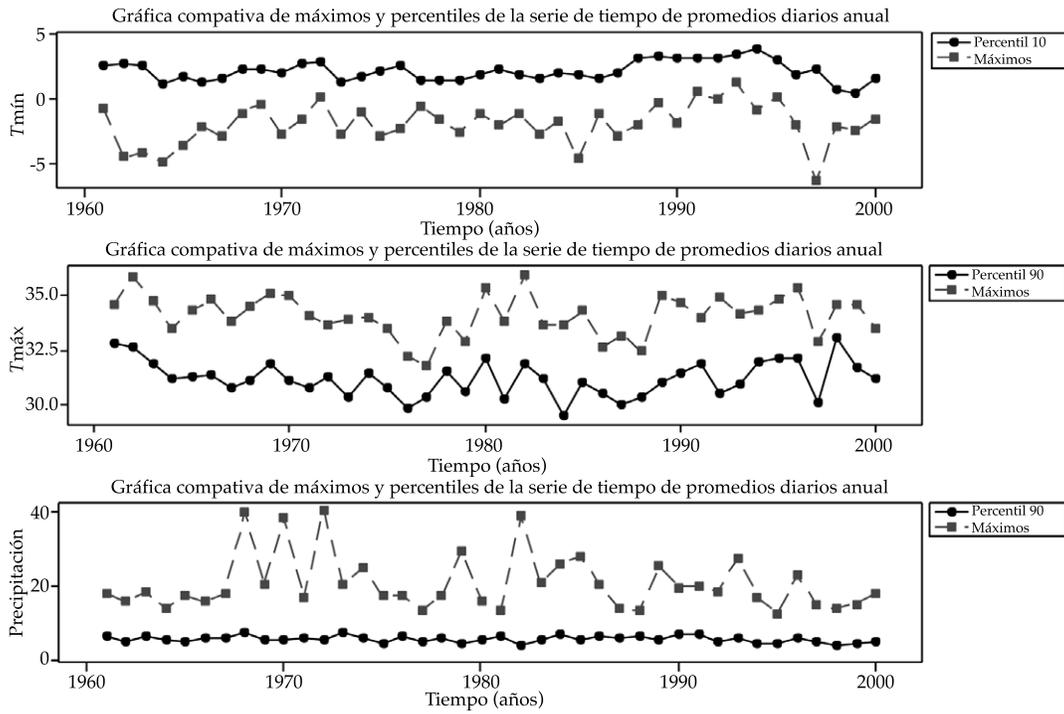


Figura 5. Series de tiempo de valores máximos y percentiles de promedios diarios, anuales de 270 nodos del estado de Durango (1961-2000).

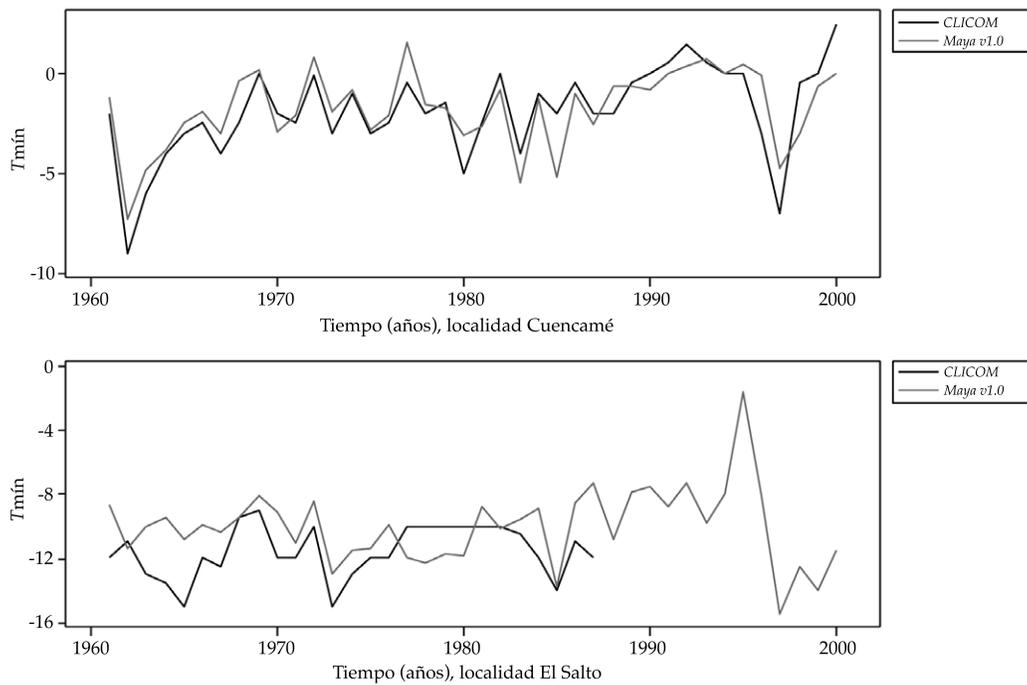


Figura 6. Series de tiempo de valores máximos de Tmín registrados en las bases de datos CLICOM y MAYA v1.0 para Cuencamé y El Salto, Durango, periodo (1961-2000).

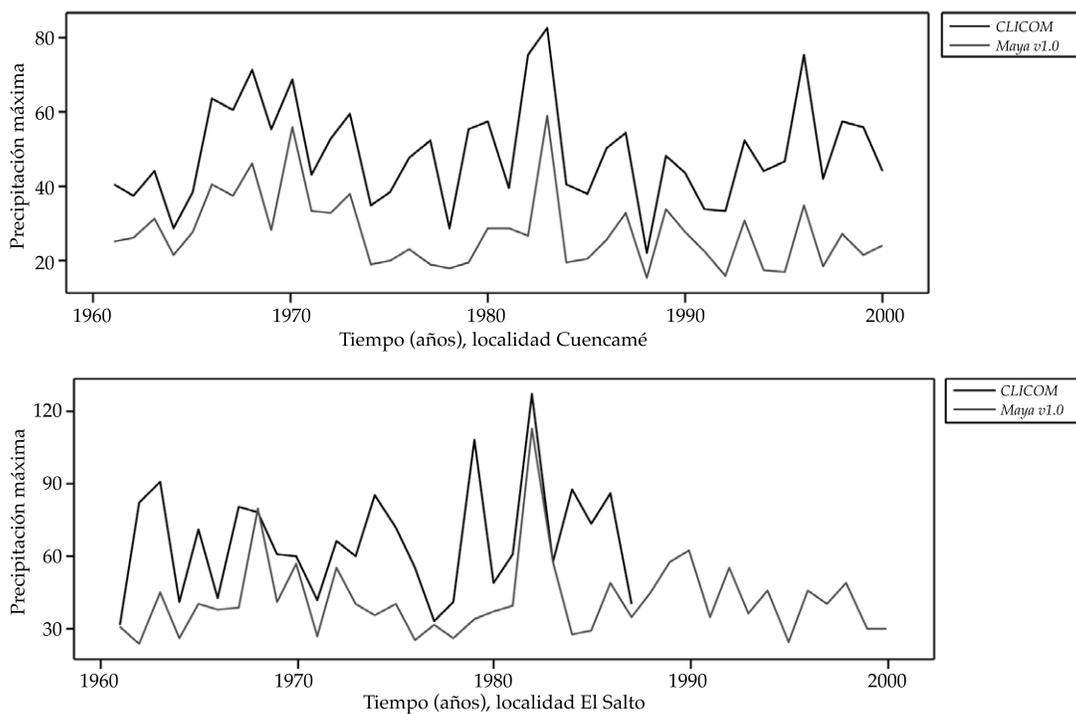


Figura 7. Series de tiempo de valores máximos de precipitación máxima registrados en las bases de datos CLICOM y Maya v1.0 para Cuencamé y El Salto, Durango, periodo 1961-2000.

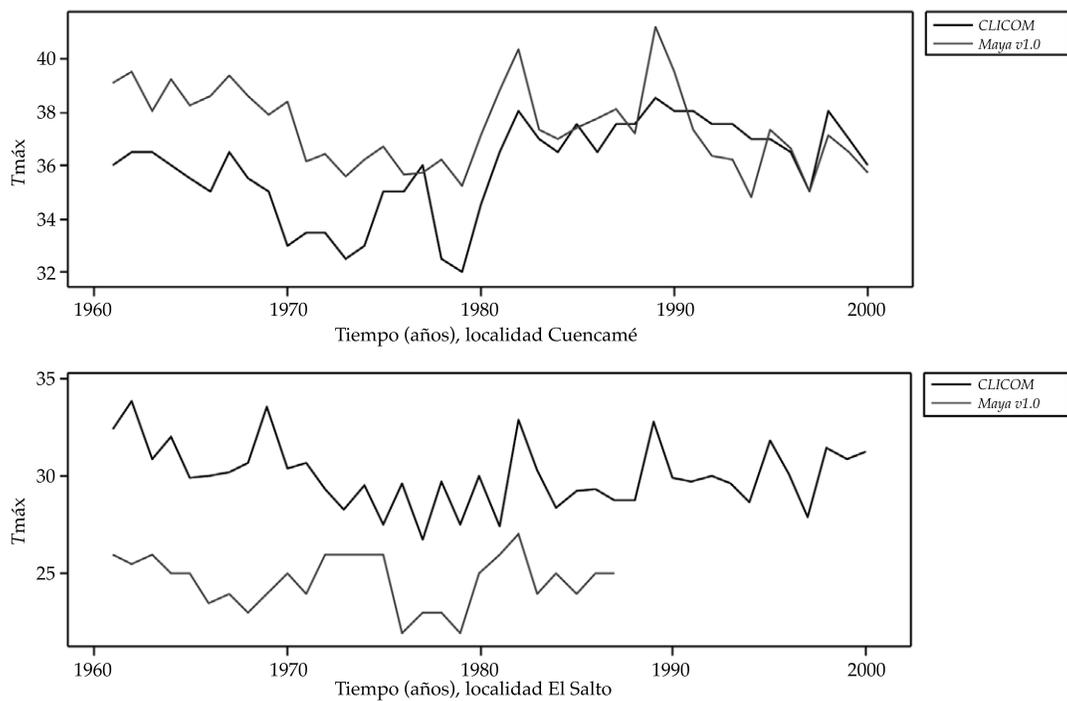


Figura 8. Series de tiempo de valores máximos de $T_{máx}$ registrados en la bases de datos CLICOM y Maya v1.0 para Cuencamé y El salto, Durango, periodo 1961-2000.

valores promedios diarios como gráfica representativa del estado de Durango.

Las figuras 6, 7 y 8 presentan un comparativo de las series de tiempo registradas en las bases de datos *CLICOM* y *Maya v1.0*, para algunas localidades. Se usaron valores máximos.

En la figura 6, la serie de tiempo registrada en *Maya v1.0* para la localidad de Cuencamé presenta similitud en su comportamiento, comparada con la serie de tiempo de *CLICOM*. Las series registradas en *CLICOM* para la localidad El Salto no está completa.

En la figura 7 se observa la serie de tiempo de la localidad Cuencamé; presenta valores máximos de *Maya v1.0* por debajo de las observaciones de *CLICOM*, con diferencias significativas. El Salto carece de información al término de la tercera década.

En la figura 8 se indica la serie de tiempo de la localidad de Cuencamé, que registra valores mayores de *Maya v1.0* en relación con los de *CLICOM*; los valores máximos de El Salto de *CLICOM* por encima de los valores máximos de *Maya v1.0*.

De las figuras 6, 7 y 8 se nota que es posible tomar un valor extremo en *Maya v1.0*, que esté muy alejado del valor extremo de *CLICOM*, para ubicar si los posibles cambios en las tendencias se preservan; se comparan los valores máximos anuales de las variables meteorológicas ($T_{\text{máx}}$, $T_{\text{mín}}$, P) con los valores percentiles 90 anuales (en $T_{\text{máx}}$, P) y percentil 10 anual (en $T_{\text{mín}}$), y se implementa la metodología propuesta tanto en valores máximos anuales como en percentiles anuales de *Maya v1.0*.

Estimación de tendencias en el comportamiento de las variables climáticas

Los cuadros 1, 2 y 3 contienen el modelo completo (7), el modelo reducido (8) y las pendientes de regresión (3) y (4) asociadas con los parámetros de escala y forma del modelo (1), además de los resultados de la estadística de prueba (8).

En el cuadro 4 se presentan las tendencias en el ajuste de *VGLM* con respecto a los parámetros

de escala y forma en los 270 nodos en el estado de Durango, bajo la hipótesis nula (tendencia) y la hipótesis alternativa (no tendencia) de la prueba de razón de verosimilitudes.

En el cuadro 5 se muestran las tendencias en el ajuste de *VGLM*, en cuanto a los valores percentil 90 y 10 de los coeficientes de regresión asociados con los parámetros de escala y forma en los 270 nodos en el estado de Durango, bajo la hipótesis nula (tendencia) y la hipótesis alternativa (no tendencia) de la prueba de razón de verosimilitudes generalizada.

Mapas de tendencias en las variables climáticas.

Se usan los coeficientes de regresión β_{12} y β_{22} (las pendientes de regresión asociadas con los parámetros de escala y forma, respectivamente), para obtener los mapas de tendencia para las variables meteorológicas mediante interpolación en la aplicación *ArcGIS 8.1*. Los resultados se presentan a continuación (figuras 9 a 14).

Se pudo notar que hay similitudes en ciertas regiones al comparar los mapas de tendencias, obtenidas con valores máximos anuales y los valores percentil 90 anuales.

En las figuras 9 a 14, se observa que hay un aumento considerable en la tendencia (positiva y negativa) en el parámetro de escala, en temperaturas máximas anuales en algunas áreas del estado, en temperaturas mínimas y precipitación máxima anual, lo cual significa que estas regiones son más propensas a manifestar algún fenómeno climático extremo (por la tendencia de los cuarenta años de estudio). Los mapas generados se pueden emplear para localizar áreas donde eventos extremos pueden ser aún más severos en el futuro. Al norte y al oeste del estado se presentan las temperaturas máximas mayores; al sureste del estado, temperaturas mínimas menores; y al sur y suroeste, precipitación máxima menor.

Cuadro 1. Modelo completo (M_1), donde β_{12} y β_{22} corresponden a las pendientes de regresión asociadas con los parámetros de la DGEV (1), y $\ell(M_1)$ el valor de log-verosimilitud.

Modelo completo (M_1)			
Localidad	β_{12}	β_{22}	$\ell(M_1)$
El Salto	0.10045735	0.002131688	-156.5825
Cuencamé	-0.20115133	-0.006367134	-138.919
Durango	0.42849085	0.30995383	-149.7359

Cuadro 2. Modelo reducido (6) de la prueba de razón de verosimilitud (8) para probar tendencias en la precipitación máxima (1961-2000) en algunas localidades de Durango.

Modelo reducido (M_0)	
Localidad	$\ell(M_0)$
El Salto	-156.9733
Cuencamé	-141.5256
Durango	-161.2376

Cuadro 3. Prueba de razón de verosimilitud (8) para detectar tendencias en la precipitación máxima (1961-2000) en algunas localidades de Durango. El estadístico de prueba es $\chi^2_{(0.95,1)} = 3.841459$.

Localidad	Regla de decisión	Tendencias
El Salto	$0.78152139 < \chi^2_{(0.95,1)}$	0
Cuencamé	$5.21314379 > \chi^2_{(0.95,1)}$	1
Durango	$23.003907 > \chi^2_{(0.95,1)}$	1

Cuadro 4. Resultados de ajuste usando VGAM, con valores máximos (para $T_{\text{máx}}$, P) y mínimos ($T_{\text{mín}}$).

Variable	Nodos no convergentes	Nodos convergentes	Tendencias significativas al 5%
Precipitación máxima	20	250	93
Temperatura máxima	18	252	161
Temperatura mínima	11	259	157

Cuadro 5. Resultados de ajuste usando VGAM, utilizando valores percentil 90 ($T_{\text{máx}}$, P) y percentil 10 ($T_{\text{mín}}$).

Variable	Nodos no convergentes	Nodos convergentes	Tendencias significativas al 5%
Precipitación	15	255	97
$T_{\text{mín}}$	20	250	183
$T_{\text{máx}}$	12	258	196

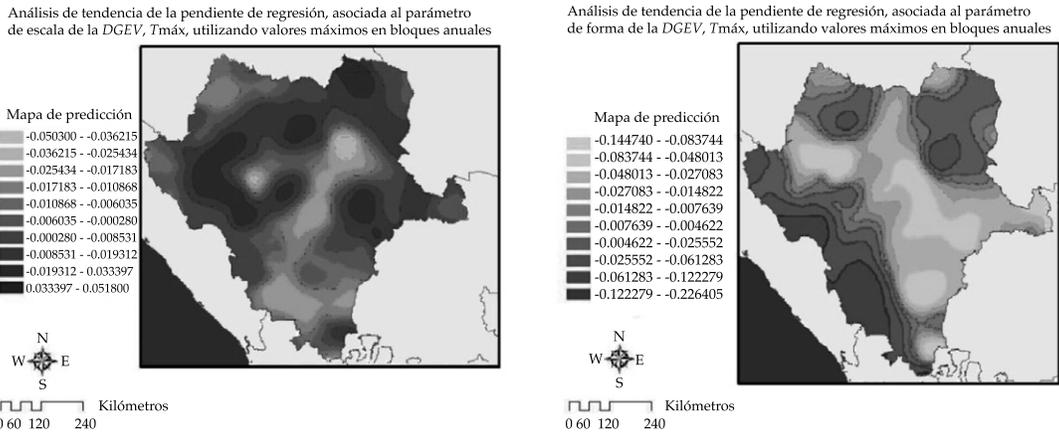


Figura 9. Mapas de tendencia de la pendiente de regresión asociada con el parámetro de escala y de forma de la DVEG para la variable $T_{máx}$. Se usaron valores máximos.

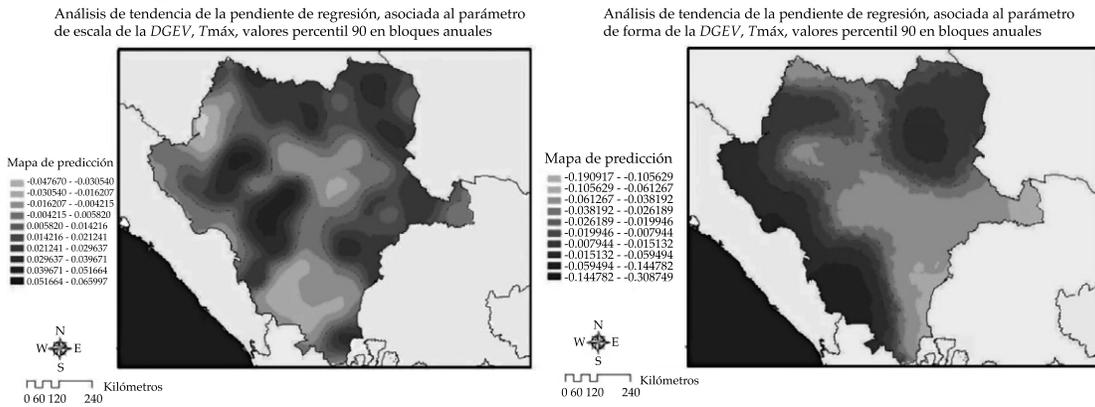


Figura 10. Mapas de tendencia de la pendiente de regresión asociada con el parámetro de escala y de forma de la DVEG para la variable $T_{máx}$. Se usaron valores del percentil 90.

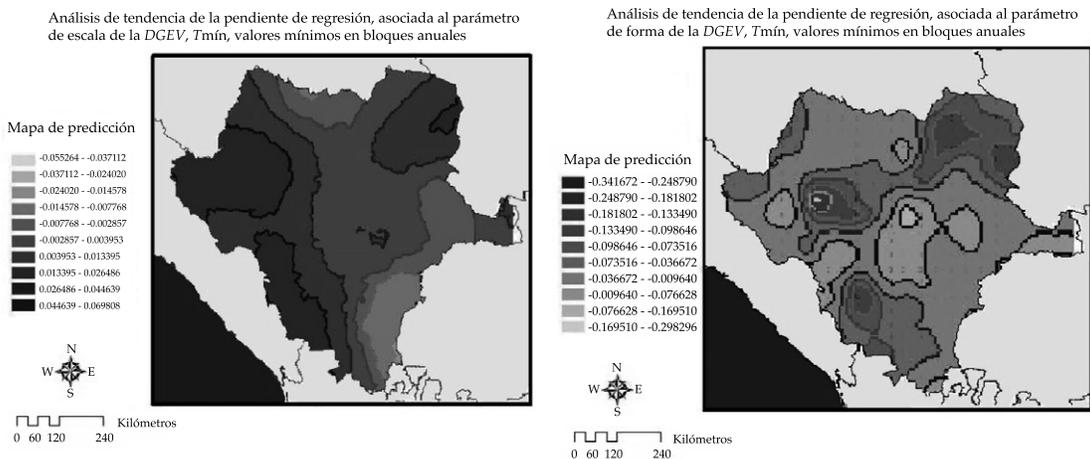
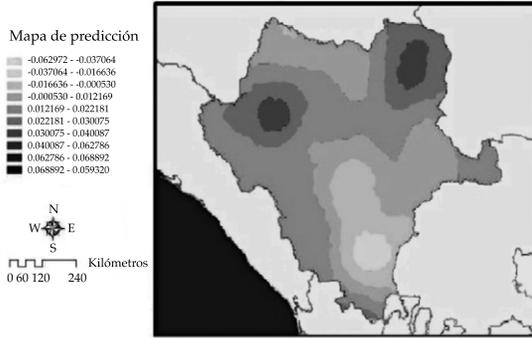


Figura 11. Mapas de tendencia de la pendiente de regresión asociada con el parámetro de escala y de forma de la DVEG para la variable $T_{mín}$. Se usaron valores máximos de los datos de *Maya v1.0*.

Análisis de tendencia de la pendiente de regresión, asociada al parámetro de escala de la DGEV, $T_{mín}$, utilizando percentil 10, en bloques anuales



Análisis de tendencia de la pendiente de regresión, asociada al parámetro de forma de la DGEV, $T_{mín}$, utilizando percentil 10 en bloques anuales

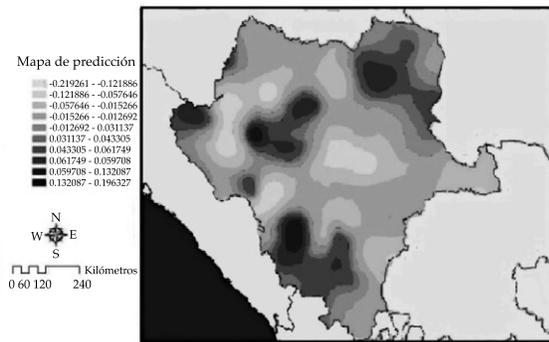
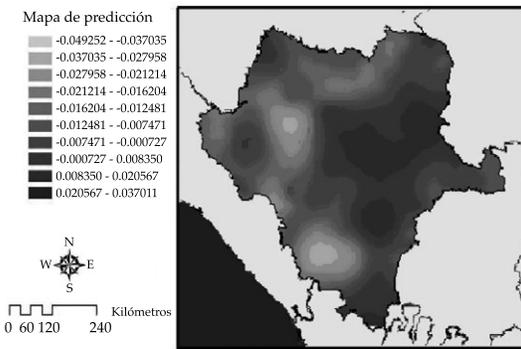


Figura 12. Mapas de tendencia de la pendiente de regresión asociada con el parámetro de escala y de forma de la DVEG para la variable $T_{mín}$. Se usaron valores percentil 10 de los datos de *Maya v1.0*.

Análisis de tendencia de la pendiente de regresión, asociada al parámetro de escala de la DGEV, precipitación, utilizando valores máximos en bloques anuales



Análisis de tendencia de la pendiente de regresión, asociada al parámetro de forma de la DGEV, precipitación, utilizando valores máximos en bloques anuales

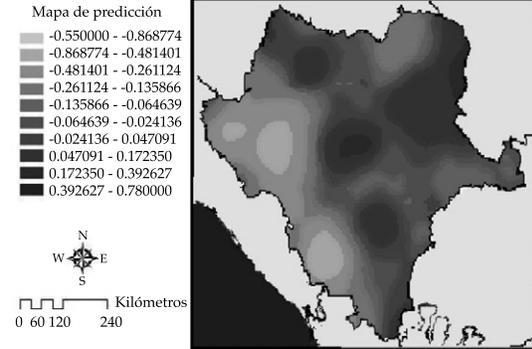
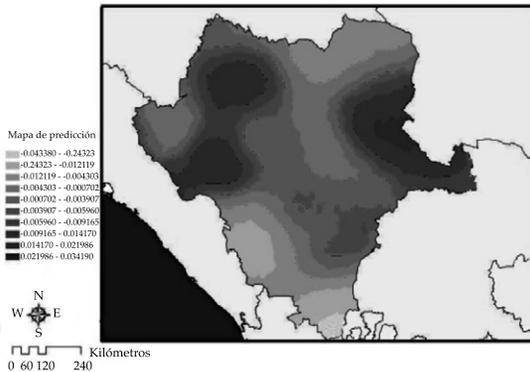


Figura 13. Mapas de tendencia de la pendiente de regresión asociada con el parámetro de escala y de forma de la DVEG para la variable precipitación máxima anual.

Análisis de tendencia de la pendiente de regresión, asociada al parámetro de escala de la DGEV, precipitación, valores percentil 90, en bloques anuales



Análisis de tendencia de la pendiente de regresión, asociada al parámetro de forma de la DGEV, precipitación, valores percentil 90, en bloques anuales

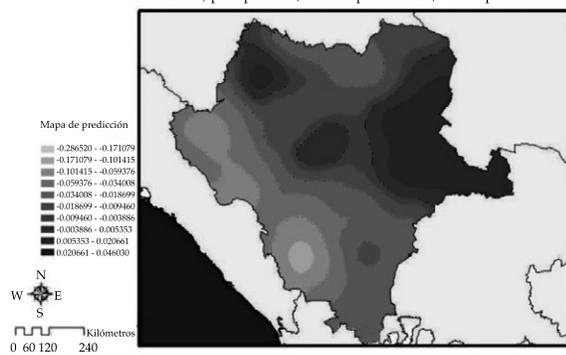


Figura 14. Mapas de tendencia de la pendiente de regresión asociada con el parámetro de escala y de forma de la DVEG para la variable precipitación. Se usaron valores del percentil 90 de los datos de *Maya v1.0*.

Conclusiones

Se muestra y prueba una metodología para investigar el comportamiento espacio-tiempo de valores extremos en series meteorológicas. Las tendencias obtenidas para el estado de Durango en las variables estudiadas sirven para monitorear los posibles cambios en variables climáticas y anticipar escenarios ante un eventual cambio climático.

Agradecimientos

A la línea de investigación 15: Estadística, modelado y tecnologías de información aplicadas a la agricultura y al medio rural del Colegio de Postgraduados.

Referencias

- Allan, R. P. (2011). Climate Change: Human Influence on Rainfall. *Nature*, 470, 344-345.
- Allan, R. P., & Soden, B. J. (2008). Atmospheric Warming and the Amplification of Precipitation Extremes. *Science*, 321, 1481-1484.
- Coles, S. (2001). *An introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. London: Springer.
- Cooley, D. (2009). Extreme Value Analysis and the Study of Climate Change. *Climatic Change*, 97(1), 77-83.
- Drignei, D. (2009). A Kriging Approach to the Analysis of Climate Model Experiments. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*, 14, 99-114.
- She, D., Xia, J., Song, J., Du, H., Chen, J., & Wan, L. (2013). Spatio-temporal Variation and Statistical Characteristics of Extreme Dry Spell in Yellow River Basin, China. *Theoretical and Applied Climatology*, 112(1-2), 201-2013.
- Katz, R. W., & Brown, B. G. (1992). Extreme Events in a Changing Climate: Variability is More Important than Averages. *Climatic Change*, 21, 289-302.
- Katz, R. W., Parlange, M. B., & Naveau, P. (2002). Statistics of Extremes in Hydrology. *Advances in Water Resources*, 25, 1287-1304.
- Min, S. K., Zhang, X., Zwiers, F. W., & Hegerl, G. C. (2011). Human Contribution to More-Intense Precipitation Extremes. *Nature*, 470, 378-381.
- Rahmstorf, S., & Coumou, D. (2011). Increase of Extreme Events in a Warming World. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108, 17905-17909.
- Reiss, R. D., & Thomas, M. (1997). *Statistical Analysis of Extreme Values*. Birkhäuser Verlag.
- Team, D. C. (2008). *R: A language and environment for statistical computing*. Recuperado de <http://www.R-project.org>.
- Yee, T., & Stephenson, A. (2007). Vector Generalized Linear and Additive Extreme Value Models. *Extremes*, 10, 1-19.
- Yee, T. W. (2008). The VGAM Package. *R News*, 8, 28-39.

Dirección institucional de los autores

M.C. Ma. Esperanza Blanco Ramírez

Colegio de Postgraduados
Posgrado en Socioeconomía, Estadística e Informática
Campus Montecillo
Km 36.5 carretera federal México-Texcoco
56230 Montecillo, Texcoco, Estado de México, MÉXICO
Teléfono: +52 (55) 5804 5900
blanco.maria@colpos.mx

Dr. Humberto Vaquera H.

Colegio de Postgraduados
Posgrado en Socioeconomía, Estadística e Informática
Campus Montecillo
Km 36.5 carretera federal México-Texcoco
56230 Montecillo, Texcoco, Estado de México, MÉXICO
Teléfono: +52 (595) 9520 200, extensiones 1459 y 1409
hvaquera@colpos.mx

Dr. José A. Villaseñor Alva

Colegio de Postgraduados
Posgrado en Socioeconomía, Estadística e Informática
Campus Montecillo
Km 36.5 carretera federal México-Texcoco
56230 Montecillo, Texcoco, Estado de México, MÉXICO
Teléfono: +52 (55) 5804 5900, extensión 1419
jvillasr@colpos.mx

Dr. J. René Valdez Lazalde

Colegio de Postgraduados
Posgrado Forestal, Campus Montecillo
Km 36.5 carretera federal México-Texcoco
56230 Montecillo, Texcoco, Estado de México, MÉXICO
Teléfono: +52 (595) 9520 265, extensión 1482
valdez@colpos.mx

Dr. Michel Rosengaus M.

Consultor privado en Hidrometeorología
Avenida Observatorio 192, Colonia Observatorio
Delegación Miguel Hidalgo
11860 México, D.F., MÉXICO
Teléfono: +52 (55) 2636 4600
mickros@prodigy.net.mx