

PROYECCIONES CLIMÁTICAS PARA EL ESTADO DE COAHUILA USANDO EL MODELO PRECIS BAJO DOS ESCENARIOS DE EMISIONES

CLIMATE PREDICTIONS FOR THE STATE OF COAHUILA USING THE PRECIS MODEL UNDER TWO EMISSIONS SCENARIOS

J. María **Mendoza-Hernández**¹, Alejandro **Zermeño-González**^{1*}, J. Manuel **Covarrubias-Ramírez**², J. Jesús **Cortés-Bracho**¹

¹Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro 1923, Colonia Buenavista, 25310. Saltillo, Coahuila, México. (azermenog@hotmail.com). ²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Vito Alessio Robles 2565, Colonia Nazario Ortiz Garza, 25100. Saltillo, Coahuila, México.

RESUMEN

El clima es un factor limitante en la producción agrícola y ante un apremiante cambio climático, se realizó este estudio con fines de diagnóstico para determinar los cambios climáticos futuros y sus efectos en la agricultura del estado de Coahuila, México. Bajo este contexto se analizó el clima con datos de 40 estaciones meteorológicas situadas en las diferentes regiones de Coahuila, usando los datos de precipitación y temperatura medidos durante el período 1961-1990. Este análisis consistió en clasificar el clima por el método de Köppen, modificado por Enriqueta García. El modelo numérico PRECIS (modelo escalado del Centro Hadley de Inglaterra) se aplicó para obtener las proyecciones de temperatura y precipitación de 2020, 2050 y 2080 y con ellas se reclasificó el clima para detectar diferencias en las fórmulas climáticas. De los escenarios climáticos establecidos por el IPCC, se seleccionó el A2 (condición regional sin restricciones) y el B1 (condiciones globales con ciertas medidas restrictivas y de control) como reguladores de las proyecciones climáticas para 2020, 2050 y 2080. El análisis de los resultados mostró que según el escenario A2 se pronostican aumentos promedio de hasta 4.4 °C para 2080, siendo más altas las temperaturas mínimas y máximas, para cada estación. Para precipitación se pronostican tres escenarios: en algunos municipios la precipitación será menor con respecto al promedio anual; en otros se mantiene muy cercana al promedio actual, y para los municipios del norte del estado aumentos promedio de 12, 20 y hasta 45 %. Eventos extremos, como sequías e inundaciones aumentarán y se intensificarán. Aunque se establecieran medidas de control (escenario B1), para el 2080 la temperatura aumentaría en promedio 2.7 °C. Las proyecciones de cambios de temperatura

ABSTRACT

Climate is a limiting factor in agricultural production, and in the face of imminent climate change, this study was conducted for diagnostic purposes to determine future climate changes and their effects on agriculture in the state of Coahuila México. In this context, current climate was analyzed using data from 40 weather stations located in different regions of Coahuila: precipitation and temperature data measured during the reference period 1961-1990. This analysis consisted in classifying climate by the Köppen method, modified by Enriqueta García. The numerical model PRECIS (a scaled model from the Hadley Center, England) was used to obtain the projections of temperature and precipitation for 2020, 2050 and 2080, and with these projections, climate was reclassified to detect differences in the climate formulas. From the climatic scenarios established by IPCC, A2 (regional condition without restrictions) and B1 (global conditions with certain restrictive and control measures) were chosen as regulators of the climate projections for 2020, 2050 and 2080. The analysis of the results showed that, according to scenario A2, increases in average temperatures of up to 4.4 °C with higher maximum and minimum temperature are predicted for each season in 2080. For precipitation, three scenarios were predicted: in some municipalities precipitation will be lower than the yearly average, while in others it will remain close to the current average; municipalities in the northern part of the state will experience average increases of 12, 20 and up to 45 %. Extreme events, such as drought and floods, will increase and be more intense. Although control measures were established (scenario B1), for 2080, temperature would increase 2.7 °C on average. The projections of changes in temperature and rainfall distribution will affect agricultural activities in Coahuila.

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: agosto, 2012. Aprobado: mayo, 2013.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 47: 523-537. 2013.

Key words: climate, climatic formula, temperature, precipitation.

y la distribución de la precipitación afectarán las actividades agrícolas en Coahuila.

Palabras clave: clima, fórmula climática, temperatura, precipitación.

INTRODUCCIÓN

Las actividades humanas requieren cantidades cada vez mayores de combustibles fósiles que degradan los ecosistemas y afectan el clima significativamente (Arrhenius, 1896; Fourier, 1824). La contaminación atmosférica por aerosoles, polvo y gases contaminantes causan calentamiento en el planeta, al modificar el balance energético controlado por el efecto invernadero de la atmósfera (Hansen y Laces, 1990). Este calentamiento ha causado un cambio climático cuyas consecuencias son evidentes: derretimiento del hielo de los polos (Wang y Overland, 2009), desprendimiento de icebergs, derretimiento de glaciares, aumento del nivel del mar (Pfeffer *et al.*, 2008); más inundaciones, más olas de calor intensas y de gran duración y sequías más prolongadas que resultan en pérdidas de vidas y económicas (IPCC, 2007). La variabilidad climática se reforzará con el calentamiento global con mayor probabilidad de intensificar fenómenos como huracanes o tornados (Mousavi *et al.*, 2011).

Uno de los efectos del calentamiento global es el ascenso del nivel del mar (Pfeffer *et al.*, 2008; IPCC, 2007), y las costas mexicanas son vulnerables, con el riesgo de que el mar invada grandes territorios afectando principalmente las costas del Golfo de México, donde el estado de Tabasco será el más afectado (Vázquez-Botello, 2008). Las ondas de calor afectarán principalmente a las ciudades que serán cada vez más pobladas (Jauregui-Ostos, 1995) y con asentamientos humanos irregulares donde muchos no tendrán los servicios fundamentales para una vida digna (Jauregui y Tejeda, 2001).

El estado de Coahuila, cuyos climas son principalmente áridos (García, 1981), podría sufrir efectos del cambio climático más acentuados en el grado de aridez. La relación lluvia temperatura cambiaría dado que el calentamiento global por incremento del bióxido de carbono implica aumento en las temperaturas y alteración en el ciclo hidrológico (Manabe *et al.*, 1981). Con relación a los cultivos en el estado, el cambio climático puede ocasionar serios problemas,

INTRODUCTION

Human activities require increasing quantities of fossil fuels, which degrade ecosystems and significantly affect the global climate. (Arrhenius, 1896; Fourier 1824). Atmospheric pollution by aerosols, dust and gases cause global warming by modifying the energy balance controlled by the greenhouse effect of the atmosphere (Hansen and Laces, 1990). This warming has caused climate change whose consequences are evident: polar ice melting (Wang and Overland, 2009), breaking up of icebergs, glacier melting, rising sea level (Pfeffer *et al.*, 2008); more floods, more and longer lasting intense heat waves and longer droughts will result in economic losses as well as loss of lives (IPCC, 2007). Climate variability will become more acute with global warming, bringing higher probabilities of intensified phenomena such as hurricanes and tornadoes (Mousavi *et al.*, 2011).

One of the effects of global warming is the rising sea level (Pfeffer *et al.*, 2008; IPCC, 2007), and Mexican coasts are highly vulnerable, endangered by the sea invading large tracts of territory, mainly affecting the Gulf of México coasts where the state of Tabasco will be the most affected state (Vázquez-Botello, 2008). Heat waves will mainly affect the cities, which will be increasingly populated (Jauregui-Ostos, 1995) by unplanned human settlements which will lack the services basic to a dignified life (Jauregui and Tejeda, 2001).

The state of Coahuila, whose climates are mainly arid (García, 1981), could suffer more acute climate change effects in terms of the degree of aridity. The relationship rain-temperature would change given global warming due to increases in carbon dioxide, implicating an increase in temperatures and alteration of the hydrological cycle (Manabe *et al.*, 1981). Regarding agricultural activities in the state, climate change may cause serious problems; an increase in temperature and a decrease in precipitation would cause problems of adaptation for rainfed crops, while for irrigated crops greater volumes of water will be needed. An increase in winter temperatures would affect productivity of deciduous fruit trees of the state because there would be a decline in the accumulation of cold units. Therefore, the objective of this study was to evaluate the effect of global warming on climate change in the state of Coahuila

ya que el aumento de la temperatura y la reducción de la precipitación causarían problemas de adaptación para los cultivos de temporal, y para los cultivos de riego los volúmenes de agua serán mayores. Un aumento de la temperatura en el invierno afectaría la productividad de los frutales caducifolios del estado porque se reduciría la acumulación de unidades frío. Por tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del calentamiento global en los cambios del clima en el estado de Coahuila, bajo dos escenarios de emisiones y su relación con las actividades agrícolas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para analizar las condiciones actuales del clima y las proyecciones futuras, se obtuvieron datos del Servicio Meteorológico Nacional de 40 estaciones meteorológicas ubicadas en regiones del estado de Coahuila, seleccionadas por su consistencia en los datos para el período 1961-1990, marcado por la Organización Meteorológica Mundial (IPCC, 1992). Además, es el período contra el cual se dan las salidas del modelo PRECIS. Para facilitar el análisis, las estaciones se agruparon por regiones geográficas: Sureste, con ocho estaciones en los municipios de Saltillo y Ramos Arizpe; Arteaga, con seis estaciones, todas en este municipio; Sur, cuatro estaciones en los municipios de Parras y Viesca; Laguna, seis estaciones en los municipios de Torreón, Matamoros y San Pedro; Desierto, cinco estaciones en los municipios de Ocampo, Sierra Mojada y Cuatro Ciénegas; Centro, siete estaciones en los municipios de Monclova, Sabinas, San Juan de Sabinas, Múzquiz, Juárez y Progreso; Norte, cuatro estaciones en los municipios de Allende, Zaragoza, Juárez y Palestina. Las estaciones con los datos más completos y consistentes fueron seleccionadas. Los datos faltantes se obtuvieron por interpolación cuando sólo había un dato faltante en un determinado día; los registros con más de un día consecutivo de datos faltantes se obtuvieron con ecuaciones de regresión con estaciones vecinas de datos completos y con métodos de generación sintética (Moreno-Cadavid y Salazar, 2009).

De los modelos de circulación general se seleccionó el modelo regional de alta resolución PRECIS (Jones *et al.*, 2004). Este modelo es una versión hidrostática de las ecuaciones primitivas (de continuidad, de energía térmica y de conservación de momento). Éste es un modelo dinámico, anidado al modelo HadCM3 (Jones *et al.*, 2004), con algunas modificaciones como el ciclo del azufre, y algunas parametrizaciones como las nubes, la convección y la radiación solar. Trabaja con una malla horizontal de $0.44^\circ \times 0.44^\circ$ (latitud $\times$ longitud), que da una resolución de 50×50 km y una escala vertical híbrida con 19 niveles que van

under two emissions scenarios and their relationship with farming activities.

MATERIALS AND METHODS

To analyze current climate conditions and future projections, data from 40 weather stations of the National Meteorological Service located in regions of the state of Coahuila and selected for the consistency of their data for the period 1961-1990, as indicated by the World Meteorological Organization (IPCC, 1992). Moreover, it is the period against which the output of the PRECIS model is given. To facilitate the analysis, the stations were grouped into geographical regions: Southeast, with eight stations in the municipalities of Saltillo and Ramos Arizpe; Arteaga, with six stations, all in the municipality of the same name; South, four stations in the municipalities of Parras and Viesca; Laguna, six stations in the municipalities of Torreón, Matamoros and San Pedro; Desert, five stations in the municipalities of Ocampo, Sierra Mojada and Cuatro Ciénegas; Center, seven stations in the municipalities of Monclova, Sabinas, San Juan de Sabinas, Múzquiz, Juárez and Progreso; North, with four stations in the municipalities of Allende, Zaragoza, Juárez and Palestina. The stations with the most complete and consistent data were selected. The missing data were obtained by interpolation when there was only one datum missing on a given day. The time series with missing data on two or more consecutive days were completed with regression equations with neighboring stations that had complete data and with synthetic generation methods (Moreno-Cadavid and Salazar, 2009).

From the general circulation models, the high resolution PRECIS regional model was selected (Jones *et al.*, 2004). This model is a hydrostatic version of the primitive equations (continuity, thermal energy and momentum conservation). It is a dynamic model nested in the HadCM3 model (Jones *et al.*, 2004) with modifications, such as the sulfur cycle and some parameterizations such as clouds, convection and solar radiation. It functions with a horizontal mesh of $0.44^\circ \times 0.44^\circ$ (latitude $\times$ longitude) that gives a resolution of 50×50 km and a vertical hybrid scale with 19 levels that range from an elevation of 50 m above sea level to an altitude corresponding to a barometric pressure of 0.05 kPa at σ coordinates (pressure at the considered elevation/pressure of surface corrected to sea level).

This model is available for developing countries and México will obtain it through the University of Guadalajara (<http://www.iam.udg.mx/meteorologia-y-climatologia/consulta-del-modelo-precis>). In this study, the outputs used were those provided by Cuba through the web page of the Institute of Meteorology, in which ranges of latitude and longitude of the site are entered as well as the target parameter (temperature, precipitation),

desde una elevación de 50 msnm hasta una altura correspondiente a una presión barométrica de 0.05 kPa en coordenadas σ (presión a la elevación considerada/presión de superficie corregida a nivel del mar).

Este modelo está disponible para los países en desarrollo y México lo obtendrá a través de la Universidad de Guadalajara (<http://www.iam.udg.mx/meteorologia-y-climatologia/consulta-del-modelo-precis>). En este caso se usaron las salidas que Cuba proporciona a través de la página del Instituto de Meteorología, en la que se introducen los rangos de latitud y longitud del lugar, así como el parámetro a tratar (temperatura, precipitación), el mes y el año, además de la altura de la atmósfera y el escenario considerado. El resultado es una gráfica donde con los valores puntuales de latitud y longitud se obtiene el valor deseado de temperatura o lluvia.

Para obtener las proyecciones se usaron los escenarios, A2 y B1. Un escenario es una representación coherente, internamente consistente y plausible de un posible estado futuro del mundo (IPCC, 2000); se elabora considerando factores como incertidumbre en las emisiones de gases de invernadero, variabilidad natural del clima, factores poblacionales y naturales, y fluctuaciones inherentes en la elaboración de los modelos numéricos de proyección (IPCC, 2000). De las cuatro líneas evolutivas del IPCC se escogieron los escenarios A2 y B1 por dos razones: 1) marcan las salidas del modelo PRECIS y 2) son los extremos ya que A2 describe un escenario muy heterogéneo donde se conservan las identidades locales con una población mundial en continuo crecimiento, con un desarrollo económico orientado básicamente a las regiones, y con un cambio tecnológico lento y fragmentado, y B1 describe una condición convergente con una misma población mundial que alcanza un máximo hacia mediados del siglo XXI, y después desciende con rápidos cambios de las estructuras económicas orientados a una economía de servicios y de información, con un uso menos intensivo de los insumos de consumo y la introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento eficaz de los recursos naturales, dando preferencia a las soluciones mundiales encaminadas a la sostenibilidad económica, social y ambiental, y una mayor igualdad, pero en ausencia de iniciativas adicionales en relación con el clima.

Para analizar los datos se calcularon las normales climatológicas de lluvia y temperatura, para cada una de las 40 estaciones, para el período de referencia con los datos descritos. Después, basado en estas normales, se clasificó el clima de cada estación para el período de referencia 1961-1990, usando el método de Koeppen modificado por García (1981), obteniendo las fórmulas climáticas de cada una de las 40 estaciones. Luego, se obtuvieron las proyecciones de temperatura y precipitación cada mes para los años de referencia 2020, 2050 y 2080 de acuerdo con los escenarios mencionados, de la página del Instituto de Meteorología

month and year, and height of the atmosphere and the scenario considered. The result is a graph in which, with the precise values of latitude and longitude, the desired value of temperature or rainfall is obtained.

To obtain the projections, scenarios A2 and B1 were used. A scenario is a coherent, internally consistent and plausible representation of a possible future state of the world (IPCC, 2000). It is constructed considering factors, such as uncertainty in greenhouse gas emissions, natural climate variability, population and natural factors, and fluctuations inherent in the construction of numerical projection models (IPCC, 2000). From the four evolutionary lines of IPCC, scenarios A2 and B1 were chosen for two reasons: 1) they mark the output of the PRECIS model and 2) they are the extreme scenarios since A2 describes a very heterogeneous scenario where local identities are conserved with a continuously growing world population, economic development basically regionally oriented with slow fragmented technological change, and B1 describes a converging condition with a world population that reaches its maximum around the middle of the twenty-first century and later descends with rapid changes in economic structures oriented toward a service and information economy, with less intensive use of consumer goods and by introduction of clean technology and efficient use of natural resources, giving preference to world solutions aiming for economic, social and environmental sustainability, as well as greater equality, but in absence of additional initiatives related to climate.

To analyze the data, normal climatological values for rainfall and temperature were calculated for each of the 40 stations and for the reference period from the described data. Then, based on these normal figures, the climate of each station was classified for the reference period 1961-1990, using the Koeppen method modified by García (1981). In this way the climatic formulas were obtained from each of the 40 stations. The projections for monthly temperature and precipitation were then obtained for the reference years 2020, 2050 and 2080, according to the scenarios mentioned, from the web page of the Institute of Meteorology of Cuba, as indicated previously. The value of temperature or precipitation for the reference years was obtained by adding to or subtracting from the average value of the reference period, the value of the corresponding projection. Finally, the climates were again classified, following the Koeppen method modified by García (1981) for México, for each of the 40 stations for 2020, 2050 and 2080, and the formulas obtained were compared with those of the reference period with the purpose of analyzing changes in the climate classification formulas.

RESULTS AND DISCUSSION

Climate change will have marked effects on the temperature in the municipalities of the state of

de Cuba como se indicó previamente. El valor de la temperatura o precipitación para los años de referencia, se obtuvo sumando o restando al valor promedio del período de referencia, el valor de la proyección correspondiente. Finalmente, se clasificaron nuevamente los climas de acuerdo con el método de Koeppen modificado por García (1981) para México para cada una de las estaciones, para 2020, 2050 y 2080, y se compararon las fórmulas obtenidas con las del período de referencia con el fin de analizar los cambios en las fórmulas de clasificación climática.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El cambio climático tendrá efectos marcados en la temperatura de los municipios del estado de Coahuila (Figuras 1 y 2). En el período de referencia (1961-1990), sólo 0.346 % de la superficie del estado tenía una temperatura promedio anual igual o mayor que 24-26 °C (área café, Figuras 1A y 2A). Pero para el año de proyección 2080, dicha temperatura se extenderá a 14.19 % de la superficie total, considerando el escenario B1 (área café, Figura 2d), y a 52.16 % considerando el escenario A2 (área café, Figura 1D), abarcando la región Sur, Centro y Norte del estado.

En el mismo período de referencia, 71.69 % del área total tenía una temperatura promedio anual igual o menor que 20-22 °C (área amarilla, Figura 1Ay A). Para el año de proyección 2080 dicha superficie decrecerá a 7.32 % del área total de acuerdo con el escenario B1 (área amarilla, Figura 2D) y al 6.31 % con base al escenario A2 (área amarilla, Figura 1D), debido a que el resto de la superficie tendrá temperaturas mayores (Figuras 1D y 2D).

Palma (2007) usó el modelo PRECIS para estimar el efecto de calentamiento global en la temperatura del estado de Veracruz, y muestra un aumento de hasta 5.9 °C para el año de proyección 2080; considerando el escenario A2, para el mismo escenario y año de proyección reportó una reducción de la precipitación en todo el estado. Urrutia y Vuille (2009), al usar el modelo PRECIS y los dos escenarios de emisiones (A2, B1), observaron un aumento de 2 a 7 °C en la temperatura de la Región de los Andes Tropicales para finales del siglo XXI, mientras que las proyecciones de precipitación muestran regiones con aumentos y otras con reducciones.

Para todo el estado de Coahuila y ambos escenarios (A2 y B1), julio y agosto serán los meses con el aumento mayor de temperatura, mientras que marzo y abril tendrán el menor cambio en temperatura promedio

Coahuila (Figure 1 and 2). In the reference period (1961-1990, only 0.346 % of the total area of the state had an average annual temperature equal to or greater than 24-26 °C (brown areas, Figures 1A and 2A). But for the projection year 2080, this temperature will extend to 14.19 % of the total area, considering scenario B1 (brown area, Figure 2D), and to 52.16 %, considering scenario A2 (brown area, Figure 1D), covering the South, Central and North regions of the state.

In the same period of reference, 71.69 % of the total area had an average annual temperature equal to or lower than 20-22 °C (yellow area, Figure 1A and 2A). By the projection year 2080, this area will decrease to 7.32 % of the total area according to scenario B1 (yellow area, Figure 2D) and to 6.31 % based on scenario A2 (yellow area, Figure 1D), while the rest of the area will have higher temperatures (Figures 1D and 2D).

Palma (2007) used the PRECIS model to estimate the effect of global warming on temperature in the state of Veracruz, and showed an increase of up to 5.9 °C for the projection year 2080; considering scenario A2 for the same scenario and projection year, he reported a decrease in precipitation in the entire state. Urrutia and Vuille (2009), using the PRECIS model and the two emissions scenarios (A2, B1), estimated a temperature increase of 2 to 7 °C in the Tropical Andes Region for the end of the twenty-first century, while the projections for precipitation showed regions with increases and other with decreases.

For the entire state of Coahuila and both scenarios (A2 and B1), July and August will be the months of the greatest temperature increase, while March and April will have the least change in average monthly temperature (Tables 1 and 2), being the first months of spring when Earth just begins to heat and more abundant rains do not occur. This is part of the climate variability accentuated by global warming (Garduño, 2003). The temperature increase in the entire state could cause higher incidence of pests and diseases (Gregory *et al.*, 2009; Roos *et al.*, 2011), affecting the most important crops such as alfalfa, cotton, maize, wheat and pecan.

For the two scenarios and the three projection years (2020, 2050 and 2080), an increase in average temperature is observed in the winter months

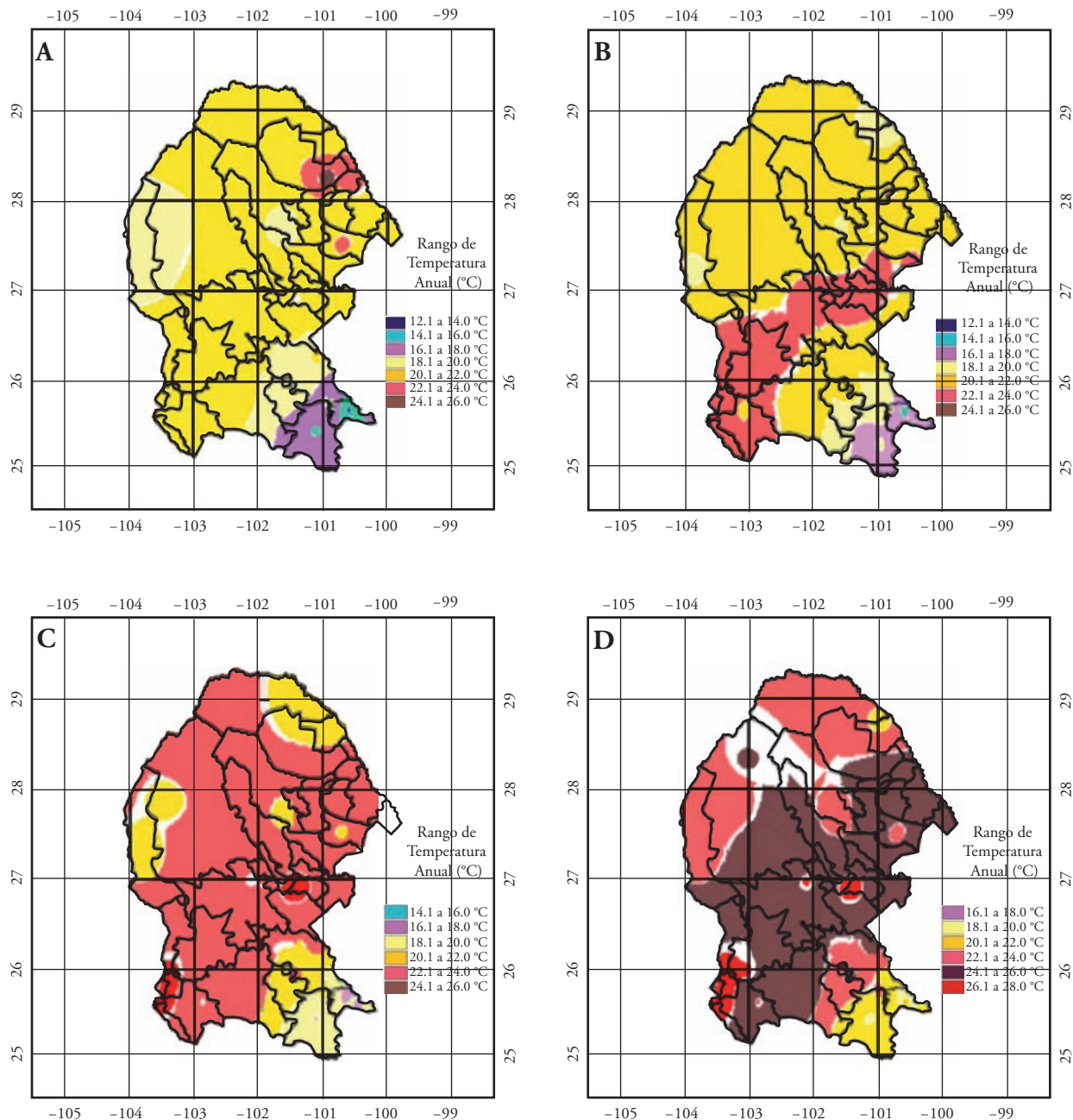


Figura 1. Valores de temperatura para el periodo de referencia 1961-1990 (A), y de las proyecciones para el año 2020 (B), 2050 (C), y 2080 (D), de acuerdo con el escenario A2.

Figure 1. Temperature values for the reference period 1961-1990 (A), and of the projections for the year 2020 (B), 2050 (C), and 2080 (D), according to scenario A2.

mensual (Cuadros 1 y 2), siendo éstos los primeros meses de la primavera cuando la Tierra apenas se calienta y las lluvias más abundantes no ocurren. Esto es parte de la variabilidad climática acentuada por el calentamiento global (Garduño, 2003). El aumento

(December, January and February) (Tables 1 and 2). This increase will have a negative effect on the accumulation of cold units, affecting vegetative and floral bud break on deciduous fruit trees established in the state of Coahuila.

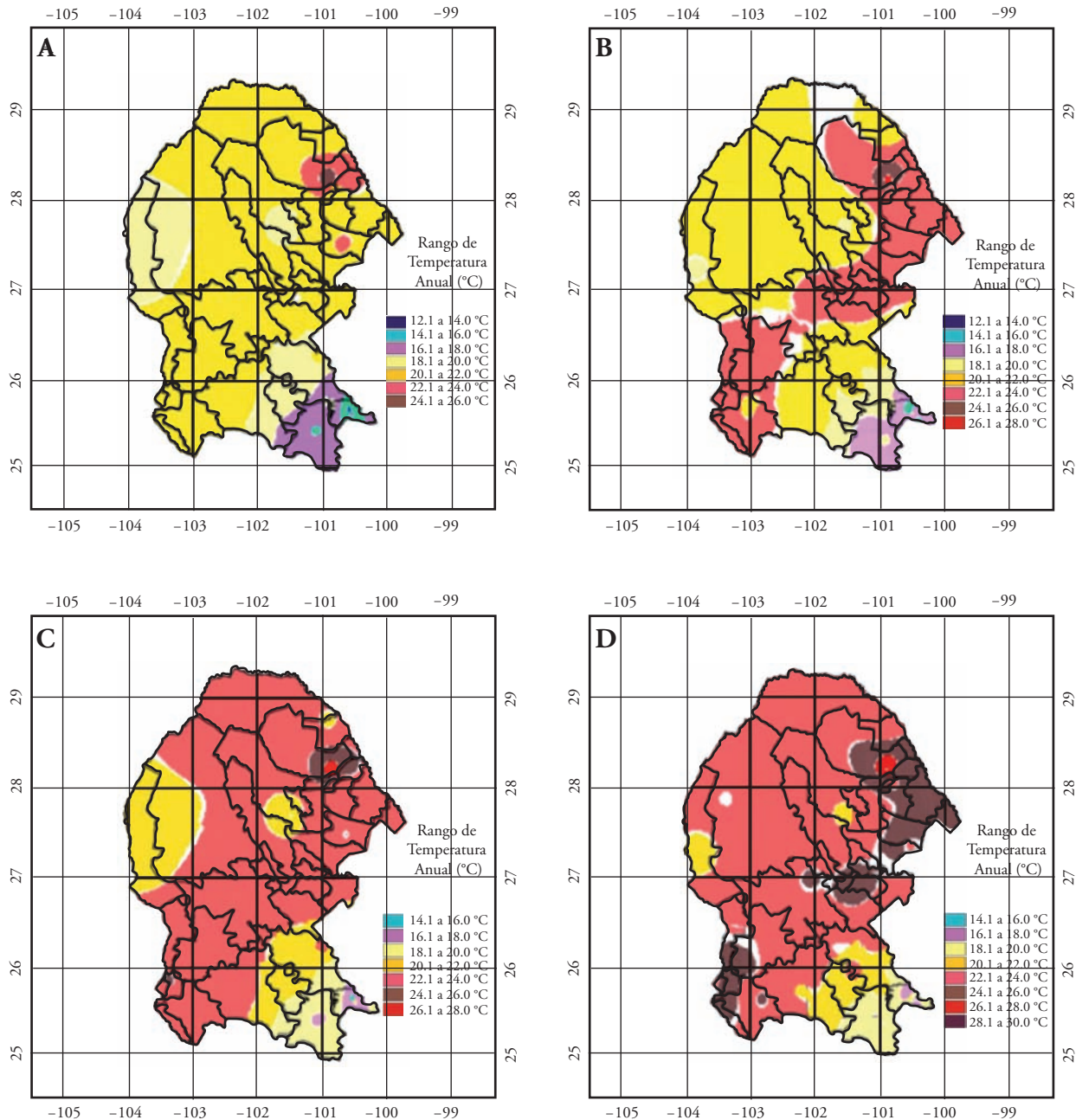


Figura 2. Valores de temperatura para el periodo de referencia 1961-1990 (A), y de las proyecciones para el año 2020 (B), 2050 (C), y 2080 (D), de acuerdo con el escenario B1.

Figure 2. Temperature values for the reference period 1961-1990 (A), and of the projections for the year 2020 (B), 2050 (C), and 2080 (D), according to scenario B1.

de la temperatura en todo el estado podría ocasionar una incidencia mayor de plagas y enfermedades (Geogory *et al.*, 2009; Roos *et al.*, 2011), afectando a los principales cultivos como alfalfa, algodón, maíz, trigo y nogal.

The increase in average annual temperature for the entire state of Coahuila, according to the most drastic scenario (A2) for the projection year 2080, will be 4.4 °C (Table 1) while for the least drastic scenario (B1), it will be 2.7 °C (Table 2).

Cuadro 1. Diferencia de temperatura (°C) promedio mensual y anual para los diferentes años de proyección respecto al periodo de referencia, de acuerdo con el escenario A2.**Table 1. Differences in average monthly and annual temperatures (°C) for the different projection years relative to the reference period, according to scenario A2.**

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedio
2020	1.1	0.8	0.2	0.0	1.2	1.1	2.3	2.3	0.6	1.0	1.5	1.7	1.2
2050	2.3	1.7	0.5	-0.1	2.6	2.4	5.0	4.7	1.2	2.2	3.1	3.5	2.4
2080	3.9	3.0	0.8	-0.2	4.9	4.4	9.3	8.9	2.2	4.0	5.8	6.4	4.4

Cuadro 2. Diferencia de temperatura (°C) promedio mensual y anual para los diferentes años de proyección, respecto al periodo de referencia de acuerdo con el escenario B1.**Table 2. Differences in average monthly and annual temperatures (°C) for the different projection years relative to the reference period, according to scenario B1.**

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedio
2020	1.0	0.7	0.2	-0.1	1.1	1.1	2.1	2.1	0.5	0.9	1.4	1.5	1.0
2050	1.7	1.3	0.4	-0.1	2.0	1.9	3.8	3.6	0.9	1.6	2.4	2.7	1.9
2080	2.4	1.9	0.5	-0.1	2.9	2.7	5.7	5.4	1.3	2.4	3.6	4.0	2.7

Para los dos escenarios y para los tres años de proyección (2020, 2050 y 2080) hay un aumento de la temperatura promedio en los meses de invierno (diciembre, enero y febrero) (Cuadros 1 y 2). Este incremento tendrá un efecto negativo en la acumulación de unidades frío que afectará la brotación de yemas vegetativas y florales de los árboles frutales caducifolios establecidos en Coahuila.

El aumento de la temperatura promedio anual para todo Coahuila de acuerdo al escenario más drástico (A2) para el año de proyección 2080 será 4.4 °C (Cuadro 1), mientras que para el escenario menos drástico (B1) será 2.7 °C (Cuadro 2). Este aumento de temperatura tendrá impacto considerable en la agricultura de riego y en la de temporal por un efecto directo en la tasa de evapotranspiración de los cultivos en el estado. Allen *et al.* (2003) reportaron que la tasa de evapotranspiración del cultivo de soya aumentó de 7.5 a 19.0 mol m⁻² s⁻¹ porque la temperatura del aire aumentó de 28 a 44 °C; además, la eficiencia del uso del agua del cultivo decreció linealmente con ese aumento. Según Liao y Wang (2002), el aumento de 4.8 °C de la temperatura del aire causa una tasa mayor de evapotranspiración del cultivo de trigo de primavera, cuando la humedad en el suelo es la de capacidad de campo. La tasa de evapotranspiración de referencia determinada con la ecuación

This increase in temperature will have considerable impact on irrigated and rainfed agriculture through a direct effect on the evapotranspiration rate of the state's crops. Allen *et al.* (2003) reported that the evapotranspiration rate of a soybean crop increased from 7.5 to 19.9 mol m⁻² s⁻¹ because air temperature rose from 28 to 44 °C; moreover, water use efficiency of the crop decreased linearly with this increase. According to Liao and Wang (2002), an increase of 4.8 °C in air temperature causes a higher rate of evapotranspiration in spring wheat when soil moisture is at field capacity. The reference rate of evapotranspiration determined with the Penman-Monteith equation increases up to 14.8% due to a 20 % increase (8 °C) in air temperature (Goyal, 2004).

Climate change will also have marked effects on rainfall distribution in Coahuila (Figures 3 and 4). In the reference period, average annual precipitation in the Lagunera Region (municipalities of Torreón, San Pedro and Matamoros) was 200-300 mm (Figures 3A and 4A). But for the projection year 2080, based on scenario A2, the precipitation range will decrease to 0-100 mm in that area, which is 8.7 % of the total state (Figure 3D).

In the reference period only 1.2 % of the total area of the state (located in Paila, municipality of Parras)

de Penman-Monteith aumenta hasta 14.8 % debido a un 20 % de aumento (8 °C) de la temperatura del aire (Goyal, 2004).

El cambio climático también tendrá efectos marcados en las proyecciones de la distribución de la precipitación en Coahuila (Figuras 3 y 4). En el periodo de referencia la precipitación promedio anual en la Región Lagunera (municipios de Torreón, San Pedro, Matamoros) era 200-300 mm (Figuras 3A y 4A). Pero para el año de proyección 2080, con base al escenario A2, la precipitación se reducirá a 0-100 mm en esa área que es 8.7 % del total del estado (Figura 3D).

En el periodo de referencia sólo 1.2 % de la superficie total del estado (ubicado en la localidad de Paila, municipio de Parras) (área amarilla, Figura 4A) tenía un rango de precipitación promedio anual de 100-200 mm. Para el año de proyección 2050, la superficie con este rango de precipitación aumentará a 13.98 % considerando el escenario B1 (área amarilla, Figura 4C) y a 19.68 % considerando el escenario A2 (área amarilla, Figura 3C).

El cambio climático también resultará en mayor precipitación en algunas regiones del estado. En el periodo de referencia, 10.32 % de la superficie total (básicamente en Arteaga y la región Norte) tenía una precipitación anual de 400-500 mm (área verde limón, Figura 3A). Para el año de proyección 2080, la superficie con esta precipitación aumentará a 16.81 % de la superficie total considerando el escenario B1 (área verde limón, Figura 4D) y a 23.1 % considerando el escenario A2 (área verde limón, Figura 3D). El aumento de esta superficie será principalmente en la región Norte.

Los meses de verano (mayo, junio, julio y agosto) tendrán la mayor reducción en la magnitud de la precipitación respecto al periodo de referencia (valores negativos mayores) para los dos escenarios analizados (Cuadros 3 y 4). Nuevamente, este pronóstico tendrá un fuerte impacto en la agricultura de riego y en la de temporal porque la agricultura predominante en el estado se realiza durante el verano, lo cual coincide con los meses en que lloverá menos y que además son los más calurosos del año. En septiembre y octubre, los meses de mayor intensidad con más huracanes, ocurrirá el incremento mayor de la precipitación (Cuadros 3 y 4) que estaría asociado con una mayor incidencia de inundaciones en las zonas de menor elevación.

(yellow area, Figure 4A) had a range of average annual precipitation of 100-200 mm. For the projection year 2050, the area with this range of precipitation will increase to 13.98 % considering scenario B1 (yellow area, Figure 4C) and to 19.68 % considering scenario A2 (yellow area, Figure 3C).

Climate change will also result in higher precipitation in some regions of the state. In the reference period, 10.32 % of the total area (basically in Arteaga and the North region) had a annual precipitation of 400-500 mm (lime green area, Figure 3A). For the projection year 2080, the area with this precipitation will increase to 16.81 % of the total area considering scenario B1 (lime green area, Figure 4D) and to 23.1 % considering scenario A2 (lime green area, Figure 3D). This increase will occur mainly in the North region.

The summer months (May, June, July and August) will have greater reduction in the magnitude of precipitation, relative to the reference period (larger negative values) for the two scenarios analyzed (Table 3 and 4). Again, this prediction will have a strong impact on irrigated and rainfed agriculture of the state of Coahuila, because this is carried out mostly in the summer, coinciding with the hottest months of the year in which it will rain the least. In September and October, the months with more hurricanes, the greatest increase in precipitation will occur (Tables 3 and 4); this will be associated with a greater incidence of floods in the lower regions.

Annual precipitation in the state for the two scenarios and the projection years (2020, 2050 and 2080) will basically be the same as that of the reference period (Tables 3 and 4) since the increase in precipitation in the months of higher rainfall is compensated by the reduction in precipitation during the months of greater deficit.

The changes in temperature and in spatial and temporal distribution of rainfall determine the changes in the climatic formulas; therefore, in all of the municipalities of Coahuila there will be modifications in these formulas. Tables 5 and 6 show the changes in the climate formulas relative to the reference period for the Arteaga and North regions because in these regions the largest changes were observed. For the year 2080 and for the two scenarios analyzed, the climate of the Arteaga region will change from temperate climate with long cool summers to warm climate (Table 5). Currently,

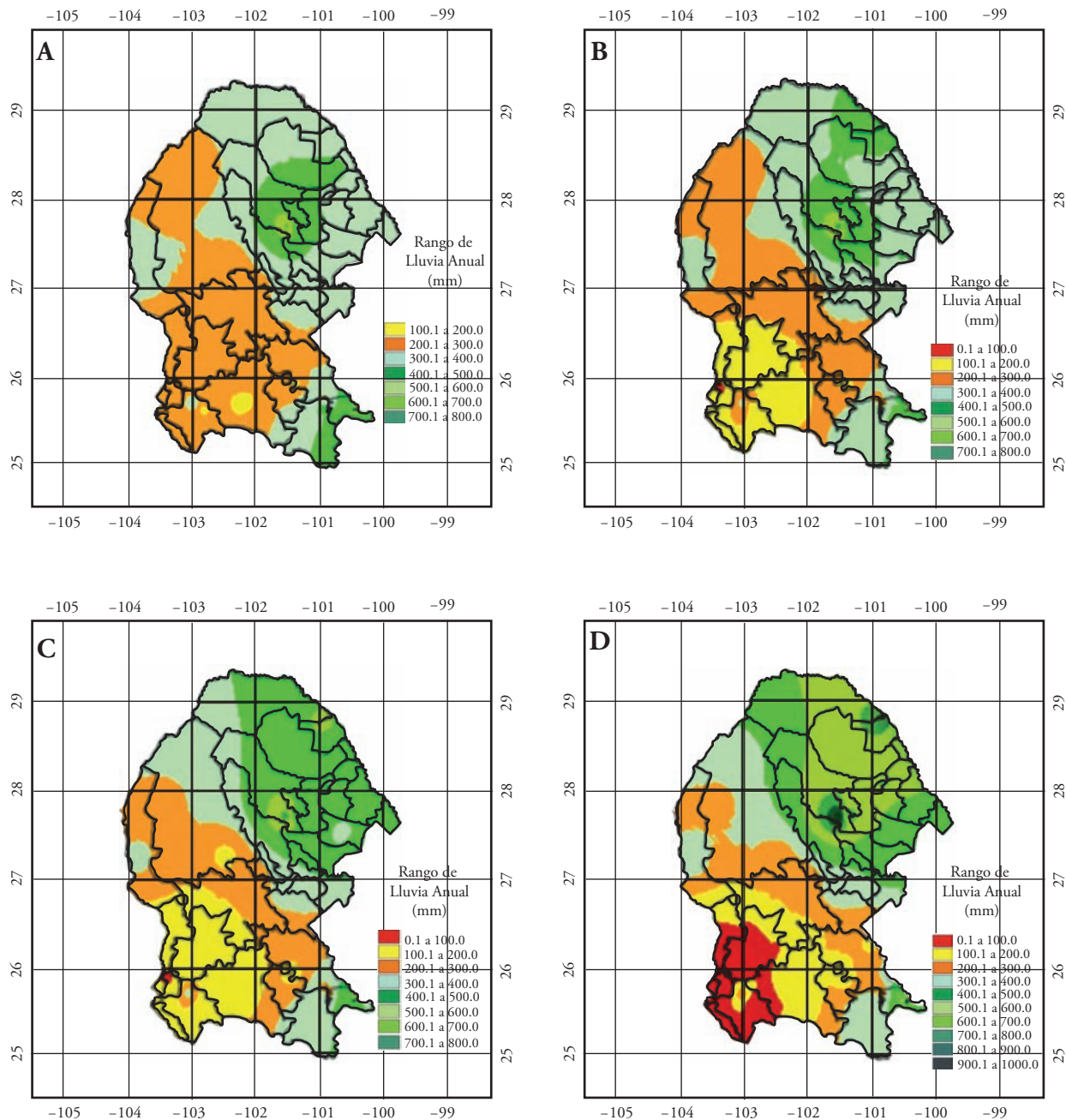


Figura 3. Valores de precipitación para el periodo de referencia 1961-1990 (A), y de las proyecciones para el año 2020 (B), año 2050 (C), y el año 2080 (D), de acuerdo al escenario A2.

Figure 3. Precipitation values for the reference period 1961-1990 (A), and of the projections for the years 2020 (B), 2050 (C), and 2080 (D), according to scenario A2.

La precipitación anual del estado para los dos escenarios y los años de proyección (2020, 2050 y 2080) será básicamente la misma que la del periodo de referencia (Cuadros 3 y 4), debido a que el incremento de la precipitación en los meses de mayor

Artega is the only subhumid region in the entire state, and by 2020, according to scenario A2, it will change to semiarid (Table 5). For the period studied, the condition of summer rains could change to autumn rains as of the year 2050, according to

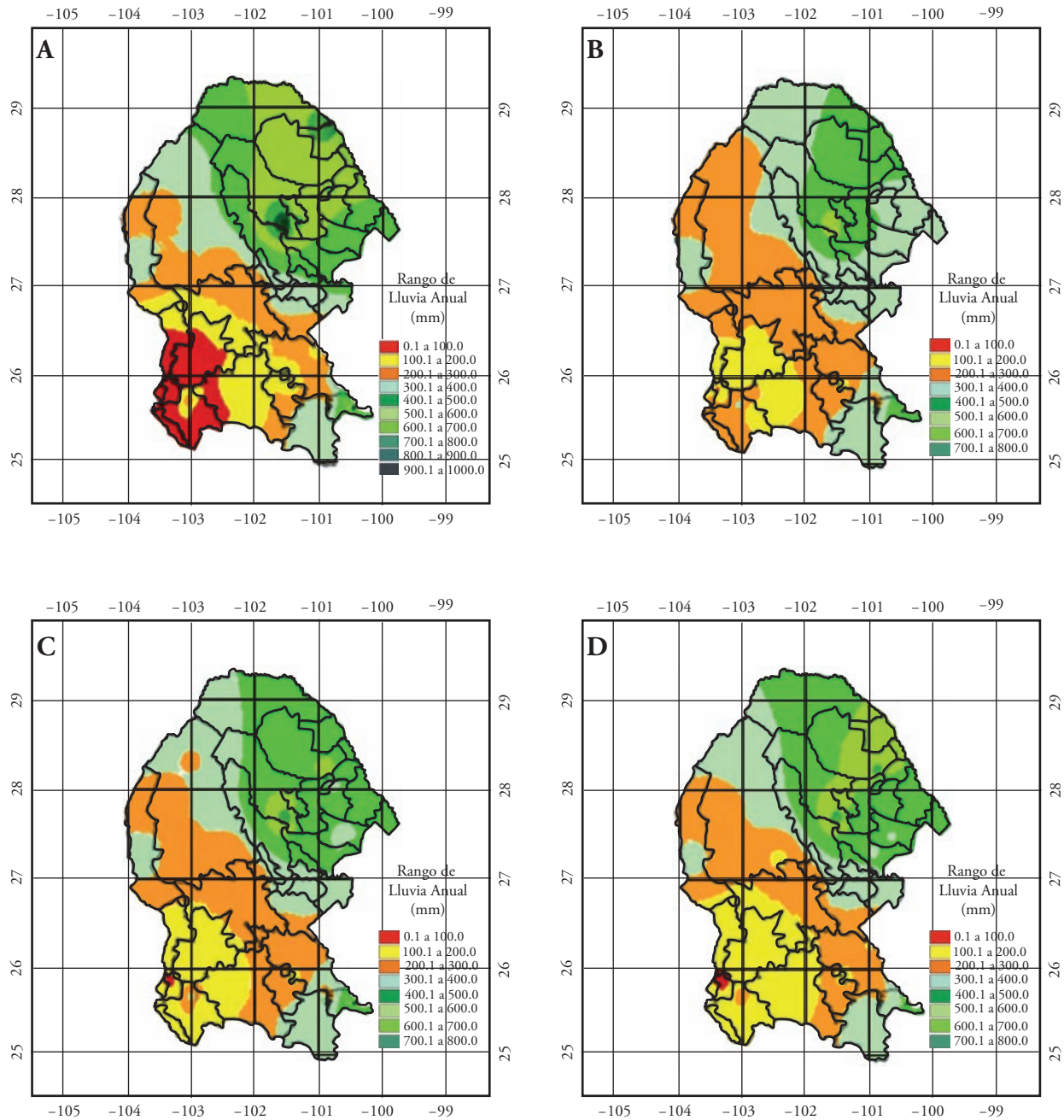


Figura 4. Valores de precipitación para el periodo de referencia 1961-1990 (A), y de las proyecciones para el año 2020 (B), 2050 (C), y 2080 (D), de acuerdo con el escenario B1.

Figure 4. Precipitation values for the reference period 1961-1990 (A), and of the projections for the years 2020 (B), 2050 (C), and 2080 (D), according to scenario B1.

lluvia se compensa con la reducción de la precipitación en los meses de mayor déficit.

Los cambios de temperatura y de la distribución espacial y temporal de la lluvia determinan los cambios en las fórmulas climáticas, por lo cual en todos

scenario A2 (Table 5). The forest of this region will be in danger of disappearing because of the high temperatures and higher incidence of pests due to the hot climate and the increase in risk of forest fires. According to Volney and Fleming (2004), global

Cuadro 3. Diferencia de precipitación (mm) promedio mensual y anual para los diferentes años de proyección respecto al periodo de referencia, de acuerdo con el escenario A2.**Table 3. Differences in average monthly and annual precipitation (mm) for the different projection years relative to the reference period, according to scenario A2.**

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedio
2020	1.3	14.5	-0.4	2.4	-14.0	-13.4	-18.1	-13.2	18.5	16.4	1.0	6.2	0.1
2050	2.3	28.0	-0.4	5.3	-28.4	-25.2	-36.3	-26.0	37.0	35.0	1.6	12.7	0.5
2080	3.8	50.0	-0.9	10.6	-49.0	-49.4	-65.5	-43.1	62.3	64.2	1.7	23.5	0.7

Cuadro 4. Diferencia de precipitación (mm) promedio mensual y anual para los diferentes años de proyección respecto al periodo de referencia, de acuerdo con el escenario B1.**Table 4. Differences in average monthly and annual precipitation (mm) for the different projection years relative to the reference period, according to scenario B1.**

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedio
2020	0.6	10.3	-0.1	1.7	-12.4	-10.8	-15.6	-11.0	15.1	14.3	0.3	5.7	-0.2
2050	1.3	19.4	-0.1	3.7	-21.9	-19.5	-28.6	-19.2	27.3	26.5	0.6	10.1	0.0
2080	1.9	29.2	-0.4	5.2	-32.8	-29.4	-41.4	-29.4	42.1	41.2	1.0	14.9	0.2

los municipios de Coahuila habrá modificaciones en dichas fórmulas. Los Cuadros 5 y 6 muestran los cambios en las fórmulas climáticas con respecto al periodo de referencia para la región de Arteaga y Norte, porque en esas regiones se observaron los cambios mayores. Para el año 2080 y para los dos escenarios

warming will have a strong impact on the frequency and intensity of diseases transmitted by pathogenic insects in the northern forests of Canada, changing these forests from carbon sinks to sources releasing CO₂ into the atmosphere. Brasier and Scott (1994) pointed out that the reduction in the deciduous oak

Cuadro 5. Variaciones de la fórmula climática de la región Arteaga, para los tres años de proyección, de acuerdo con los escenarios A2 y B1.**Table 5. Variations in the climatic formula for the Arteaga region, for the three projection years, according to scenarios A2 and B1.**

Escenario	Año de proyección	Fórmula	Descripción
Actual		$Cb(w_0)(x')(e)$	Subhúmedo o templado (el más seco), con verano fresco largo, lluvias en verano, con tendencia a llover todo el año, extremoso.
	2020	$BS_{1,kx'}(w)(e)$	Semiárido, templado, lluvias escasas todo el año, más abundantes en verano, extremoso.
A2	2050	$BS_{1,kw'}(x')(e)$	Semiárido, templado, lluvias en otoño, con tendencia a llover todo el año, extremoso.
	2080	$BS_{1,hw'}(x')(e)$	Semiárido, semicálido, lluvias en otoño, tendencia a llover todo el año, extremoso
	2020	$Cb(w_0)(x')(e)$	Subhúmedo (el más seco), templado, con verano fresco largo, lluvias en verano, con tendencia a llover todo el año, extremoso.
B1	2050	$BS_{1,kw''}(x')(e)$	Semiárido, templado, lluvias de verano, con tendencia a llover todo el año, extremoso, y con canícula.
	2080	$BS_{1,hw}(x')(e)$	Semiárido, semicálido, lluvias en verano, con tendencia a llover todo el año, extremoso.

Cuadro 6. Variaciones de la fórmula climática de la región Norte del estado, para las tres proyecciones, de acuerdo con los escenarios A2 y B1.

Table 6. Variations in the climatic formula for the North region of the state, for the three projection years, according to scenarios A2 and B1.

Escenario	Año de proyección	Fórmula	Descripción
Actual		$BS_0(h')hx'(w)(e')$	Árido, cálido, lluvias todo el año, más abundantes en verano, muy extremoso.
	2020	$BS_0(h')hw'(x')(e')$	Árido, cálido, lluvias en verano, con tendencia a llover más en otoño e invierno, muy extremoso
A2	2050	$BS_0(h')hw'(x')(e')$	Árido, cálido, lluvias en verano, con tendencia a llover más en otoño e invierno, muy extremoso.
	2080	$BS_1(h')hw'(x')(e')$	Semiárido, cálido, lluvias en verano, con tendencia a llover más en otoño e invierno, muy extremoso.
	2020	$BS_0(h')hw''(x')(e')$	Árido, cálido, lluvias en verano con tendencia a llover todo el año, muy extremoso y con canícula.
B1	2050	$BS_0(h')hw'(x')(e')$	Árido, cálido, lluvias en verano, con tendencia a llover más en otoño e invierno, muy extremoso.
	2080	$BS_0(h')hw'(x')(e')$	Árido, cálido, lluvias en verano, con tendencia a llover más en otoño e invierno, muy extremoso.

analizados, el clima de la región de Arteaga cambiará de templado con verano fresco largo, a semicálido (Cuadro 5). Actualmente, Arteaga es la única región subhúmeda en todo el estado y para el año 2020 según el escenario A2 cambiará a semiárida (Cuadro 5). Para el periodo estudiado, la condición de lluvias de verano podría cambiar a lluvias en otoño desde el año 2050 según el escenario A2 (Cuadro 5). El bosque de esta región tendría el riesgo de desaparecer por las temperaturas altas y la incidencia mayor de plagas por el clima cálido y el aumento del riesgo de incendios. Según Volney y Fleming (2004), el calentamiento global tendrá un fuerte impacto en la frecuencia e intensidad de desarrollo de enfermedades transmitidas por insectos patógenas en los bosques boreales de Canadá, cambiando dichos bosques de sumideros de carbón a liberadores de CO_2 a la atmósfera. Brasier y Scott (1994) indicaron que la disminución de la población de robles caducifolios de las especies *Quercus robur* y *Q. petraea* del norte y centro de Europa se debe a una mayor incidencia de enfermedad de la raíz causada por una mayor proliferación del hongo *Phytophthora cinnamomi*, debido al efecto del calentamiento global. Westerling *et al.* (2006) señalaron que la incidencia mayor y duración de incendios forestales en el oeste de los EE.UU. desde 1980 están relacionadas con el aumento de las temperaturas durante la primavera y el verano. Si-

population of the species *Quercus robur* and *Q. petraea* in northern and central Europe is due to a higher incidence of root disease caused by proliferation of the fungus *Phytophthora cinnamomi* as an effect of global warming. Westerling *et al.* (2006) pointed out that the higher incidence and duration of forest fires in western USA since 1980 is related to an increase in temperatures during the spring and summer. Likewise, Groisman *et al.* (2007) showed a direct relationship between the increase in forest fires in Siberia and eastern Russia and warming in these regions over the last 60 years.

For the period studied, the condition of rainfall all year, more abundant in summer in the North region of the state, will change, according to scenarios A2 and B1, to rains in autumn and winter with a tendency to rain any month of the year as of 2050 (Table 6); moreover, the climate will change from arid to semiarid.

CONCLUSIONS

The average annual increase in temperatures in the state of Coahuila will be 4.4 °C in 2080 under scenario A2 and 2.7 °C with scenario B1. In the summer months higher temperatures will occur in both scenarios. This will have a strong impact on the rate of evapotranspiration, mainly of spring-summer

milarmente, Groisman *et al.* (2007) reportaron una relación directa entre el aumento del desarrollo de incendios forestales de Siberia y el este de Rusia, con el incremento del calentamiento de estas regiones durante los últimos 60 años.

Para el periodo estudiado, la condición de lluvias todo el año, más abundantes en verano para la región norte del estado, cambiará según el escenario A2 y B1 a lluvias en otoño e invierno con tendencia a llover cualquier mes del año desde el año 2050 (Cuadro 6); además, el clima cambiará de árido a semiárido.

CONCLUSIONES

El aumento promedio anual de las temperaturas del estado de Coahuila será 4.4 °C en el 2080 bajo el escenario A2, y 2.7 °C con el escenario B1. En los meses de verano se presentarán las temperaturas más altas para ambos escenarios. Esto tendrá un fuerte impacto en la tasa de evapotranspiración, principalmente en los cultivos de primavera verano. Los requerimientos de riego y las frecuencias de aplicación aumentarán.

La magnitud de la precipitación total anual para los dos escenarios y los tres años de proyección será la misma en todo el estado, pero la distribución de la lluvia cambiará porque en verano la lluvia será menor y aumentará otoño e invierno. La lluvia total anual será menor en la región Lagunera y Sur, y aumentará en la región Norte. Una menor precipitación en la región Lagunera y Sur afectará la agricultura de temporal y la agricultura de riego requerirá un volumen de agua mayor, lo cual puede aumentar el abatimiento de los acuíferos en las regiones agrícolas donde las fuentes de suministro son aguas subterráneas.

Las fórmulas climáticas cambiarán en todo el estado. Todas las regiones secas lo seguirán siendo pero con mayor grado de aridez y la región de Arteaga, única subhúmeda en Coahuila, pasará a semiárida en los dos escenarios. Como consecuencia se limitará seriamente la producción del manzano, frutal principal de esta región.

LITERATURA CITADA

Allen, L. H., D. Pan, K. J. Boote, N. B. Pickering, and J. W. Jones. 2003. Carbon dioxide and temperature effects on evapotranspiration and water use efficiency of soybean. *Agron. J.* 95(4): 1071-1081.

crops. Irrigation requirements and frequency of irrigation will increase.

The magnitude of total annual precipitation for the two scenarios and three projection years will be the same in the entire state, but the distribution of rainfall will change because in summer rainfall will decrease and in autumn and winter it will increase. Total annual rainfall will be less in the Lagunera and South regions and will increase in the North region. Less precipitation in the Lagunera and South regions will affect rainfed agriculture and irrigated crops will require a larger volume of water, possibly increasing depletion of the aquifers in the agricultural regions where water is supplied mainly from groundwater reservoirs.

The climatic formulas will change in the entire state. All of the dry regions will continue to be dry but with a higher degree of aridity, and Arteaga, the only subhumid region of Coahuila, will become semiarid in the two scenarios. As a consequence, the production of apple, the main fruit crop of the region, will be seriously limited.

—End of the English version—

---*---

- Arrhenius, S. 1896. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *Philosophical Magazine* 41: 237-276.
- Brasier, C. M., and J. K. Scott. 1994. European oak declines and global warming: a theoretical assessment with special reference to the activity of *Phytophthora cinnamomi*. *EPPO Bulle.* 24(1): 221-232.
- Fourier, J. 1824. Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires. *Ann. Chem. Physique* 27: 136-167.
- García, E. 1981. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Koeppen para Adaptarlo a las Condiciones de la República Mexicana. Offset Larios. México. 246 p.
- Garduño, R. 2003. El Veleidoso Clima. 3ª. Ed. La Ciencia para Todos. SEP. Fondo de Cultura Económica. México. 170 p.
- Goyal, R. K. 2004. Sensitivity of evapotranspiration to global warming: a case study of arid zone of Rajasthan (India). *Agric. Water Manage.* 69(1): 1-11.
- Gregory, P. J., S. N. Johnson, A. C. Newton, and J. S. I. Ingram. 2009. Integrating pests and pathogens into the climate change/food security debate. *J. Exp. Bot.* 60(10): 2827-2838.
- Groisman, P. Y., B. G. Sherstyukov, V. N. Razuvaev, R. W. Knight, J. G. Enloe, N. S. Stroumentov, P. H. Whitfield, E. Førland, I. Hannsen-Bauere, H. Tuomenvirta, H. Aleksandersson, A. V. Mescherskaya, and T. R. Karl. 2007. Potential forest fire danger over Northern Eurasia:

- Changes during the 20th century. *Global and Planetary Change* 56: 371-386.
- Hansen, J. E., and A. A. Laces. 1990. Sun and dust versus greenhouse gases: an assessment of their relative roles in global climate change. *Nature* 346: 713-719.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 1992. *Climate Change: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2000. *Resumen para responsables de políticas. Escenarios de emisiones*.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. *Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC*.
- Jáuregui-Ostos, E. 1995. Algunas alteraciones de largo período del clima de la Ciudad de México debidas a la urbanización. *Revisión y perspectivas. Investigaciones Geográficas* 31:9-44.
- Jauregui, E., and A. Tejeda. 2001. A scenario of human thermal comfort in Mexico City for 2CO₂ conditions. *Atmósfera* 14(3): 125-138.
- Jones, R. G., M. Noguera, D. C. Hassel, D. Hudson, S. S. Wilson, G. J. Jenkins, and J. F. B. Mitchell. 2004. *Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS. Met Office Hadley Centre, Exeter, UK. 40 p.*
- Liao, J., and G. Wang. 2002. Effect of drought, CO₂ concentration and temperature increasing on photosynthesis rate, evapotranspiration, and water use efficiency of spring wheat. *Chinese J. Appl. Ecol.* 13(5): 547-550.
- Manabe, S., R. T. Wetherald, and R. J. Stouffer. 1981. Summer dryness due to an increase of atmospheric CO₂ concentration. *Climatic Change* 3(4): 347-386.
- Moreno-Cadavid, J., y J. E. Salazar. 2009. Modelo autoregresivo multivariado basado en regímenes para la generación de series. *Dyna* 76(157): 101-108.
- Mousavi, M. E., J. L. Irish, A. E. Frey, F. Olivera, and B. L. Edge. 2011. Global warming and hurricanes: the potential impact of hurricane intensification and sea level rise on coastal flooding. From the issue entitled *Climatic Change Letters* 783-801.
- Palma, B. E. 2007. *Escenarios Climáticos. Plan Estatal para el Cambio Climático, Gobierno del Estado de Veracruz. 163 p.*
- Pfeffer, W. T., J. T. Harper, and S. O'Neel. 2008. Kinematic constraints on glacier contributions to 21st-century sea-level rise. *Science* 321: 1340-1343.
- Roos, J., R. Hopkins, A. Kvarnheden, and C. Dixelius. 2011. The impact of global warming on plant diseases and insect vectors in Sweden. *Eur. J. Plant Pathol.* 129(1): 9-19.
- Urrutia, R., and M. Vuille. 2009. Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model: Temperature and precipitation simulations for the end of the 21st century. *J. Geophys. Res.: Atmospheres* 114(D2): 2156-2202.
- Vázquez-Botello, A. 2008. *Evaluación nacional de la vulnerabilidad actual y futura de la zona costera mexicana y de los deltas mas impactados ante el incremento del nivel del mar debido al cambio climático y fenómenos hidrometeorológicos extremos. Informe Final. INE, UNAM, SEMARNAT. 121 p.*
- Volney, J. A., and R. A. Fleming. 2000. Climate change and impacts of boreal forest insects. *Agric. Ecosys. Environ.* 82(1-3): 283-294.
- Wang, M., and J. E. Overland. 2009. A sea ice free summer arctic within 30 years? *Geophys. Res. Lett.* 36:20-25.
- Westerling, A. L., H. G. Hidalgo, D. R. Cayan, and T.W. Swetnam. 2006. Warming and earlier spring increase Western U.S. forest wildfire activity. *Science* 313 (5789): 940-943.