

Descripción de la variabilidad climática normal (1951-2010) en la cuenca del río Guanajuato, centro de México

Description of the average climatological (1951-2010) at Guanajuato river watershed, central Mexico

Julio César Martínez-Arredondo*, Rodolfo Jofre Meléndez*, Víctor Manuel Ortega Chávez*, Yann René Ramos Arroyo*

RESUMEN

Este trabajo describe la variación espacial del clima en la cuenca del río Guanajuato, y se asocia con la hidrología superficial. Se elaboraron mapas para mostrar la distribución espacial de la magnitud promedio anual de la lámina de lluvia acumulada, temperatura del aire, cantidad de días con granizo, niebla y de tormentas eléctricas. Se utilizó la información de diecisiete estaciones climatológicas para la cuenca del río Guanajuato, con 490 km² de superficie, siete de ellas localizadas al interior. Los datos procesados fueron de climatología normal (1951-2010) de la Comisión Nacional del Agua (Conagua). También se obtuvo el índice climático convencional asociado con sequía y aridez. Los mapas exhiben una oscilación acentuada de las variables climáticas. La información ayuda a tomar decisiones con respecto a la presencia y frecuencia de riesgos hidrológicos en la región (avenidas máximas, sequías e inundaciones) e incidir en los planes de ordenamiento territorial y ecológico.

ABSTRACT

The spatial variation in climate of Guanajuato river basin was described and associated with surface hydrology. Mapping was developed to show the spatial distribution of mean annual magnitude of the head accumulated rainfall, air temperature, number of days with hail, fog and thunderstorms. Database of seventeen weather stations identified for Guanajuato river basin was used, covers 490 km², seven of these are located in the interior. The used data were average climatological (1951-2010) of the Comisión Nacional del Agua (Conagua, acronym in Spanish). Conventional climate index associated with drought or aridity was also obtained. The maps show a marked swing in climatic variables. The information helps to take decisions regarding the presence and frequency of hydrological risks in the region (maximum runoff, drought and flooding) and to support the plans of territorial and ecological planning.

Recibido: 13 de mayo de 2015
Aceptado: 3 de septiembre de 2015

Palabras clave:

Índice climático; sequía; fisiografía; Mesa del Centro; riesgos hidrológicos.

Keywords:

Climate index; drought, physiography; Mesa del Centro; hydrological risks.

Cómo citar:

Martínez-Arredondo, J. C., Jofre Meléndez, R., Ortega Chávez, V. M., & Ramos Arroyo, Y. R. (2015). Descripción de la variabilidad climática normal (1951-2010) en la cuenca del río Guanajuato, centro de México. *Acta Universitaria*, 25(6), 31-47. doi: 10.15174/au.2015.799

INTRODUCCIÓN

Las condiciones fisiográficas del territorio mexicano favorecen una climatología muy diversa (Maderey & Carrillo, 2005). En México, el factor geográfico que controla el clima se describe con la cercanía a costas y la latitud; otro tipo de influencia es la orografía a través de la elevación sobre el nivel del mar y por la pérdida de vegetación al cambiar el tipo de uso de suelo (Díaz *et al.*, 2011; Mosiño & García, 1974; Pavia, Graef & Reyes, 2006; Vidal, 2005). Las condiciones orográficas generan una variabilidad climática amplia, favorecida en la proximidad de los límites entre provincias fisiográficas.

La Comisión Nacional del Agua (Conagua), a través del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), clasifica el clima para México considerando la temperatura del aire o la humedad atmosférica. Según la temperatura del aire, se clasifica al estado de Guanajuato como tipo semicálido y templado (figura 1).

* Departamento de Ingeniería en Geomática e Hidráulica, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato. Av. Juárez núm. 77, zona centro, Guanajuato, Guanajuato, México, C.P. 36000. Correos electrónicos: jc.matinez@ugto.mx; yannramos2004@yahoo.com.mx

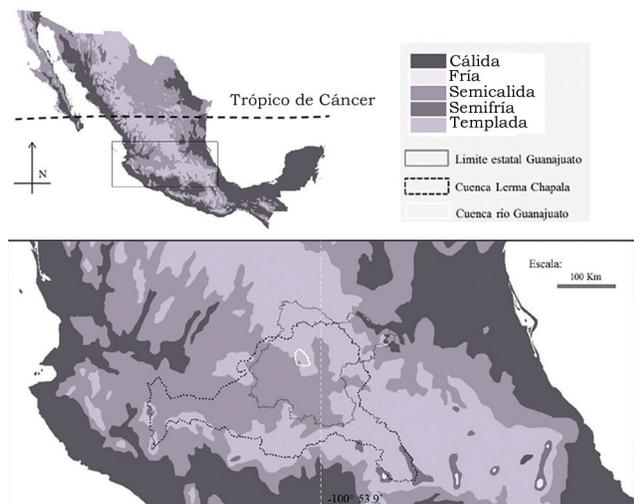


Figura 1. Clasificación del clima en México según temperatura del aire. En el cuadro del acercamiento se detalla la región del río Lerma y del estado de Guanajuato.

Fuente: Elaboración propia con información de Conagua.

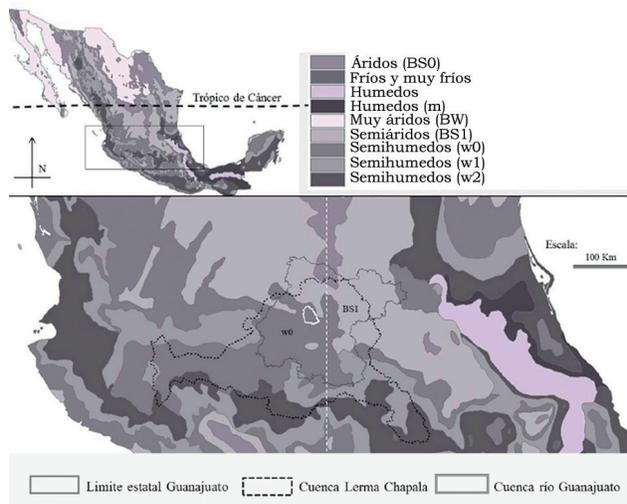


Figura 2. Clasificación del clima en México según la humedad atmosférica; se muestra un detalle por acercamiento para la zona del Estado de Guanajuato.

Fuente: Elaboración propia con información de Conagua.

Con base en la humedad atmosférica, se proponen diferentes tipos de clima: templado subhúmedo (w0) y semiárido (BS1). El clima templado es subclasificado en húmedo y subhúmedo. El clima templado húmedo se asocia con la presencia de temperaturas que oscilan en promedio anual entre 18 °C a 22 °C, y una lámina de lluvia normal que va los 2000 mm a 4000 mm; por lo regular se presenta en la selva del trópico y en zonas de montaña en las costas de Veracruz; en total este tipo de clima cubre una superficie equiparable el 27% del territorio nacional (figura 2).

El clima templado subhúmedo cubre una superficie de 20.5%, con temperaturas del aire que oscilan entre 10 °C a 18 °C y de 18 °C a 22 °C; sin embargo, en algunas regiones disminuye a menos de 10 °C; se registra un acumulado anual promedio de lámina de lluvia de 600 mm a 1000 mm. Se considera este tipo de clima asociado con cimas en la Sierra de Guanajuato (su elevación máxima es 2990 msnm).

Los climas seco, semiáridos, áridos y muy áridos cubren la mayor parte del territorio del centro y norte del país, equiparable al 28.3% del territorio nacional (figura 2). Se caracteriza por circulación de vientos fuertes que provocan escasa nubosidad y un acumulado anual promedio de lámina de lluvia entre 300 mm a 600 mm; la temperatura del aire promedio oscila de 22 °C a 26 °C en algunas regiones, y en otras de 18 °C a 22 °C.

El clima muy seco se asocia con temperatura del aire promedio, oscilando de 18 °C a 22 °C, con casos extremos que superan los 26 °C, presentando un acumulado de lámina de lluvia promedio anual de 100 mm a 300 mm, y cubre una superficie que equivale el 15.5% del país.

Al clima cálido se le subdivide en cálido húmedo y cálido subhúmedo. El clima cálido húmedo ocupa el 8.7% del territorio nacional, y se le caracteriza por tener una oscilación de temperatura media anual de 22 °C a 26 °C, y una lluvia acumulada al año de 2000 mm a 4000 mm.

El clima cálido subhúmedo cubre una superficie equivalente del 23% del país; el acumulado de lámina de lluvia anual promedio está entre 1000 mm y 2000 mm, y la temperatura promedio del aire oscila entre 22 °C a 26 °C, con regiones donde se supera el valor de 26 °C.

Otro factor que influye en las regiones semiáridas y subhúmedas, en las últimas décadas, es el incremento de la extensión de superficies urbanizadas, porque aumentan el albedo (Christein & Voogt, 2004; Yaoping, Jiyuan, Yunfeng, Junbang & Wenhui, 2012), y con ello se generan islas de calor que afecta el confort climático de los habitantes (Arnfield, 2003; Contreras, Salas, Velásquez & Quebedo, 2008; Jáuregui, 1997; Martínez, 2014). El área que ocupan cuerpos de agua (presas

y lagos) se considera un factor regulador de la temperatura del aire y de la humedad atmosférica; asimismo la vegetación, que juega un rol importante en la temperatura media dentro de la zona urbana (Colunga, Cambrón-Sandoval, Suzán-Azpiri, Guevara-Escobar & Luna-Soria, 2015). Tanto la humedad como la temperatura contribuyen incrementando episodios de lluvia con origen de nubosidad convectiva (Valdés, Cortez & Pastrana, 2005).

El objetivo de este trabajo fue describir las condiciones climatológicas normales (1951-2010) de la región río Guanajuato, identificando los tipos de lluvia que ocurren y se discute en términos de riesgo y abasto a la población. Se elaboraron mapas de la variación climática regional, ajustados a una escala 1:20 000.

Descripción del clima en la cuenca del río Guanajuato

La cuenca del río Guanajuato se localiza al centro del estado del mismo nombre, forma parte del sistema hidrológico Lerma-Chapala (figura 2); se encuentra entre los meridianos 101°02' y 101°20' y los paralelos 21°05' y 20°52'. Se ubica entre dos provincias fisiográficas, la Mesa Central en la sección norte y el eje neovolcánico trans-mexicano, al sur; ambas regiones son divididas por la falla geológica El Bajío (Lugo, 1990).

La mayor parte del territorio que ocupa la cuenca se encuentra dentro de la subprovincia conocida como Sierra de Guanajuato (SG), la cual tiene una extensión de 100 km, con dirección noroeste-sureste (NW-SE). La SG es transversal a la provincia de la mesa del centro (Vidal, 2005), la zona más lluviosa en esta región, ya que se han registrado valores anuales promedio máximos de 2200 mm, y un extremo mensual de 1400 mm en julio de 1976. Esto destaca porque se obtuvo que el valor acumulado anual promedio oscila entre 800 mm – 840 mm.

En esta región se originan dos ríos importantes del sistema hidrológico Lerma-Chapala: el río Guanajuato, que drena hacia el sur, y el río Laja, que drena hacia el norte. Ambos ríos abastecen de agua potable a la población de Guanajuato o son utilizados para actividades agrícolas e industriales de Silao, Irapuato, Dolores Hidalgo, Dr. Mora, San Luis de la Paz, San Diego de la Unión, San Miguel de Allende y Celaya.

En la figura 3 se muestran los tipos de clima que sugiere Conagua en el río Guanajuato y en las subcuencas asociadas con el abasto de agua potable a la población y el control de riesgos hidrológicos. En las

subcuencas Esperanza-Soledad-Santana (ESS), ubicadas al norte y noreste de la ciudad de Guanajuato, se encuentran dos presas: La Esperanza y La Soledad; el agua captada en ellas es potabilizada y suministrada para consumo humano. La subcuenca Monte de San Nicolás (MSN) influye en el sistema hidrológico porque aporta flujo superficial a la Cuenca Urbana Guanajuato (CUG), la cual se asocia con influencia de riesgo a los habitantes, debido a que las avenidas máximas son generadas rápidamente en una superficie impermeable extensa. La cuenca Esperanza y la cuenca Soledad fueron declaradas áreas naturales protegidas, la primera en 1998, considerada zona conservada (Declaratoria del área natural protegida “Cuenca La Esperanza”, 1998), y la segunda en la modalidad de rescate y preservación en el 2006 (Declaratoria del área natural protegida “Cuenca La Soledad”, 2006).

Por otra parte, se subclasificó la subcuenca Santana en dos porciones, como Santana Norte y Santana Sur, a causa del funcionamiento hidrológico, y porque tienen erosión hídrica del suelo intenso, provocado por el pastoreo que se practica, por la geología y la geometría que produce el relieve de topografía accidentada, lo cual condiciona baja densidad de vegetación en sus laderas. En estas subcuencas, las condiciones geológicas, como rocas fracturadas y grandes cavidades de minas, tienen efectos importantes en la hidrología. Hay aporte de agua por numerosos manantiales, pero hay efectos adversos por la liberación de drenajes de mina que pueden afectar la calidad del agua (Ramos *et al.*, 2013).

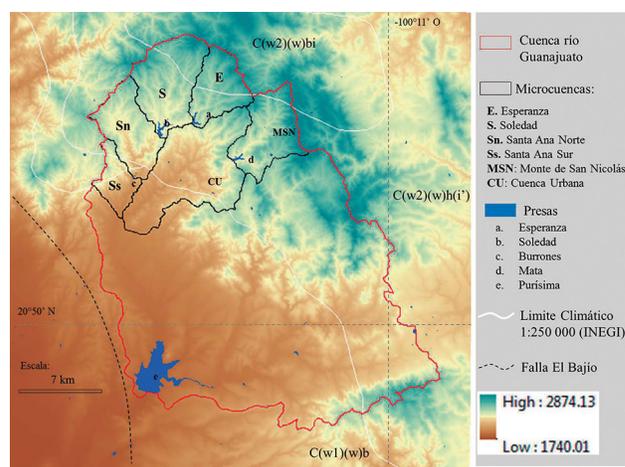


Figura 3. Localización geográfica de la cuenca río Guanajuato y sitios que destacan hidrológicamente.

Fuente: Elaboración propia con información del INEGI.

En esta región se presentan tres subtipos de clima templado en la cuenca del río Guanajuato, según se aprecia en la figura 3. El gradiente topográfico en la cuenca es de 1000 m, desde los 2800 msnm del parteaguas norte hasta 1800 msnm en la cortina de la presa La Purísima:

- C(w2)(w)bi se localiza en la zona norte de la cuenca del río Guanajuato. Es el más húmedo de los templados subhúmedos con lluvias en verano, con un cociente de precipitación y temperatura (P/T) mayor a 55; tiene un porcentaje de lluvia invernal menor del 5% de la anual, verano fresco y prolongado. La temperatura media anual oscila entre 14.5 °C (enero) y 22.3 °C (mayo).
- C(w2)(w)h(i'), similar al anterior, con un cociente de P/T mayor a 55; tiene un porcentaje de lluvia invernal menor del 5% de la anual. Temperatura media entre los 18 °C y 22 °C.
- C(w1)(w)b, similar al anterior, aunque más seco, cociente P/T entre 43.2 y 55.0; tiene un coeficiente de lluvia invernal menor a 5% de la lluvia anual, temperatura entre 6.5 °C y 22 °C.

La figura 4 representa el uso de suelo y tipo de cobertura vegetal en la región; particularmente se muestra la frontera que describe la extensión que cubría el área urbana en los años de 1990 y 2013. Los cambios inducidos en el uso de suelo de pastizal o de matorral a zona urbana generaron el incremento de la temperatura del aire o del coeficiente de escurrimiento.

Se redujo la extensión en bosques, representado en menor número de individuos arbóreos, lo que favoreció el incremento de la erosión del suelo, así como del volumen de materiales que provocaron la disminución del volumen de captación de las presas.

Al norte de la sierra de Guanajuato se ubican las llanuras altas donde el clima es más seco, de tipo templado-semiárido, con temperaturas extremas porque los inviernos son muy fríos y los veranos muy calurosos; la precipitación es escasa (entre 300 mm a 500 mm). Tiene una reducida presencia de vegetación y nubosidad, con un viento variable (Garduño, 1999).

Al sur de la sierra de Guanajuato se encuentra El Bajío guanajuatense, que forma parte de la subprovincia del eje neo-volcánico, donde se presenta un

clima semicálido-subhúmedo. La escasa variación de temperatura entre estaciones provoca que las lluvias sean moderadas en intensidad y frecuentes en la época lluviosa (600 mm a 700 mm).

En el Bajío se destaca la extensión que presenta la ocupación del territorio con base en el uso de suelo y por los diversos medios de producción. En esta región hay cinco ciudades con alta densidad de población, algunas consideradas zonas metropolitanas (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2010): Querétaro (1 097 028 hab.), Celaya (468 387 hab.), Salamanca (270 769 hab.), Irapuato (529 440 hab.) y León (cerca de 1.7 millones hab.).

Este tipo de ocupación del suelo genera una gran extensión urbana (350 km²), lo cual favorece la presencia del fenómeno llamado *isla de calor* (Arnfield, 2003; Colunga *et al.*, 2015; Jáuregui, 1997; Poreh, 1996), que vinculado con la contaminación atmosférica generada en el corredor industrial Querétaro-León la evaporación producida en cuerpos de agua y la influencia del relieve favorece que las lluvias sean de intensidad elevada y breves en su duración (Colunga *et al.*, 2015; Cortez, 1999; Valdés *et al.*, 2005).

Esto destaca la propuesta de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2010) para tener instalado y monitoreando un observatorio meteorológico cada 10 km o 50 km a la redonda. El estado de Guanajuato tiene 30 420 km² de extensión, pero cuenta únicamente con un observatorio meteorológico, el cual desde 1982 registra cada hora las variables atmosféricas principales. Existen otras estaciones meteorológicas automáticas, con registros diarios y horarios, pero son de reciente instalación (desde el año 2010). La cantidad de datos climatológicos registrados es baja en las estaciones climáticas convencionales, dentro y cerca del área de influencia de la cuenca del río Guanajuato (CRG). Se recomienda que exista una estación climatológica cada 25 km² como mínimo para zonas montañosas o de topografía accidentada (OMM, 2010). Esto no se cumple porque en la región SG hay una estación por cada 70 km² de superficie, y a nivel estatal sólo hay una estación por cada 177.9 km². Se debe seguir el monitoreo puntual de cara a un cambio notable en el régimen pluviométrico, emplear modelos de predicción climática que prevén que en latitudes medias disminuye la cantidad de lluvia anual, pero que aumenta la cantidad de lluvia repentina con intensidades altas (*Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]*, 2014).

MATERIALES Y MÉTODOS

Hidrografía

Para este procesamiento se utilizaron datos cartográficos vectoriales a escala 1:50 000 de la topografía del área de estudio, extraídos de las hojas con clave F14C42, F14C52, F14C43 y F14C53 desarrolladas por el INEGI (2010). Asimismo, se usó la aplicación *Hydrology* con la herramienta *Spatial Analyst* de ArcMap 10, para determinar parámetros geométricos con apoyo del modelo de elevación del terreno, además del análisis hidrológico como áreas de cuencas, dirección de flujo, pendiente, entre otras.

Variación espacial de eventos climáticos

Se compilaron y procesaron los datos climatológicos medios anuales (lluvia, temperatura del aire, evaporación, número de días con lluvia, granizo, niebla o tormentas eléctricas) de diecisiete estaciones climatológicas de Conagua, localizadas en la proximidad del territorio del río Guanajuato, incluye siete dentro del mismo. Los registros que contienen la información están disponibles en el servidor <http://smn.cna.gob.mx>. Para realizar el análisis detallado se utilizaron en conjunto registros de la base de datos Extractor Rápido de Información Climatológica III (ERIC III), elaborado en conjunto por Conagua y el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). En la tabla 1 se muestran las coordenadas, clave y nombre de cada estación utilizada en el análisis climatológico, con base en información histórica normal del periodo 1951-2000. En la figura 4 se ilustra la ubicación de las estaciones convencionales, donde además puede apreciarse el tipo de cobertura vegetal. Se crearon isolíneas utilizando los datos climatológicos normales (1951-2010) procesados, para ello se aplicó la herramienta *Geostatistical* y *Spatial Analyst* de ArcMap 10. Los mapas desarrollados fueron de temperatura máxima, temperatura mínima, lámina de lluvia acumulada, evaporación, días con lluvia, días con granizo y días con tormentas eléctricas. El método de interpolación utilizado fue *Kriging*, considerado del tipo MELI (Mejor Estimador Lineal Inssegado), utilizado para crear la representación de variables geofísicas (Davis, 1986; Izquierdo & Márquez, 2006). Los radios de cobertura utilizados son de 1 km para las tormentas eléctricas y de 5 km para la presencia de niebla y granizo.

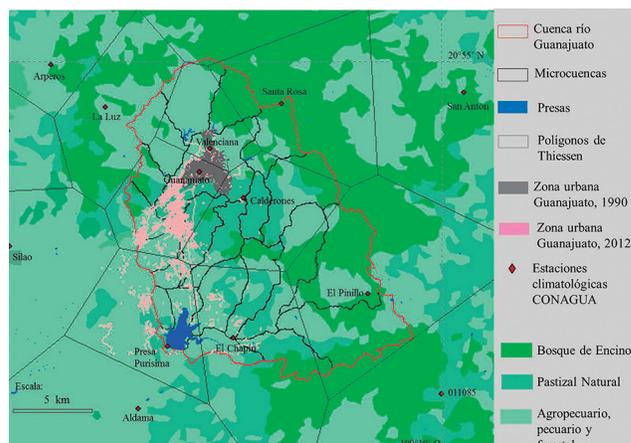


Figura 4. Localización de estaciones climatológicas, polígonos de Thiessen y tipo de vegetación.

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI y Conagua.

En la tabla 1, las estaciones en negritas corresponden a aquellas que se encuentran al interior de la cuenca del río Guanajuato. Resalta de todas la estación Guanajuato por tener un historial de información de lluvia desde 1865.

Propuesta de índices y tipos climáticos en la cuenca del río Guanajuato

En la tabla 2 se muestra el criterio de clasificación utilizado para definir los índices de sequía con base en el criterio de Palmer, modificado por Peralta (Peralta & Barba, 2008). El índice de sequía ($IS = PP/T$) se determinó dividiendo la precipitación acumulada de un periodo (PP) dado, contemporáneo al dato de temperatura media (T). Aplicamos este índice modificado como sigue: se divide el año en periodos considerados con base en el funcionamiento hidrológico, como son: periodo I: octubre-diciembre; periodo II: octubre-marzo, periodo III: octubre-junio y periodo IV: octubre-septiembre. Esta metodología fue utilizada por Martonne (1935) y Köppen (1948).

Se considera una clasificación hidro-meteorológica porque en estas cuencas se incluye el análisis del efecto poslluvia debido a que se definió al mes de octubre como el periodo de inicio del año hidrológico. En la figura 5 se muestra la variación espacial de este índice. La cuenca del río Guanajuato presenta un índice de sequía con magnitud mayor a 2.7 y hasta 6.07, es decir, existen territorios con una condición climática de tipo "poco seco" hasta el "húmedo". En la tabla 2 se muestran las clasificaciones utilizadas en las subcuencas con base en la condición de sequía.

Tabla 1.
Datos nominales y geográficos de cada estación climatológica de Conagua.

Estación	Clave Conagua	UTM x (m)	UTM y (m)	Altitud (msnm)	Periodo de registro	Datos completos (%)
Aldama	011004	259349.48	2303399.61	1786	04/1949 – 02/2012	94.1
Arperos	011135	250800.31	2335216.84	1970	11/1977 – 04/2012	76.8
Calderones	011007	268438.63	2322592.33	2280	04/1949 – 06/2012	96.9
Chichimequillas	011165	246457.16	2338790.34	2020	09/1970 – 03/2012	91.1
Ciénega de Negros	011141	268142.39	2342262.18	2454	12/1979 – 05/2012	98.4
Dolores Hidalgo	011017	299374.75	2341200.01	1937	07/1951 – 07/2012	97.8
Dos Arroyos	011085	287602.55	2305140.55	2160	05/1972 – 06/2012	96.4
El Carbón	011140	278356.86	2353282.88	2100	12/1979 – 11/2011	96.5
El Chapín	011124	265908.44	2309066.09	1850	07/1977 – 07/2012	99.4
El Pinillo	011121	278360.01	2314766.14	2020	01/1976 – 05/2012	88.4
Guanajuato	011094	264451.86	2325403.51	1999	01/1969 – 05/2012	92.8
La Luz	011130	255825.33	2331363.41	2419	08/1977 – 10/2011	69.1
N. Valle de Moreno	011049	248160.34	2347688.52	2258	06/1962 – 07/2012	96.2
Presa La Purísima	011137	262473.74	2309114.52	1800	10/1977 – 03/2012	91.7
San Antón	011061	287581.83	2331641.82	2300	01/1964 – 04/2012	90.5
Silao	011074	246428.27	2319355.31	1782	01/1986 – 06/2012	71.9
Santa Rosa Mineral	011073	272032.41	2331802.96	2571	04/1962 – 04/2012	68.3
Valenciana	011103	265432.21	2327496.57	2220	09/1973 – 07/2012	95.3

Fuente: Elaboración propia con datos de Conagua.

Tabla 2.
Criterio de índice de sequía.

Rango IS (mm oC ⁻¹)	Condición
0.1 – 0.5	Extremadamente seco
0.51 – 1.0	Muy seco
1.1 – 1.5	Seco
1.51 – 2.0	Moderadamente seco
2.1 – 2.5	Poco seco
2.51 – 3.0	Normal
3.1 – 3.5	Poco húmedo
3.51 – 4.0	Moderadamente húmedo
4.1 – 4.5	Húmedo
4.51 – 5.0	Muy húmedo
Mayor a 5.1	Extremadamente húmedo

Fuente: Elaboración propia con base en Peralta & Barba (2008).

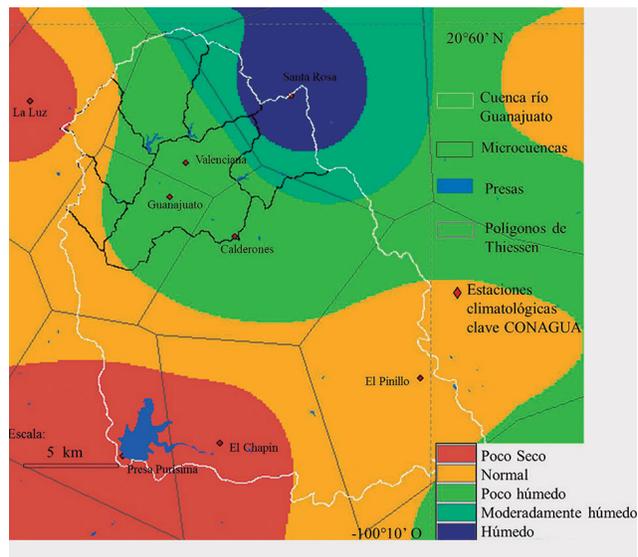


Figura 5. Índice de sequía anual (mm/°C) en la región del río Guanajuato.
Fuente: Elaboración propia con información de Conagua.

Los valores de índice de sequía presentados en la figura 5 coinciden con el uso de suelo y vegetación, según se aprecia en la figura 4. El bosque de encino favorece un índice de sequía húmedo en la zona norte y de montaña, mientras que en los pastizales y zonas de urbanización el índice de sequía disminuye a un estado normal. El valor extremo de “poco seco” es más frecuente en la zona más baja de la cuenca; resulta interesante que se presenta este mismo estado en la estación La Luz (011130), situada a 2419 msnm.

Los valores que se presentan en la tabla 2 ayudan a entender los valores extremos de índice de sequía que pueden ocurrir. Al menos anualmente sólo se presenta como valor más bajo, 2.1, que significa “poco seco”. Sin embargo, la lluvia media anual más baja en la cuenca corresponde a 130 mm en la Estación Calderones (011007), en el año 1965.

En la figura 5 se aprecia que la subcuenca más húmeda es la de Monte de San Nicolás, la mayor parte de las cuencas de estudio se sitúan en una región de sequía poco húmeda, a pesar de estar en un clima semiárido.

Índice de aridez de Martonne (1935)

Con este índice se representan las condiciones de relación en sitio para lluvia y temperatura; se define como $Ia = P/(T + 10)$, P = lámina de lluvia acumulada anual (mm), T = Temperatura media anual (°C). En la tabla 3 se muestran los intervalos de clasificación implementados para la cuenca del río Guanajuato (Díaz *et al.*, 2011), mientras que en la figura 6 aparece su representación gráfica; en esta figura se observa la transición de climas en la que se encuentra la zona de estudio. Las estaciones climatológicas y los valores medios de las cuencas se sitúan en un clima que va de semiárido a templado subhúmedo. Se comparan los valores locales con los de otras ciudades de México.

Se utilizó el criterio de intensidad de intemperismo de los materiales con base en la temperatura del aire y de la presión atmosférica para clasificar el área de estudio visualizando las áreas de la figura 7. Esta clasificación sirve para entender los procesos de meteorización y erosión de la cuenca. Las cuencas de estudio se sitúan en una zona de intemperismo químico (IQ) moderado. El rol de la evapotranspiración y lluvias intensas se ve reflejado en esta clasificación. Gran parte de las estaciones climatológicas se encuentran en un ambiente de intemperismo de procesos débiles.

Tabla 3.
Índice de aridez de Martonne.

Ia	Clima
> 60	Per-húmedo
60 - 30	Húmedo
30 - 20	Sub-húmedo
20 - 15	Semiárido (mediterráneo)
15 - 5	Árido (estepario)
5 - 0	Árido extremo (desierto)

Fuente: Elaboración propia.

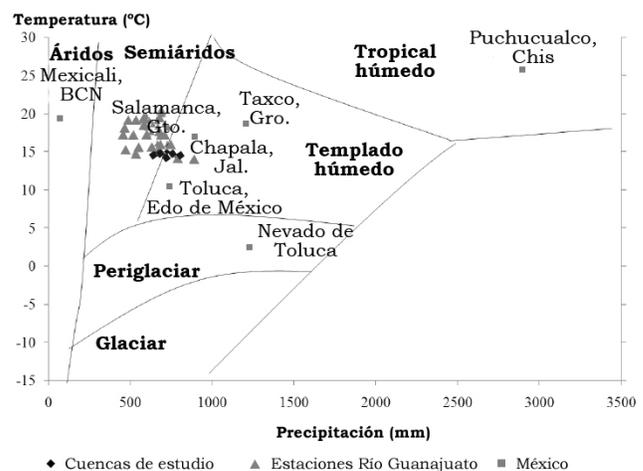


Figura 6. Tipos de clima en función de T y P para diferentes sitios de la República mexicana.

Fuente: Elaboración propia con información de Conagua.

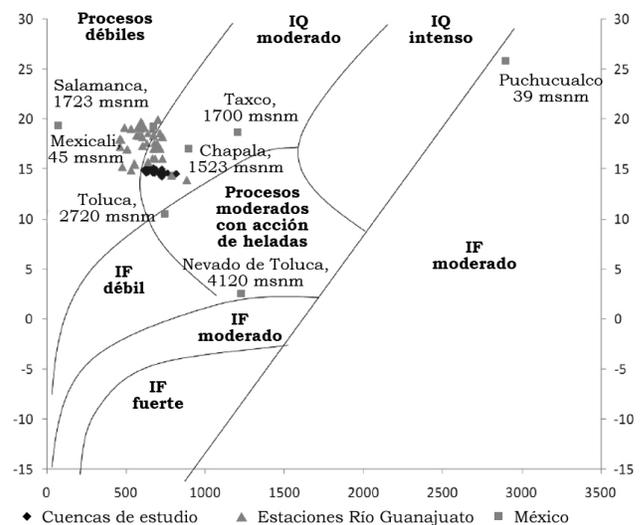


Figura 7. Índice de intemperismo para sitios de la República mexicana.

Fuente: Elaboración propia con información de Conagua.

RESULTADOS

Hidrografía

Los diversos tipos climáticos se relacionan con la respuesta de las condiciones del terreno. Es posible identificar un sistema de drenaje complejo que condiciona una respuesta rápida cuando ocurren lluvias. En la tabla 4 se muestran los datos obtenidos de la caracterización hidrográfica de las cuencas de estudio, destaca la magnitud descrita con la presencia del terreno con topografía abrupta, pendientes arriba de 40% y rangos de elevación de 2800 msnm - 2200 msnm.

Variación espacial de eventos climáticos

En la figura 8 se muestra el mapa de temperatura máxima. El gradiente térmico para la región central de México está localizado en la magnitud de 0.65 °C por cada 100 m de altitud (Mendoza, Bocco, López & Bravo, 2007). La correlación entre lámina de lluvia acumulada obtenida con los datos de estaciones climatológicas arrojaron un gradiente térmico-elevación con valor entre 0.71 a 0.93.

El gradiente térmico asociado con la ubicación de la cuenca La Esperanza es de 5 °C en 5 km de distancia asociado a un diferencial de 500 m de elevación.

Las temperaturas más altas se dan en las cercanías de la presa La Purísima, 28.2 °C, y en la zona de la ciudad, 25.6 °C, con valores extremos extraordinarios diarios de 38.9 °C y 39.5 °C. La zona más cálida es donde habita la mayor parte de la población. Aunado a lo anterior, de 1980 a 2012 ha crecido el padrón vehicular en la ciudad en un 600%, por ello es muy posible un calentamiento aún mayor en esta zona urbana (Woitrin-Bibot, Martínez-Arredondo & Ramos-Arroyo, 2015).

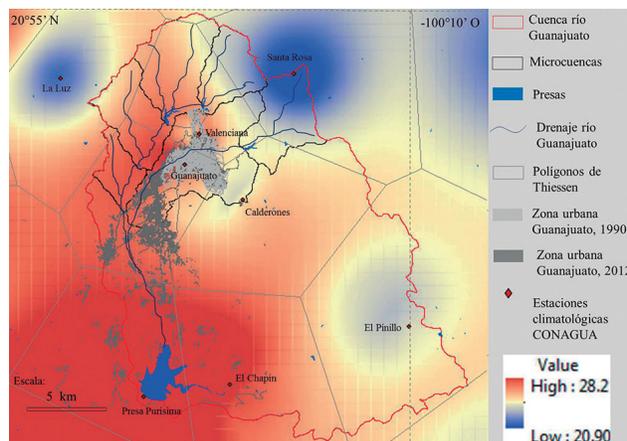


Figura 8. Temperatura máxima normal (°C) sobre el área de la cuenca del río Guanajuato.

Fuente: Elaboración propia con información de Conagua.

Tabla 4.
Parámetros fisiográficos e hidrográficos de la cuenca de estudio.

Parámetro	Esperanza	Soledad	Santa Ana norte	Santa Ana sur	Monte San Nicolás	Cuenca Urbana Gto.
Área (km ²)	17.5	28.2	21.1	9.8	23.02	47.2
Elevación máxima (msnm)	2,748	2,807	2,573	2,404	2,821	2,644
Elevación media (msnm)	2,503	2,503	2,265	2,150	2,359	2,427
Elevación mínima (msnm)	2,259	2,200	1,958	1,897	1,897	2,210
Longitud cauce principal (km)	7.24	10.12	7.41	3.85	8.98	11.45
Pendiente media cauce principal (%)	6.42	5.70	5.55	11.01	5.86	6.6
Tiempo de concentración (minutos)	51.2	65.1	48.1	21.6	58.78	77.02
Pendiente media de la cuenca (%)	4.73	4.95	5.00	4.76	5.21	4.69
Orientación media de ladera (°)	226.2	212.7	210.2	205.5	224.2	223.3
Dirección de Flujo (°)	187.9	184.8	187.1	175.7	192.2	193.5
Orden de Corriente	3	4	3	3	4	3
Densidad de Drenaje (km/km ²)	1.89	3.05	2.59	5.35	2.35	1.09
Factor de forma	1.32	1.3	1.41	1.55	1.36	1.68

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 9 se muestra la variación espacial de las temperaturas mínimas normales en la cuenca del río Guanajuato; cabe mencionar que se considera como temporada fría la comprendida entre los meses de noviembre a marzo. En la estación Santa Rosa, la temperatura mínima extrema es de $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$, sin embargo en la estación Cinco Señores registró la más baja histórica de esta región, $-9.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en 1976. La cuenca Monte de San Nicolás presenta una temperatura baja mejor distribuida, desde la estación Santa Rosa hasta Calderones se mantiene una temperatura mínima, $8.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ la media anual.

En la tabla 5 se observa la lista del promedio calculado para la temperatura máxima y mínima en las estaciones climatológicas analizadas, así como la oscilación media anual; la que presenta menor oscilación es la cuenca Esperanza, $9.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que la cuenca Santa Ana sur manifiesta un rango mayor de temperatura, con una oscilación térmica anual de $14.7\text{ }^{\circ}\text{C}$. En términos de balance de radiación solar es necesario conocer estos valores de temperatura (Yaoping *et al.*, 2012).

En la figura 10 se representa la distribución espacial de la lámina de lluvia acumulada en la cuenca del río Guanajuato. En la figura 11 se representan los datos de la curva masa para la lámina de lluvia acumulada media de las cuencas. En el verano se espera más de 70% de la lluvia, mayormente del tipo orográfica, menos de 10% de la lluvia total cae en invierno. En los meses de mayo, junio y septiembre se presentan lluvias convectivas, por lo regular en horas de baja radiación solar, y en septiembre y octubre se presentan lluvias que corresponde a la actividad del océano Atlántico (Vidal, 2005).

Tabla 5.
Temperatura normal en el área de la cuenca del río Guanajuato.

Cuenca	$T_{\text{máx}}\text{ (}^{\circ}\text{C)}$	$T_{\text{mín}}\text{ (}^{\circ}\text{C)}$	$\Delta T\text{ (}^{\circ}\text{C)}$
Esperanza	18	8.5	9.5
Soledad	19.3	9.1	10.2
Santa Ana norte	22	9.9	12.1
Santa Ana sur	25	10.3	14.7
Monte San Nicolás	18.3	8.2	10.1
Cuenca Urbana Gto.	19.2	9.4	9.8

Fuente: Elaboración propia.

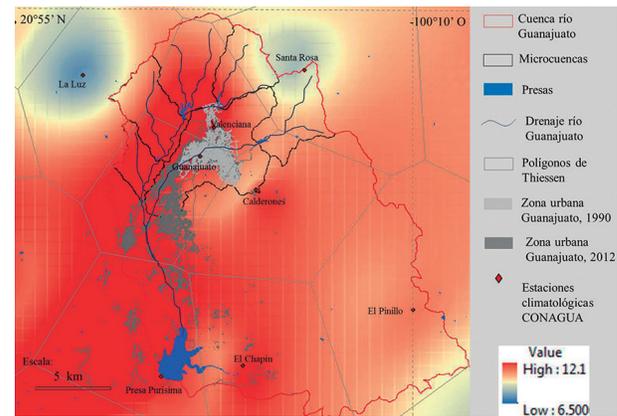


Figura 9. Temperatura mínima normal ($^{\circ}\text{C}$) sobre el área de la cuenca del río Guanajuato.

Fuente: Elaboración propia con información de Conagua.

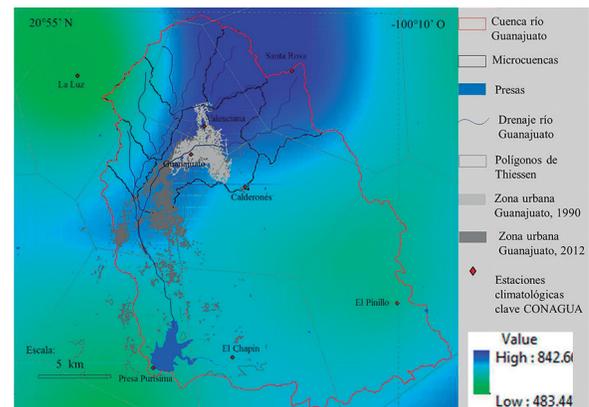


Figura 10. Representación de la lámina acumulada promedio anual de lluvia normal (mm) sobre la cuenca del río Guanajuato.

Fuente: Elaboración propia con información de Conagua.

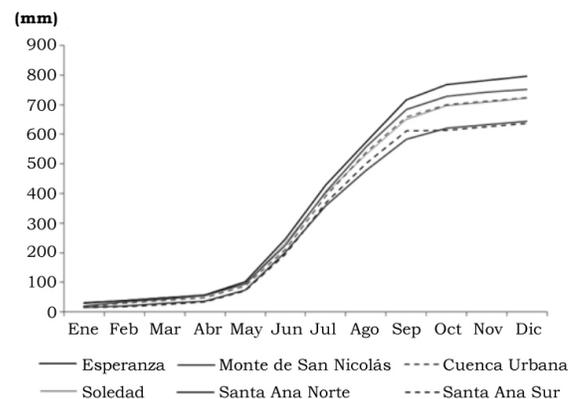


Figura 11. Curva masa (valor acumulado de la lámina de lluvia) en las cuencas de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 10 se observa la franja de humedad que parte de la zona serrana. Las cuencas Soledad, Esperanza y Monte de San Nicolás son las que más lluvia reciben. Hacia el centro y oriente de la cuenca río Guanajuato el régimen de lluvia tiene una zona de baja precipitación, en la zona de la estación El Pinillo. En la figura 10 se muestra una vez más un punto anómalo en la estación La Luz, valores bajos de lluvia en altitudes altas. Este tipo de fenómenos de poca lluvia en zona de montaña serán más frecuentes debido al cambio climático (IPCC, 2014).

En la figura 11 se observa la lluvia acumulada, en los meses de verano, junio-septiembre, se levanta la gráfica. En esta figura se muestra que la cuenca Urbana y cuenca Soledad tienen valores muy cercanos de lluvia esperada.

En la figura 12 se grafica la variación espacial de la magnitud de la evaporación normal sobre la cuenca del río Guanajuato. En la tabla 6 está el resumen de los valores medios de lámina de lluvia (hp) acumulada anual y de evaporación (Ev) para cada cuenca. Las cuencas Santa Ana norte y Santa Ana sur son en las que menos lluvia se espera. Los valores de Ev son altos y corresponden a valores sobre espejo de agua. En la figura 12 se observa cómo las cuencas de estudio son las más reguladas, a partir de la zona urbana y hacia el sur y oriente aumenta de manera considerada a Ev.

Los fenómenos hidrometeorológicos ligados a la fisiográfica son de interés para discutir asuntos de riesgo y planeación urbana. En la figura 13 se muestra la variación espacial de la cantidad de días donde se registró lluvia sobre la cuenca del río Guanajuato. La distribución de la lluvia y el número de días con lluvia es muy parecido, se registra mayor número de días con lluvia en la sierra, estación Santa Rosa.

En la figura 14 se ilustra la variación espacial de los días registrados con precipitación de granizo sobre la cuenca del río Guanajuato. Asimismo, en la tabla 7 aparece el resumen de los valores medios de la cantidad de días que registraron lluvia o la cantidad de días en los que se registró precipitación de granizo sobre las cuencas.

Debido a que las tormentas con granizo y las tormentas eléctricas son fenómenos muy locales, se ofrecen mapas usando *Buffers* de 1 km y 5 km de radio. Coincide ambos mapas en la actividad alta de la zona sur El Bajío y la ciudad de Guanajuato con mayor número de días de estos fenómenos. Abril es el mes con mayores días de granizo, las temperaturas altas generan tormentas eléctricas en los meses de mayo y agosto.

Tabla 6.
Valor normal medio de la lluvia acumulada anual y de la evaporación.

Cuenca	hp (mm)	Ev (mm)
Esperanza	750	1850
Soledad	675	1850
Santa Ana norte	616	1866
Santa Ana sur	625	1900
Monte San Nicolás	752	1830
Urbana Guanajuato	722	1855

Fuente: Elaboración propia.

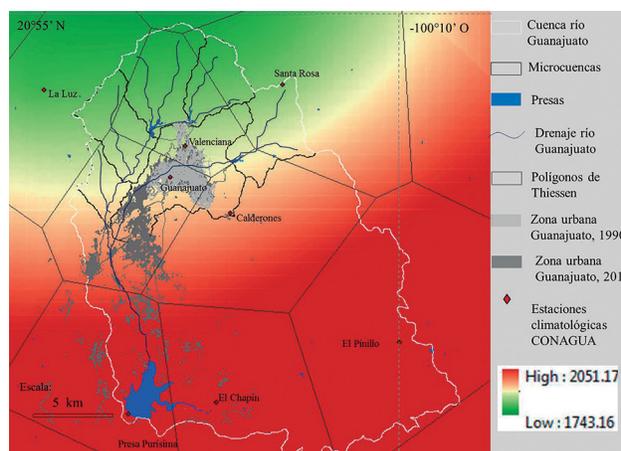


Figura 12. Evaporación normal (mm) sobre el área de la cuenca del río Guanajuato.
Fuente: Elaboración propia con información de Conagua.

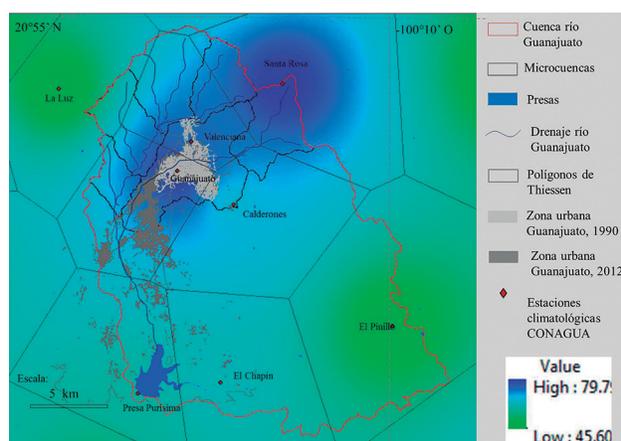


Figura 13. Distribución sobre el área de la cuenca del río Guanajuato de la cantidad promedio de días con lluvia.
Fuente: Elaboración propia con información de Conagua.

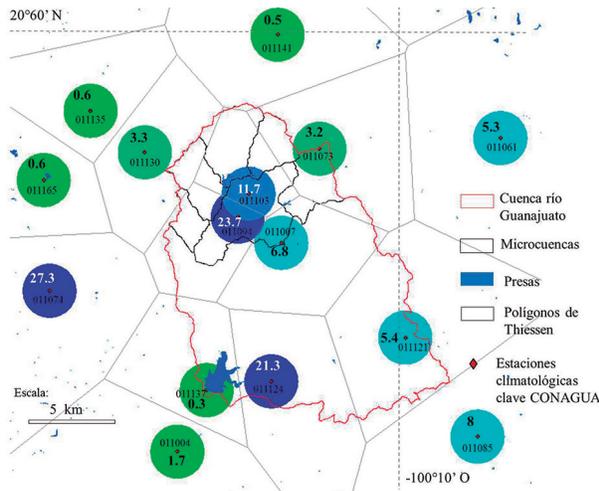


Figura 14. Distribución sobre el área de la cuenca del río Guanajuato de la cantidad de días con granizo.
Fuente: Elaboración propia con información de Conagua.

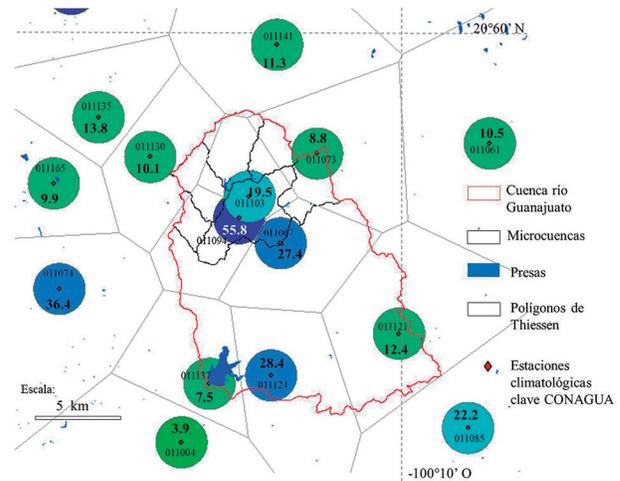


Figura 16. Distribución sobre el área de la cuenca del río Guanajuato de la cantidad de días con presencia de niebla.
Fuente: Elaboración propia con información de Conagua.

Tabla 7.

Cantidad promedio de días con presencia de lluvia o con precipitación de granizo sobre las cuencas de estudio.

Cuenca	Cantidad de días con lluvia	Cantidad de días con granizo
Esperanza	68.7	12.5
Soledad	65	12.5
Santa Ana norte	66.7	18.8
Santa Ana sur	67.5	22.5
Monte San Nicolás	72.4	13.2
Urbana Gto.	69.1	24.1

Fuente: Elaboración propia.

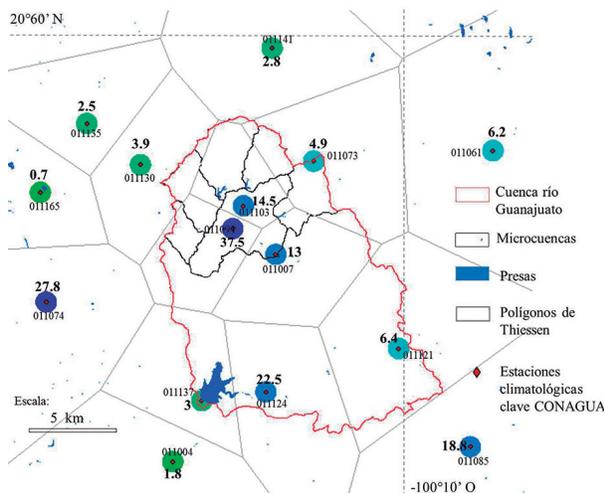


Figura 15. Distribución sobre el área de la cuenca del río Guanajuato de la cantidad de días con presencia de tormentas eléctricas.
Fuente: Elaboración propia con información de Conagua.

La figura 15 muestra la variación espacial de la cantidad de días con presencia de tormentas eléctricas sobre la cuenca del río Guanajuato. En la figura 16 se evidencia la distribución espacial de la cantidad promedio de días en los que se registró niebla. Las tormentas eléctricas con mayor frecuencia se advierten en la zona de la ciudad de Guanajuato, 37.5 días.

Asimismo, se presenta la distribución del número de días con niebla; este hidrometeoro, debido a la densidad, se genera en zonas bajas de los valles. En El Bajío se advierten nieblas que se mezclan con contaminación y genera bruma muy densa en las mañanas de otoño e invierno.

Al estar analizando este tipo de hidrometeoros se observa el escaso monitoreo climatológico, la influencia de las estaciones es muy baja. La zona central del río Guanajuato es la parte con más baja densidad de información.

En la tabla 8 se muestran los valores medios de la cantidad de días en los que ocurrió la presencia de tormentas eléctricas o niebla. La zona urbana es donde se esperan mayores días de tormentas eléctricas y niebla, mientras que en la zona de montaña estos valores son más bajos.

Por otra parte, la tabla 9 contiene el valor de la relación r^2 entre temperatura-elevación del terreno sobre el nivel del mar y lluvia-elevación del terreno sobre el nivel del mar. Este análisis se hizo debido a la condición

de continentalidad que tiene la cuenca Guanajuato, ya que existen en promedio 420 km de distancia hacia ambos mares.

En la tabla 10 se enlistan los valores promedio de volumen de agua captado en la cuenca, calculados con base en la cantidad de lámina de lluvia medio anual; este dato es importante para conocer el régimen hidrológico de las cuencas, ya que se proporciona datos de la manera en que se distribuye la lluvia. La región en estudio destaca por la cantidad de lluvia que recibe, debido a que son cuencas de cabecera, por esto se les define como el primer ingreso de agua natural al sistema hidrológico. En la tabla 11 se muestra el resumen de la clasificación de cada subcuenca con base en la magnitud del índice de sequía.

Además, en estas cuencas de estudio existen embalses y ecosistemas diversos que dependen de la cantidad de lluvia. Aunque actualmente sólo 40% de la población de Guanajuato se abastece de agua superficial, es necesario conservar y restaurar estas cuencas altas, pues están interconectadas con los acuíferos locales y regionales que abastecen de agua subterránea a la población, industria y agricultura.

Debido a la superficie, se observa que la cuenca Urbana y cuenca Monte de San Nicolás son las que más agua esperan desde la lluvia. Esto incrementa el riesgo de avenidas máximas, erosión acelerada e inundaciones en las zonas bajas de la ciudad.

Los datos sobre índices de sequía que se presentan en las figura 17 y tablas 11 y 12 reflejan la estabilidad de clima, a pesar de ser semiárido no se presenta condición de sequía extrema.

Tabla 8.
Cantidad promedio de días con presencia de lluvia o granizo en las cuencas de estudio.

Cuenca	Cantidad de días con tormentas eléctricas	Cantidad de días con niebla
Esperanza	10.1	14.3
Soledad	12.3	16.5
Santa Ana norte	22.7	15.6
Santa Ana sur	28.9	49.3
Monte San Nicolás	9.9	18.4
Urbana Gto.	27.5	46.2

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9.
R² obtenido entre la relación temperatura-elevación del terreno sobre el nivel del mar y lluvia-elevación del terreno sobre el nivel del mar.

Estaciones	Temperatura máxima	Temperatura mínima	Temperatura media	Lluvia
Total (17)	0.63	0.51	0.80	0.12
Dentro de la cuenca (7)	0.84	0.55	0.79	0.08

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10.
Volumen de agua de la lluvia media mensual estimada sobre las cuencas en estudio.

Tiempo [mes]	Esperanza	Soledad	Santa Ana norte	Santa Ana sur	Monte de San Nicolás	Cuenca Urbana
	Vol. (Mm³)					
Enero	0.52	0.94	0.34	0.14	0.48	0.77
Febrero	0.14	0.19	0.10	0.03	0.29	0.54
Marzo	0.19	0.25	0.16	0.07	0.21	0.37
Abril	0.18	0.24	0.16	0.08	0.26	0.45
Mayo	0.76	1.12	0.78	0.37	0.96	1.79
Junio	2.55	3.88	2.69	1.22	2.99	5.50
Julio	3.17	4.66	3.30	1.71	4.15	7.97
Agosto	2.56	3.69	2.52	1.33	3.46	6.48
Septiembre	2.46	3.38	2.22	1.08	2.92	5.38
Octubre	0.90	1.28	0.76	0.02	1.03	1.84
Noviembre	0.27	0.38	0.24	0.11	0.31	0.55
Diciembre	0.24	0.38	0.26	0.12	0.25	0.44
Volumen medio anual (Mm ³)	13.92	20.38	13.53	6.28	17.32	32.07

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11.
 Índice de sequía normal media en las cuencas de estudio.

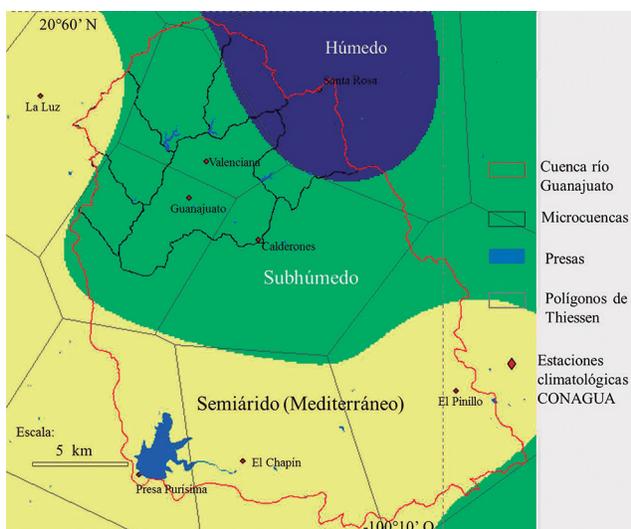
Cuenca	Valor	Condición
Esperanza	4.0	Moderadamente húmedo
Soledad	3.7	Poco húmedo
Santa Ana norte	3.3	Poco húmedo
Santa Ana sur	3.1	Poco húmedo
Monte de San Nicolás	4.1	Húmedo
Urbana Gto.	3.4	Poco húmedo

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12.
 Índice de aridez normal media en la cuenca del río Guanajuato.

Cuenca	Valor	Condición
Esperanza	40.2	Húmedo
Soledad	22.4	Subhúmedo
Santa Ana norte	15.3	Subhúmedo
Santa Ana sur	18.5	Subhúmedo
Monte de San Nicolás	38.9	Húmedo
Urbana Gto.	25.6	Subhúmedo

Fuente: Elaboración propia.


Figura 17. Índice de aridez de Martonne (1935) para la cuenca del río Guanajuato.
 Fuente: Elaboración propia con información de Conagua.

Índice de aridez de Martonne (1935)

En la tabla 12 y figura 17 está la lista de clasificación obtenida para la cuenca del río Guanajuato con base en la magnitud del índice de aridez para las cuencas en estudio. En este índice propuesto se evalúan los valores de lluvia y temperatura mensual. A pesar de que el índice de aridez es un índice convencional, su fácil aplicación y congruencia lo hacen un índice muy usado (Díaz *et al.*, 2011). En este análisis de la cuenca río Guanajuato los valores de índice de aridez obtenidos clasifican a la cuenca del río Guanajuato como subhúmeda. La vegetación leñosa y la altitud media favorecen para que se presente las condiciones de aridez (tabla 12).

DISCUSIÓN

Hidrografía

En la cuenca del río Guanajuato existen las condiciones que favorecen una producción rápida y cuantiosa de flujo superficial (urbanización y erosión), toda vez que una lluvia ocurre, porque la geometría de terreno tiene una inclinación de la pendiente de moderada a fuerte, lo que influye para que la velocidad del agua sea muy rápida (1.2 m/s – 2.3 m/s).

El tiempo que le lleva al flujo para salir del sistema es breve en la cuenca Santa Ana sur, lento en La Soledad y moderado en el resto. Por ello se considera que la vulnerabilidad de la población ante episodios de avenidas máximas se incrementa cuando se introducen cambios en el uso del suelo por actividades como la minería, sobrepastoreo, deforestación, agricultura y vialidades terrestres. Las cuencas están reguladas térmicamente por la lluvia y vegetación, aunque se presenten condiciones de oscilación térmica grandes; la humedad de nieblas, granizo y número de días con lluvia ayuda a que se mantenga un ambiente subhúmedo, y con ello un régimen hidrológico en equilibrio.

Variación espacial de eventos climáticos

La SG sirve para conservar el clima local húmedo (> 800 mm/año) y fresco (14 °C media anual) en su porción norte, generando una sombra pluviométrica hacia el sur, vertiente al río Guanajuato.

Los valores promedio de la temperatura mínima oscilan en 1.8 °C en toda la cobertura del sistema hidrológico; en cambio, la oscilación en la temperatura

máxima media tiene mayor variación en el mismo territorio de 7 °C. Es probable que se deba a la termodinámica que produce el calentamiento y enfriamiento de la superficie del terreno. La zona urbana se calienta rápido y se enfría lento comparado con el bosque que se enfría más rápido, pero se calienta lento.

Se propone que se debe considerar como un indicador de conservación ecológica y equilibrio climático el intervalo de oscilación entre la temperatura del aire máxima y mínima. Como ejemplo está la cuenca La Esperanza, cuya oscilación diurna de la temperatura (ODT) es 9.5 °C y en la cuenca Santana sur es 14.7 °C. Estas variaciones están influenciadas por la elevación y vegetación.

De las diecisiete estaciones utilizadas para el cálculo de isoyetas, destaca la estación Santa Rosa Mineral porque registró la lámina de lluvia acumulada media anual más alta: una normal de 843 mm. Esta condición de humedad es porque existe mayor densidad de vegetación leñosa en la cuenca La Esperanza, debido a que es área natural protegida y contiene trece diferentes tipos de encino (*Quercus* sp.) (Martínez-Cruz, Téllez & Ibarra, 2009); favoreciendo el desarrollo de suelo y la mejora de la capacidad de infiltración. En la parte noroeste de la cuenca ESS se observó un cambio en la cantidad acumulada anual de lluvia, ya que la cuenca Santa Ana norte tiene una altitud media mayor que la cuenca Santa Ana sur.

La cuenca con mayor cantidad de lluvia acumulada medio anual es La Esperanza, con 796.4 mm, y la de menor valor acumulado es Santa Ana sur, con 636.6 mm. La cuenca Urbana y cuenca La Soledad tuvieron similar valor de precipitación, 722.7 mm y 722.6 mm, respectivamente. La cuenca Monte de San Nicolás registró mayor acumulación de lámina de lluvia por la influencia de humedad que proviene del Golfo de México, la vegetación boscosa y el efecto de sombra pluviométrica, la lluvia media anual de 752.8 mm. En toda la cuenca, la precipitación media anual oscila entre 640 mm a 800 mm, con un extremo en los registros de 300 mm a 2400 mm, considerando un periodo de retorno de 30 años.

El gradiente topográfico total en la cuenca río Guanajuato es de 900 m, entre los 2800 msnm a 1900 msnm. Del hietograma y la curva de lluvia acumulada elaborada para este sistema hidrológico, resaltan los meses de junio, julio y agosto como los más lluviosos. A esto se agrega el dominio que ejerce la topografía del terreno en la cantidad de lluvia captada, porque en la porción noroeste de la cuenca del río Guanajuato,

dominio de la cuenca ESS, se encontró un gradiente de lluvia acumulada de 24 mm por cada km de distancia lineal. En la zona de los lomeríos bajos, ubicado en la salida de la cuenca del río Guanajuato, el gradiente de la lluvia es de 3.5 mm por cada kilómetro lineal.

Se identificaron como los meses más cálidos abril y mayo, mientras que enero y diciembre son los más fríos. Los valores extremos térmicos obtenidos son -7 °C hasta -4 °C en la región. La temperatura máxima oscila en 7 °C; la temperatura mínima oscila en 5.5 °C.

La evaporación registró una distribución espacial uniforme en la porción de los cerros altos de la cuenca del río Guanajuato, es decir al norte y noreste, mientras que en la parte de lomeríos bajos y planicie ondulada se incrementó la saturación de vapor de agua en el aire. Se identificó que hay una relación directa entre la cantidad de evaporación con las condiciones fisiográficas y del uso de suelo, los valores más altos se ubican en la planicie y lomeríos bajos; además, se verificó la influencia que ejerce la proximidad de cuerpos de agua, como la presa La Purísima.

Se identificaron dos áreas de la cuenca con base en el promedio de días con lluvia: uno localizado al centro-norte del área de estudio destacando La Esperanza, las lluvias son abundantes (del 20% al 25% de los días del año con lluvia), y otro al sur-sureste, donde escasean los eventos de lluvia (del 10% al 12% de días del año con lluvia). Influye la barrera orográfica de la SG y el dominio de la presencia de vegetación tipo bosque de encinos (Martínez *et al.*, 2009). Además de la presencia de la fosa tectónica La Saucedá, que interrumpe a la SG en la porción sur.

El número de días con lluvia se asocia con eventos de origen convectivo, que provocan fuertes precipitaciones, e intensifican el peligro de provocar deslaves, inundaciones y erosión del suelo. Los registros mostraron una cantidad mayor de días con granizo en la coincidencia y proximidad de la ciudad de Guanajuato y en el sureste, es decir en la cercanía de la presa La Purísima. Esto indica que para prevenir riesgos hidrológicos en el ámbito urbano es importante tener una red de monitoreo de estaciones climatológicas densificada.

Existe un efecto convectivo provocado por la ruptura de la pendiente y de la elevación que ocurre entre la sierra y los lomeríos bajos con la planicie ondulada ubicada en la salida de la cuenca; esto muestra que dentro de la cuenca Urbana y Santa Ana sur se registró la mayor cantidad de tormentas eléctricas, presencia de niebla y caída de granizo.

Es muy marcado el efecto de la orografía, el uso del suelo y la cobertura vegetal con la cantidad de lluvia registrada. La correlación (r^2) entre lámina de lluvia acumulada y el gradiente térmico-elevación oscila entre 0.71 a 0.93. No se obtuvo relación directa entre la lluvia total anual con la ubicación geográfica de la estación climatológica analizada (tabla 9), como lo señala el $r^2 = 0.07$. La relación entre la elevación del terreno y la longitud del sitio (de este a oeste) es $r^2 = 0.22$; y la lluvia con la latitud (sur a norte) $r^2 = 0.19$.

Índice de aridez de Martonne (1935)

Con base en el índice de sequía normal en la cuenca del río Guanajuato se encontraron magnitudes bajas en la zona norte, donde aparecen cerros con las elevaciones más altas; esto genera mayor efecto de la barrera orográfica al presentar mayor humedad ambiental, menor promedio en la temperatura máxima y más cantidad de días con presencia de lluvia al año.

La cuenca Santana, con una escasa cobertura vegetal arbórea predominando pastizal y matorral, presenta erosión intensa del suelo en forma de cárcavas, sin embargo, con base en los datos registrados, se le clasificó como un clima subhúmedo. Mientras que en el sur de la cuenca del río Guanajuato se identificó un clima semiárido (mediterráneo) y al noreste se obtuvo la porción con mayor elevación y un clima húmedo, típico de la mesa del centro (Vidal, 2005).

Destaca la cantidad de territorio cubierto por la transición de clima subhúmedo a semiárido en la cuenca del río Guanajuato (figura 6), porque esto influye en el volumen de agua de lluvia disponible para el abasto de agua potable a las personas, debido a que se acumula en las presas. Los bosques de encino ubicados en la porción de la superficie cumbre de los cerros altos reciben mayor lluvia en el verano.

La intensidad del intemperismo de los materiales con base en las condiciones de temperatura y presión atmosférica (figura 7) señala que la región en estudio se considera subhúmeda reflejado en una tasa de intemperismo débil a moderado. El tipo de clima y la tasa de intemperismo de los materiales se vinculan con la altitud; sin embargo, en climas locales no ocurre esta relación porque es escasa la cantidad de estaciones de monitoreo climático, o es grande la influencia que ejercen las actividades antropogénicas debido a que modifican al medio natural y afectan negativamente al clima. La temperatura se relaciona mejor con la altitud a diferencia de la precipitación.

El clima tomó un rumbo de dirección preferente noreste-sureste (NE-SE), oscilando de tipo húmedo a seco. Se identificó en el trayecto noroeste-sureste (NO-SE) una anomalía en la cantidad de evaporación y del valor de la temperatura mínima, y la lámina de lluvia no coincide con algún patrón de distribución.

En el área de las cuencas La Esperanza y La Soledad se recibe mayor cantidad de agua por lluvia. Es importante porque contiene dos presas de las que se utiliza el agua para potabilizarla y dotarla al 40% de habitantes de la ciudad de Guanajuato (171 000 habitantes en el 2010). El gradiente climático es propio de una región subhúmeda a semiárida, la lluvia media anual oscila en 359 mm en una distancia de 14.9 km.

Monte de San Nicolás (MSN) registra lluvia con mayor intensidad al año, la cual oscila de 60 mm/h a 85 mm/h. Es semejante a lo que se obtuvo en la subcuenca La Esperanza. Es mayor la densidad de vegetación en cotas superiores a los 2300 msnsm. En los cerros más altos de esta cuenca se obtuvo la cantidad acumulada de lluvia anual más grande de 846 mm. Esta situación es fundamental en términos de riesgo, pues el agua que escurre de esta cuenca atraviesa la zona urbana de Guanajuato. La ciudad de Guanajuato ha estado sujeta a más de veinte inundaciones que han marcado la memoria histórica debido a las pérdidas materiales y humanas, desde 1710 hasta la fecha. La mayoría de estas inundaciones se producen por la lluvia y saturación del suelo en la parte alta y se desatan en zonas bajas.

Cuenca Urbana Guanajuato (CUG) contiene el depósito de una cantidad aproximada de 48 millones de toneladas de residuos mineros (Ramos *et al.*, 2013). Existe mayor cantidad de tormentas convectivas en la zona de la ciudad, la presencia de días con granizo y tormentas eléctricas afecta las actividades productivas, sobre todo turismo y minería. Se estima que influyen los cerros locales para que se presenten lluvias repentinas; los cerros como Sirena, Los Picachos y La Bufa favorecen nublados y vientos fuertes todo el año. La oscilación de la temperatura mínima se reduce en las planicies onduladas ubicadas a la salida de la cuenca. El flujo base que circula dentro del cauce del río Guanajuato es agua residual de origen urbano. El crecimiento de la extensión de la frontera urbana en esta cuenca es rápido e intenso. Esto hace que el escurrimiento superficial se incremente, se pierda infiltración, se acelere la erosión y exista un caos vial en las calles bajas de la ciudad de Guanajuato debido al taponamiento del alcantarillado urbano (Woitrin *et al.*, 2015).

CONCLUSIONES

La cuenca del río Guanajuato tiene un comportamiento climático controlado por factores externos e internos en los que sobresale la influencia de la fisiografía, la cercanía a las costas y el uso del suelo antropogénico. La mayor parte de la lluvia proviene de la actividad ciclónica del océano Atlántico. Coincide con lo que Jáuregui (2003) describe para esta zona. En esta región del país hay un déficit en el monitoreo del clima e intemperismo de los materiales; sin embargo, con la información que existe se obtuvo la distribución espacial de los principales variables y fenómenos climáticos.

En mapas e hietogramas se identificó la presencia de lluvias convectivas, reconocidas por su peligrosidad debido a que son precipitaciones muy intensas y repentinas (Cortez, 1999; Valdés *et al.*, 2005). El origen de esta humedad es la evapo-transpiración y por convección. El otro tipo de lluvia que domina en la cuenca del río Guanajuato es la de tipo orográfico por flujo de humedad de los océanos. Son lluvias uniformes, menos intensas, pero más frecuentes en zonas altas. En menor cantidad ocurre lluvia frontal o ciclónica que representa del 5% al 10% del total, sobre todo en invierno (<http://smn.cna.gob.mx>), generada por frentes fríos en el periodo de diciembre a marzo. La precipitación de invierno interviene en los planes y ciclos agrícolas; por ejemplo, en 2010, la lluvia invernal representó 35% de la lluvia anual (Servicio Meteorológico Nacional [SMN], 2014).

El análisis de periodo de retorno señala que en los últimos cuarenta años ocurrieron eventos extraordinarios asociados a un retorno de 10 000 años, como es la lluvia de 1976 en Santa Rosa Mineral, y la de febrero de 2010, que superó el valor normalmente estimado en 2000%.

El análisis climático con base en la cuenca hidrográfica es útil para derivar estrategias de abasto y distribución del agua, porque junto a las condiciones del terreno se regula la temperatura y la forma en que el agua se almacena en la cuenca.

Se requiere de mayor instrumentación para el monitoreo de las variables climáticas. La orografía influye en la lámina de lluvia, en la regulación térmica y en la energía del flujo hídrico. Se requiere implementar la integración de datos a nivel mesoescala y a nivel local para describir puntualmente el régimen de lluvia y los riesgos asociado con la poca cantidad o al exceso de lluvia (eventos extremos de sequía y frentes fríos). El cambio climático y la presencia de eventos hidrometeorológicos extremos requieren de monitoreo detalla-

do para conocer con precisión el volumen de agua que entra por lluvia (IPCC, 2014), la variación espacial de la misma, la clasificación de los fenómenos con los que se asocia y los atributos de terreno que interactúan con la variabilidad climática.

REFERENCIAS

- Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23(1), 1-26.
- Christein, A., & Voogt, R. (2004). Energy and radiation balance of a central European city. *International Journal of Climatology*, 24(11), 1395-1421.
- Colunga, M. L., Cambrón-Sandoval, V. H., Suzán-Azpiri, H., Guevara-Escobar, A., & Luna-Soria, H. (2015). The role of urban vegetation in temperature and heat island effects in Querétaro city, Mexico. *Atmósfera*, 28(3), 205-218.
- Contreras, A., Salas, J., Velázquez, G., & Quevedo, H. (2008). Determinación de la isla de calor urbano en Ciudad Juárez mediante programa de cómputo. *Culcyt, Clima Urbano*, 5(26), 3-16.
- Cortez, M. (1999). Marcha anual de la actividad convectiva en México. *Atmósfera*, 12(2), 101-110.
- Davis, J. C. (1986). *Statistics and Data Analysis in Geology* (2a Ed.) (pp. 646). New York: John Wiley & Sons.
- Declaratoria del área natural protegida "Cuenca La Esperanza" (6 de marzo de 1998). *Periodico Oficial*. Gobierno del Estado Poder Ejecutivo.
- Declaratoria del área natural protegida "Cuenca La Soledad" (18 de agosto de 2006). *Periodico Oficial*. Gobierno del Estado Poder Ejecutivo.
- Díaz, G., Sánchez, I., Guajardo, R. A., Del Ángel, A., Ruiz, A., Medina, G., & Ibarra, D. (2011). Mapeo del índice de aridez y su distribución poblacional en México. *Revista Chapingo. Ciencias Forestales y del Ambiente*, XVII, 267-275.
- Garduño, R. (1999). Aportaciones mexicanas al estudio del clima. *Geofísica, Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH)*, 51, 69-89.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report* (151 pp.). Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Core Writing Team, R.K. Pachauri & L.A. Meyer [eds.]). Geneva, Switzerland: IPCC.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (2010). *Estadísticas Población y Vivienda Guanajuato México*. Recuperado de <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?e=11>
- Izquierdo, T., & Márquez, A. (2006). Comparación de métodos de interpolación para la realización de mapas de precipitación para el acuífero de Icod-Cañadas (Tenerife, Islas Canarias). *Gaceta*, 40, 307-310.
- Jáuregui, E. (1997). Heat island development in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 31(22), 3821-3831.

- Jáuregui, E. (2003). Algunos conceptos modernos sobre la circulación general de la atmósfera. *Boletín del Instituto de Geografía*, 50, 121-143.
- Köppen, W. (1948). *Climatología (versión directa de Grundriss der Klimatologie 1923, 1931 por Hendrichs Pérez)*. México- Buenos Aires: Fondo de Cultura Económica.
- Lugo, H. J. I. (1990). Relieve de la República Mexicana. *Ciencias Geológicas*, 9(1), 81-111.
- Maderey, R., & Carrillo, J. (2005). *El recurso agua en México. Un análisis geográfico*. México: Instituto de Geografía-UNAM.
- Martínez, J. (2014). Estudio de la isla de calor de la ciudad de Alicante. *Investigaciones Geográficas*, 62, 83-99.
- Martínez Cruz, J., Tellez, O., & Ibarra, G. (2009). Estructura de los encinares de la Sierra de Santa Rosa, Guanajuato, México. *Revista Mexicana de la Biodiversidad*, 80(1)145-156.
- Martonne, E. (1935). Problèmes des régions arides sudaméricanas. *Annales de Géographie*, 247, 1-27.
- Mendoza, M. E., Bocco, G., López, E., & Bravo, M. (2007). Tendencias recientes de las superficies ocupadas por el lago de Cuitzeo. Un enfoque basado en percepción remota, sistemas de información geográfica y análisis estadístico. *Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 64, 43-62.
- Mosiño, P. A., & García, E. (1974). The climate of Mexico. World survey of climatology, in Bryson, R. A. & F. K. Hare (eds.), *Climates of North America*, vol. II, pp. 345-404. London: Elsevier.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM) (2010). *WMO Bulletin*. Recuperado de http://www.wmo.int/pages/themes/weather/index_en.html
- Pavia, E., Graef, F., & Reyes, J. (2006). PDO-ENSO effects in the climate of México. *Journal of Climate*, 19, 6433-6438.
- Peralta, A. R., & Barba, L. R. (2008). Temporal and spatial behavior of temperature and precipitation during the canicula (midsummer drought) under El Niño conditions in central Mexico. *Atmósfera*, 21(3), 265-280.
- Poreh, M. (1996). Investigation of heat islands using small scale models. *Atmospheric Environment*, 30(3), 467-474.
- Ramos, Y. R., Muñoz, A. H., Barrientos, E. Y., Huerta, I. R., Wrobel, K., & Wrobel, K. (2013). Natural Decrease of Dissolved Arsenic in a Small Stream Receiving Drainages of Abandoned Silver Mines in Guanajuato, Mexico. *Environmental Contamination and Toxicology*, 91(5), 539-544. doi: 10.1007/s00128-013-1091-7
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (2014). *Boletín informativo*. Recuperado de http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=103&Itemid=80
- Valdés, A., Cortez, M., & Pastrana, J. J. (2005). Un estudio explorativo de los sistemas convectivos de mesoescala en México. *Investigaciones Geográficas*, (56), 26-42.
- Vidal, R. (2005). *Las regiones climáticas de México 1.2.2. I Textos Monográficos, 2 Naturaleza*. Colección Temas Selectos de Geografía. México: Instituto de Geografía, Universidad Autónoma de México, 10, pp. 209.
- Yaoping, C., Jiyuan, L., Yunfeng, H., Junbang, W., & Wenhui, K. (2012). Modeling the radiation balance of different urban underlying surfaces. *Chinese Science Bulletin*, 57(9), 1046-1054.
- Woitrin-Bibot, E., Martínez-Arredondo, J. C., & Ramos-Arroyo, Y. R. (2015). Crecimiento urbano e incremento de riesgos hidrológicos en la ciudad de Guanajuato, México. *L'Ordinaire des Amériques* 218. Recuperado de <http://orda.revues.org/1937>