

Índices climatológicos regionales para la Sierra Gorda de Guanajuato

Regional climatic indices for the Sierra Gorda of Guanajuato

J. C. Martínez Arredondo*, V. M. Ortega-Chávez**, Y. R. Ramos Arroyo**

RESUMEN

Se realizó una clasificación del clima en la región Sierra Gorda de Guanajuato (SGG), analizando información de 48 estaciones climatológicas disponibles y las características topográficas de la zona. El factor continental (distancia a la costa) y la sombra orográfica de la Sierra Madre Oriental son los factores principales que influyen en el clima de la SGG. Se cartografiaron las variables que influyen en el régimen climático, tales como temperatura mínima, temperatura máxima, precipitación y evaporación potencial. A partir de estos mapas se exploran otras clasificaciones climáticas que inciden en el manejo integral de cuencas, por ejemplo los índices tanto de sequía como de aridez. Los climas más frecuentes, según la elevación sobre el nivel del mar y la distribución de lluvia en invierno, son el semicálido seco y el templado subhúmedo; además, el régimen de lluvia en la SGG es dominado por una sequía intraestival, conocida como "canícula". Estos escenarios climáticos ubican a la SGG en una región vulnerable a los efectos del clima seco, sin embargo, en la zona se presenta un régimen hidrológico húmedo debido a las descargas de agua subterránea (acuiferos fracturados y cársticos). El mayor volumen de agua de lluvia deriva de los ciclones que entran por el Golfo de México en los meses de septiembre y octubre. Con este análisis se pretende incidir en una estrategia de manejo integral del agua, con el objetivo de ser menos vulnerable a las variaciones climáticas y a la presencia de fenómenos meteorológicos extremos.

ABSTRACT

We performed a climate classification in the Sierra Gorda of Guanajuato (SGG) region, analyzing available data from 48 climatological stations as well as topographic characteristics of the area. The continental factor (distance to the coast) and the orographic shadow effect of Sierra Madre Oriental are the main factors that influence the climate of the SGG. The variables that control climate were mapped, such as minimum temperature, maximum temperature, precipitation and potential evaporation. From resultant maps, we explored other climatic classifications related to watershed management, such as drought and aridity indices. According to elevation above sea level and winter rainfall distribution, the more frequent climates are dry semi-warm and subhumid temperate. Additionally the rainfall regime in the SGG is dominated by drought at midsummer heat in period know in the area as "canícula". These climate scenarios place the SGG in a region vulnerable to the effects of dry climate. However, the area has a wet hydrological regime due to groundwater discharge (from fractured and karstic aquifers). The largest volume of rainwater comes from cyclones in the Gulf of Mexico during September and October. This study aims to impact the development of an integral strategy to improve water management, in order to diminish vulnerability to climatic variations and the presence of extreme meteorological events.

Recibido: 23 de julio de 2013
Aceptado: 3 de diciembre de 2013

Palabras clave:
Sierra Gorda de Guanajuato; variabilidad climática; índice de sequía; canícula; vulnerabilidad.

Keywords:
Sierra Gorda of Guanajuato; climate variability; drought index; midsummer heat; vulnerability.

INTRODUCCIÓN

El territorio de la Sierra Gorda de Guanajuato (SGG) destaca por su importancia en la generación de flujos hídricos superficiales que alimentan al río Pánuco (RH26), principalmente por los ríos Tamuín y Moctezuma. Estos ríos

* División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato. Av. Juárez 77, Col. Centro, C.P. 36000.

** Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato. Av. Juárez 77, Col. Centro, C.P. 36000. Tel.: (473) 7341246. Correo electrónico: yanramos@ugto.mx

mantienen un régimen hidrológico capaz de abastecer a poblaciones rurales y urbanas de los estados de Guanajuato, Querétaro, San Luis Potosí, Hidalgo y Veracruz.

Los rasgos fisiográficos, climáticos y de cobertura vegetal del territorio de la SGG favorecen una gran variabilidad climática. Conocer el volumen de lluvia, así como su variación espacial y temporal, es fundamental para desarrollar estrategias de abasto seguro a la población y evaluar condiciones de riesgos hidrológicos.

Para cuantificar el total de agua de lluvia que ingresa a la SGG y definir su destino como flujo superficial y/o subterráneo es necesario identificar los mecanismos regulatorios del clima regional y cómo intervienen en los intercambios de masa y energía.

En el control de las variables climáticas se requiere contar con datos puntuales y detallados en el espacio

y tiempo; sin embargo, en la SGG existe poca instrumentación, lo que se refleja con la baja disponibilidad de información. Ello provoca que la información hidrológica existente sea poco precisa, lo que no permite considerar los mecanismos del comportamiento del clima. Es necesario conocer los patrones de circulación de la humedad y el viento, vinculados con la cobertura vegetal y con los cambios en el uso del suelo.

La SGG es zona de transición de provincias geológicas y fisiográficas, y funciona como un parteaguas continental y cabecera de dos sistemas hidrológicos (figura 1). Los escurrimientos que nacen en su ladera oeste y noroeste escurren al río Lerma, que descarga en el Pacífico, y las laderas tanto del sureste como del este alimentan al río Pánuco, que escurra al Golfo de México. Las rocas de la Mesa Central, predominantemente volcánicas, sobreyacen la plataforma de calizas de la formación El Doctor, identificada como subpro-

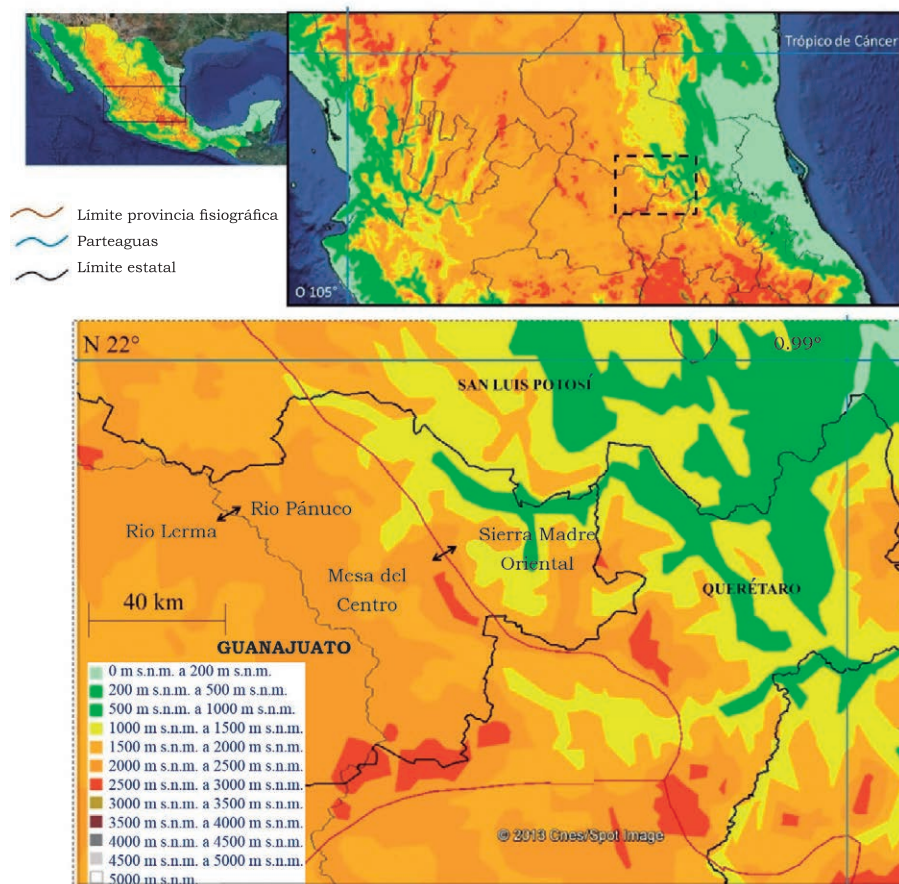


Figura 1. Localización de la SGG y niveles de altitud.
Fuente: Elaboración propia con datos de la Comisión Nacional para la Biodiversidad (Conabio).

vincia de la Sierra Madre Oriental, conocida como Karst Huasteco (Servicio Geológico Mexicano [SGM], 2011).

Debido a la transición fisiográfica (Mesa del Centro y Sierra Madre Oriental), la SGG se ubica en los límites difusos de tres regiones climáticas del país (Vidal, 2005): región 4: norte, región 5: centro y región 7: Golfo de México.

Estas condiciones geográficas y orográficas generan un clima muy variable y cambios en distancias relativamente cortas. El régimen de lluvia está vinculado con la presencia de vientos alisios que vienen del noreste, ondas y tormentas tropicales en el Golfo de México (verano y otoño), frentes y “nortes” (invierno y primavera). Además, se encuentra en una región donde la canícula o sequía intraestival se presenta frecuentemente (Vidal, 2005).

Considerando que la franja climática en México, ubicada bajo el Trópico de Cáncer (paralelo 23° N) es controlada por la Zona de Convergencia Intertropical (ZCI), afecta el clima de la SGG de diferentes maneras a lo largo del año. En verano esta franja se posiciona más al norte del ecuador, mientras que en invierno se aleja hacia el sur (Conde, Estrada, Martínez, Sánchez & Gay, 2011; Vázquez, 2006).

Las regiones climáticas que más influencia tienen en la SGG es la región 5 y región 7, es decir, norte y Golfo de México. Los índices climáticos de la SGG son controlados por corrientes de humedad acarreada por vientos alisios del noreste, sistemas polares (frentes y nortes) y la canícula (Pineda, Carbajal & Medina, 2007). Estos eventos modifican el comportamiento de las variables climáticas a escala local por la presencia de fenómenos a mesoescala, como es El Niño. Incluso en las cuencas del noreste de México ocurre una relación directa entre variables del terreno y las climáticas, que se expresa en el incremento de la lámina de lluvia acumulada anual conforme la elevación del terreno asciende desde el nivel del mar. Ocurre una disminución en la lámina de lluvia acumulada cuando se interna el viento húmedo en el continente, es decir, cuando se aleja de la costa (Vázquez, 2006).

En la SGG se presentan diferentes tipos de clima que varían según su latitud y altitud; los posibles cambios en la temperatura global traerán como consecuencia que la evolución anual de temperatura y las oscilaciones térmicas sean poco predecibles. Lo anterior genera incertidumbre en el pronóstico del régimen de lluvias y de la cantidad de agua disponible. La zona boscosa de la Sierra Gorda de Querétaro (Sierra El Doctor) influye en esta región, debido a las masas de humedad que

entran por el Golfo de México (Hergt, Carrillo-Rivera, Morales-Manilla, Ángeles-Serrano, González-Abraham & Rosales-Lagarde, 2002).

Con las anomalías climáticas y la presencia de fenómenos meteorológicos extremos, el escenario de disponibilidad de agua para una población creciente es incierto (Gleick, 2010; Vörösmarty, Green, Salisbury & Lammers, 2008). La variación climática global está modificando los patrones de temperatura y lluvia, el efecto directo se comienza a reflejar en la calidad del agua (Gitay, Suárez & Watson, 2002; Hutjes *et al.*, 1998). Cuando la cantidad de lluvia disminuye en la superficie del terreno y en el subsuelo se incrementa la concentración de solutos (Bates, Kundzewicz, Wu & Palutikof, 2008), produciendo aguas cuya potabilización es costosa, pues se requiere de equipo e infraestructura modernos. Para definir con certeza los escenarios del recurso hídrico en la SGG se proponen indicadores climáticos regionales considerando el régimen de lluvia, evaporación, temperatura y el relieve del terreno. Con estos indicadores se desea plantear los riesgos para los medios de producción y su reflejo al afectar el nivel de bienestar de la población, como es la sequía prolongada y el exceso de lluvia (Conde *et al.*, 2011; Gleick, 2010; Bates *et al.*, 2008).

Los resultados de simulaciones realizadas para identificar los efectos de la variación climática en México (Conde *et al.*, 2011; Estrada, Martínez, Conde & Gay, 2012; Magaña & Caetano, 2007) muestran que para el 2025 todo el territorio mexicano tendrá una situación de riesgo alto. Sobre todo en el centro y norte de México se intensificarán estos riesgos traducidos en eventos extremos de lluvia y temperaturas y afectación en el abasto de agua para la población. La Mesa Central y la Sierra Madre Oriental ya se encontraban en una situación de riesgo desde el 2000. Sin embargo, estas simulaciones fueron a nivel continental y regional (celdas de 55 km x 55 km). Para estimar los riesgos que generan los fenómenos meteorológicos es necesario estudiar con detalle los efectos de la topografía local, la cercanía a la costa, la influencia de la vegetación y del uso de suelo.

Recientemente se construyó una presa de 80 millones de m³ sobre el río Santa María, que abastecerá a las ciudades de San Luis Potosí, San Miguel de Allende y Celaya. El régimen climático señala que no es viable la ubicación de un vaso de captación de estas dimensiones. El trasvase de cuencas, el cambio en el uso de agua y la retención del escurrimiento generan mayor afectación en cuencas pequeñas de latitudes medias (Björn, Jörg, Otfried & Gunnar, 2007).

El objetivo de este trabajo fue analizar los valores medios normales, promedios de 60 años de 1951 a 2010, de las variables climatológicas temperatura mínima, temperatura máxima, lluvia y evaporación potencial, con el fin de describir la variación espacio-temporal, la oscilación térmica y los diferentes tipos de clima en función de la elevación. También se presentan índices de sequía y aridez con el objeto de conocer la distribución de climas extremos. Este trabajo es el primer paso para evaluar el impacto del cambio climático en la hidrología de la SGG.

METODOLOGÍA

Se partió de la base de datos (precipitación, temperatura, evaporación) de las estaciones climatológicas convencionales operadas por la Comisión Nacional del Agua (Conagua); se utilizó el programa ERIC III® (Extractor Rápido de Información Climatológica) que fue generado en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

Se trazaron mapas de la variación regional del clima con las normales climatológicas disponibles (promedios del periodo de 1951 a 2010). Asimismo, se utilizó el Simulador de Flujos (SIATL) para conocer las características de las cuencas hidrográficas. Se analizaron en total 48 estaciones, 21 estaciones del estado

de Guanajuato, 13 del estado de Querétaro y 14 del estado de San Luis Potosí (tablas 1, 2 y 3). Se analizaron detalladamente ocho estaciones climatológicas del estado de Guanajuato que presentan canícula o sequía de verano.

Para conocer la distribución espacial de la lluvia y la temperatura se utilizaron herramientas de interpolación geoestadística (Vargas, Santos, Cárdenas & Obregón, 2011; Regalado, Ritter & Gómez, 2007; Serrano & Sánchez, 2002). Se trazaron isotermas e isoyetas con esta red de 48 estaciones.

Los mapas se generaron en la plataforma Arc MAP 10 y Surfer 8. El análisis geoestadístico utilizado fue el de Kriging lineal, ya que esta metodología considera la distribución espacial y temporal, y además se obtuvieron buenas correlaciones. Por otra parte, es el método más utilizado para derivar mapas de clima (Vargas *et al.*, 2011; Regalado *et al.*, 2007; Izquierdo & Márquez, 2006).

Para realizar un contraste a escala local se consultaron bases de datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), y con los promedios mensuales y anuales de 1951 a 2010 se construyeron climogramas con las normales climatológicas. Los mapas de la subregiones climáticas e índices de sequía se determinaron según Peralta, Barba, Magaña, Matthias

Table 1.

Estaciones climatológicas de Conagua en el estado de Guanajuato.

Núm.	Clave	Nombre	Longitud [°]	Latitud [°]	Altitud [m s.n.m.]
1	11015	Charcas San J. Iturbide	-100.333	21.133	2125
2	11015	Las Mesas, S. Luis de la Paz	-100.400	21.467	2290
3	11042	Los Rodriguez	-100.700	21.033	2000
4	11043	Lourdes, S. Luis de la Paz	-100.700	21.300	2013
5	11046	Minas de Maguey	-100.133	21.550	1000
6	11053	Pozos	-100.500	21.217	2203
7	11066	San José Iturbide	-100.400	21.000	1870
8	11068	San Luis de la Paz	-100.517	21.300	2020
9	11080	Villa Doctor Mora	-100.317	21.150	2125
10	11082	Victoria, Victoria	-100.217	21.217	1800
11	11083	Xichú, Xichú	-100.050	21.383	1310
12	11088	San José Iturbide	-100.383	21.000	1870
13	11093	San Miguel Allende	-100.750	20.917	1852
14	11111	Atarjea, Atarjea	-99.867	21.200	1430
15	11115	El Refugio	-100.450	21.467	2300
16	11118	San Miguel Allende	-100.750	20.917	1904
17	11119	Tierra Blanca	-100.150	21.100	1760
18	11144	El Charape	-100.417	20.900	2200
19	11155	Corral de Piedras	-100.583	20.967	2050
20	11161	El Vergel	-100.534	21.296	2060
21	11163	La Jaula	-100.750	21.517	2080

Fuente: Comisión Nacional del agua (Conagua) (2010).

Table 2.

Estaciones climatológicas de Conagua en el estado de Querétaro.

Núm.	Clave	Nombre	Longitud [°]	Latitud [°]	Altitud [m s.n.m.]
1	22002	Ayutla, Arroyo Seco	-99.590	21.365	996
2	22007	Jalpan, Jalpan (DGE)	-99.467	21.217	860
3	22008	Jalpan, Jalpan	-99.478	21.221	760
4	22012	Peñamiller	-99.814	21.055	1370
5	22016	San Joaquín	-99.565	20.916	2220
6	22028	Galindo	-99.689	21.548	1960
7	22036	Arroyo Seco	-99.689	21.548	990
8	22038	E.T.A. 317 Tolimán	-99.933	20.917	1520
9	22049	El Zamorano, Colón	-100.212	20.904	2590
10	22056	Higuerillas, Cadereyta	-99.763	20.914	1580
11	22049	A. de los Guillén,	-99.717	21.083	1370
12	22057	Peñamiller (DGE)	-99.800	21.050	1325
13	22069	Pinal de Amoles	-99.634	21.125	2500

Fuente: Conagua (2010).

Table 3.

Estaciones climatológicas de Conagua en el estado de San Luis Potosí.

Núm.	Clave	Nombre	Longitud [°]	Latitud [°]	Altitud [m s.n.m.]
1	24035	Lagunillas	-99.583	21.567	1390
2	24047	Ojo de Agua, Alaquines	-100.100	21.850	1775
3	24050	Paredes, Río Verde	-100.000	21.717	1300
4	24054	Pedro Montoya	-99.833	21.633	883
5	24060	Rayón	-99.650	21.850	942
6	24063	San A. de los Guayabos	-99.483	21.683	1415
7	24067	San José Alburquerque	-100.517	21.850	1860
8	24075	Santa María del Río	-100.733	21.800	1703
9	24093	Tierra Nueva	-100.583	21.583	1778
10	24097	Vigas, Río Verde	-99.867	21.800	1786
11	24134	Santa. Ma. del Río	-100.733	21.800	1700
12	24171	Huizachal, Río Verde	-100.033	21.733	990
13	24172	Media Luna	-100.017	21.850	1010
14	24193	San José del Tapanco	-99.900	21.767	900

Fuente: Conagua (2010).

& Luna (2008) quienes están basados en los cocientes P/T, donde P es precipitación y T temperatura; se construyó también un mapa de oscilación térmica, el cual se basa en la diferencia de temperatura entre el mes más cálido y el mes más frío (Vidal, 2005).

Se usaron dos metodologías para evaluar el índice de severidad de sequía: el Índice de Severidad de Sequía de Palmer (ISSP) y el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI); ambos utilizan variables diferentes (Hernández & Valdez, 2004; Crespo, 2005).

RESULTADOS

Estructura hidrológica de la SGG

Los rasgos hidrográficos de la SGG están controlados por la variación de la geología, que genera un relieve

abrupto con pendientes fuertes que favorecen el escurrimiento directo.

Las cuencas hidrográficas de la SGG vierten hacia dos ríos principales: el río Santa María (subcuenca del río Tamuín) y el Extoraz (subcuenca del río Moctezuma), ambas vertientes (dentro del estado de Guanajuato) constituyen el 4.1% del sistema hidrológico río Pánuco.

Se presentan en la figura 2 los perfiles topográficos del canal principal de tres arroyos importantes para las cuencas que aportan al río Pánuco, dentro de la SGG.

En estos perfiles topográficos se propone una clasificación climatológica preliminar, con el fin de conocer la variación que existe dentro de cada cuenca. El gradiente topográfico del río Xichú es de 1700 m, y puede albergar tres tipos de clima diferente que va de lo cálido a lo templado, en una distancia longitudinal

de 40 km. En el perfil del río Tierra Blanca, vertiente del río Extoraz, se registra una variación de climas que va de lo semifrío (3200 m s.n.m.) hasta lo semicálido (1800 m s.n.m.) en una longitud de 25 km. Esta variación es similar en el río Victoria, desde lo semicálido a lo templado. Los climas más característicos son los semicálidos y los templados.

Estaciones climatológicas y clasificación

De las 48 estaciones analizadas, dos se ubican en el clima árido (cálido), 41 en clima semiárido (semicálido) y cinco en clima templado. En el estado de Gua-

najuato ninguna estación resultó con clima templado húmedo; de las 21, 20 están en un clima semiárido.

Tres estaciones de Querétaro y dos de San Luis Potosí tienen un clima templado húmedo. Según Vidal (2005), la región climática 7, Golfo de México, es la única en el país con climas del tipo templado húmedo. Vidal (2005) propuso una clasificación de climas a partir de la elevación de cada estación climatológica y del porcentaje de lluvia invernal; en la figura 3 se adaptaron los datos de las estaciones analizadas según esta clasificación.

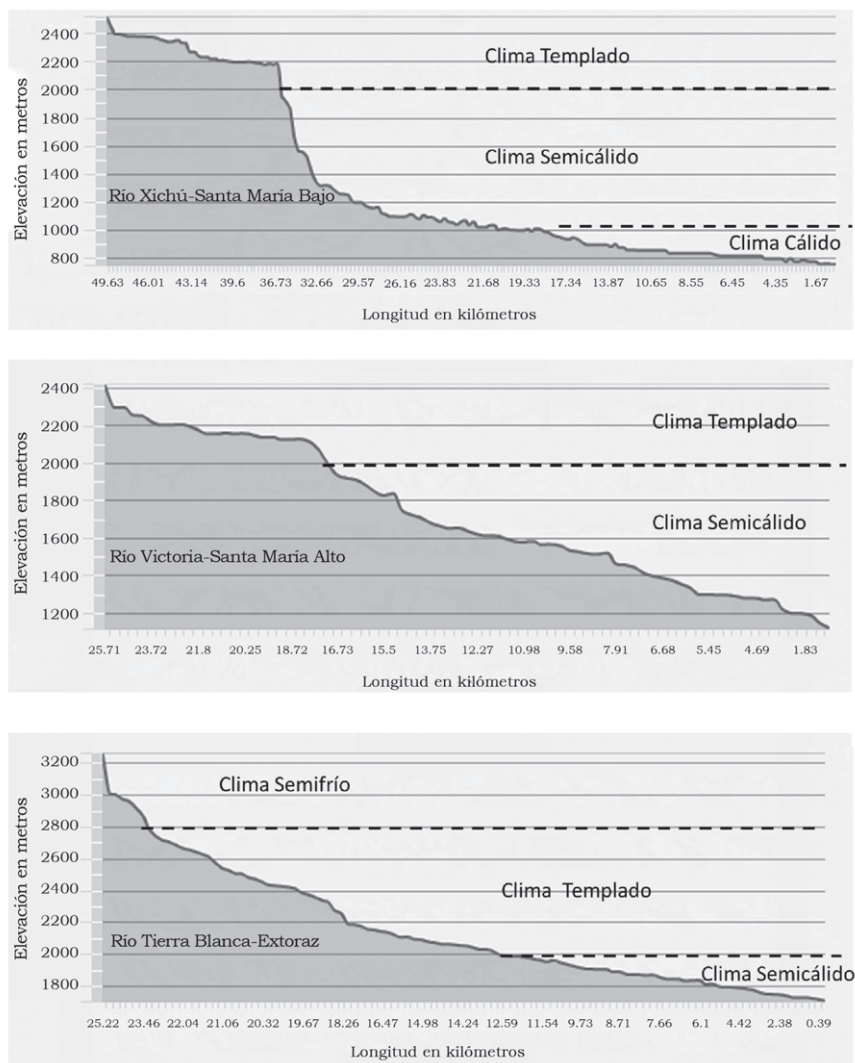


Figura 2. Perfiles topográficos de tres ríos principales.
Fuente: Generada en el SIATL.

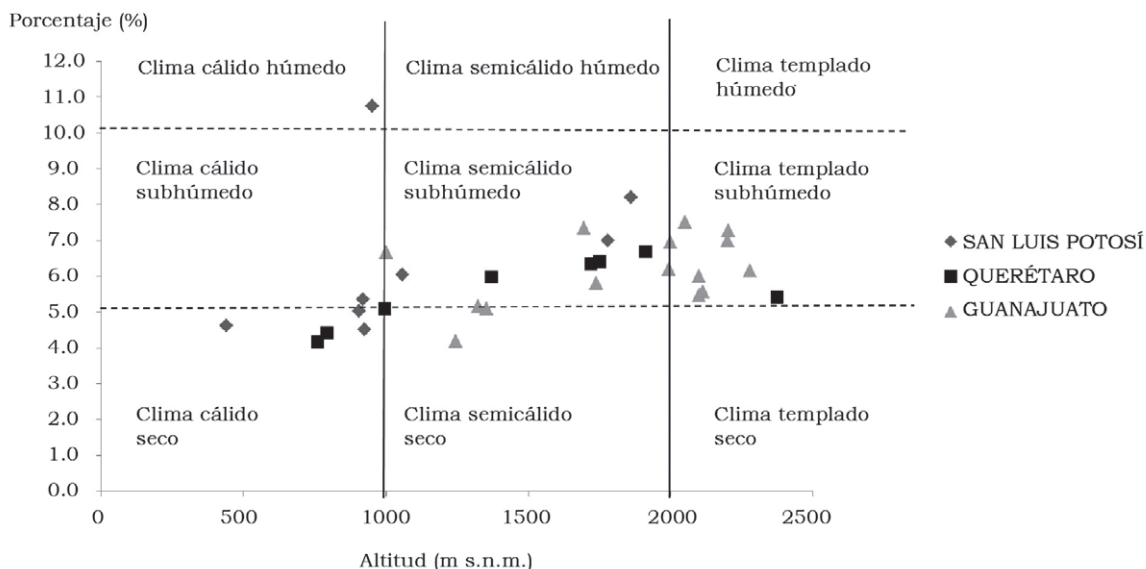


Figura 3. Ubicación climática (porcentaje de lluvia en invierno vs altitud) de las estaciones de Conagua. Fuente: Elaboración propia.

La mayoría de las estaciones se encuentran en clima semicálido y subhúmedo.

Las clasificaciones de las figuras 2 y 3 coinciden en cuanto a los climas dominantes en la región de la Sierra Gorda de Guanajuato, que varían de templado a semicálido.

Temperatura mínima

En la figura 4 se presentan las temperaturas mínimas que se han reportado en la SGG. Casi todo el territorio del estado de Guanajuato tiene una temperatura mínima cercana a los 10 °C. Existe un patrón relacionado con las provincias fisiográficas y las cuencas hidrológicas, sobre todo por el relieve según se aprecia en la figura 2.

Las temperaturas mínimas son más bajas del lado de la Mesa Central y del río Lerma, efecto generado por una sombra pluviométrica, la cercanía a la costa y la elevación sobre el nivel del mar. Las temperaturas mínimas en la SGG están arriba de 10 °C y debajo de los 20 °C, lo cual se puede considerar como clima templado (Vidal, 2005).

La temperatura mínima histórica registrada en la zona fue en Villa Victoria, el termómetro bajó hasta -8.5 °C el 15 de diciembre de 1997, y el 14 de diciem-

bre de este mismo año, en San Luis de la Paz se registró la temperatura más baja en 30 años y fue de -8 °C.

En zonas que están a 1200 m s.n.m. se ha registrado una temperatura mínima de -4 °C en Xichú, en noviembre del 1974 y febrero de 1976. Estos eventos generan incertidumbre para los bienes de producción local y para la sociedad en general, pues se agudizan las enfermedades, se paraliza el turismo y la educación. Es importante conocer los valores de temperatura extrema en términos de periodo de retorno, con el fin de ser menos vulnerable.

Temperatura máxima

Los niveles de temperatura máxima (figura 5) son altos debido a la altitud y la humedad del Golfo de México. La oscilación de temperatura máxima es de 12 °C en toda la región SGG, siendo las más elevadas en lado oriente en el estado de Querétaro, con 33 °C como máxima y la mínima en las montañas del parteaguas hidrológico en las cuales la temperatura máxima es de 22 °C.

Mayo es el mes más cálido en toda la región y se mantiene muy constante y parecido en los meses de verano, sobre todo en agosto que es cuando hay un déficit en la lluvia.

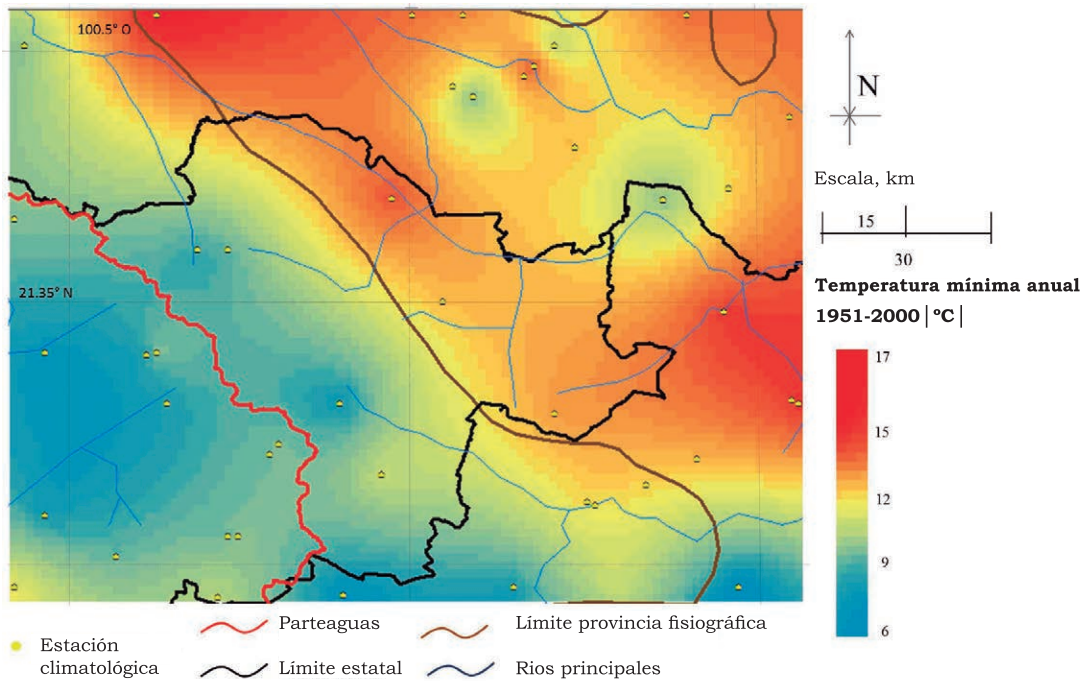


Figura 4. Temperatura mínima en la SGG.
Fuente: Elaboración propia.

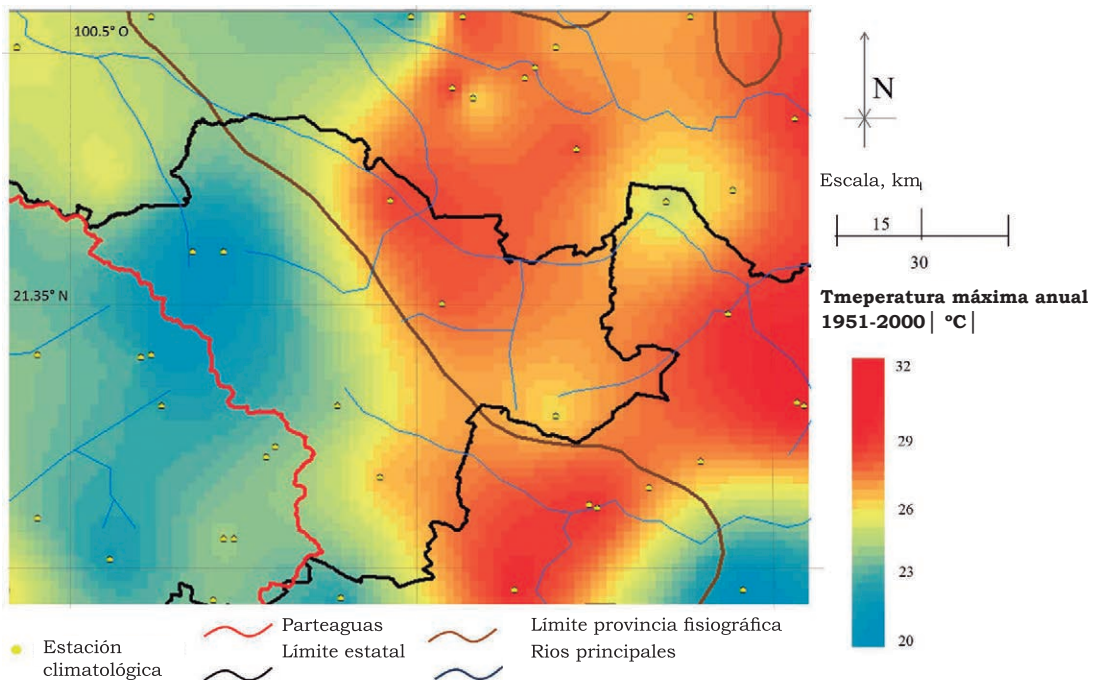


Figura 5. Temperatura máxima en la SGG.
Fuente: Elaboración propia.

En Xichú se ha presentado una temperatura máxima histórica de 51 °C, en Minas de Maguey es de 44.5 °C. El gradiente topográfico entre estas dos estaciones es de 225 m, Xichú se encuentra topográficamente más arriba de Minas de Maguey. Esta inversión es posible que sea el resultado de la vegetación y deforestación.

En San Luis de la Paz se han registrado temperaturas máximas que llegan a 38 °C, que sugieren un sistema más templado. Los rangos de temperatura media son controlados por el gradiente topográfico, de hasta 1700 m, así como por la vegetación y el uso de suelo. Los tipos de vegetación que dominan según los rangos de altura son: bosques de coníferas y encinos, 2500 m s.n.m.-1800 m s.n.m.; nopaleras y bosques de huamúchil y cedros, 2000 m s.n.m.-1300 m s.n.m.; huertas de mangos y plátanos a 800 m s.n.m.-650 m s.n.m.

A pesar de la baja cobertura de información, existe una correlación de la temperatura con la altitud. Se ajusta más la temperatura mínima (0.88) que la temperatura máxima (0.61).

Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM) para la zona montañosa del centro de México la temperatura disminuye 0.6 °C por cada 100 m de altitud. En la SGG pueden presentarse en una misma cuenca gradientes de hasta 12 °C, considerando la relación anterior. Esto representa una riqueza única de ecosistemas y potencial de servicios ambientales. Los gradientes topográficos de hasta 1900 m favorecen una oscilación térmica de 10 °C en las temperaturas medias. Las máximas y mínimas históricas se han presentado en intervalos cortos de dos a cuatro años, produciendo un gradiente de 55 °C.

Precipitación y evaporación

La distribución espacial de la lluvia se aprecia en la figura 6. La lluvia es mayor hacia la parte baja de la cuenca, la cual a su vez es la más cercana a la influencia del Golfo de México. En la figura 7 se presentan los valores de "evaporación potencial". Esta variable se refiere al agua potencial que se evapora desde un espejo de agua. Un balance hidrológico preliminar anual entre estas dos variables (lluvia y evaporación potencial) es negativo. Sólo en los meses de verano la lluvia es mayor a la evaporación potencial.

Se observa la influencia de la Mesa del Centro y el efecto de las dinámicas de la costa del Golfo de México (figura 6). Dentro de la SGG al norte de Victoria, Xichú y Atarjea se da la mayor precipitación 700 mm. En Pinal de Amoles, Querétaro, que se encuentra a 70 km de Atarjea, se registra una lluvia anual de 1200 mm.

La SGG recibe remanentes de estos niveles de humedad condicionada por la fisiografía de la Sierra Madre Oriental. Al norte y noroeste de la SGG, así como al sur, la lluvia oscila entre 400 mm y 600 mm; este régimen está determinado por la influencia de las corrientes del norte y su lejanía de las costas.

Hay una diferencia de lluvia de 200 mm debido a la transición de la fisiografía y al relieve, en la zona de las rocas sedimentarias llueve más que en la zona poniente, donde hay rocas volcánicas. Los valores de precipitación en zonas donde la roca caliza predomina son significativos, y convierte a la zona en un monumento ecológico importante por mantener y preservar la fuente de recarga para acuíferos locales y regionales, ya que el flujo base que producen las cuencas altas abastece a miles de habitantes en la zona baja del río Pánuco.

La importancia del agua subterránea para la región es mucha, ya que el déficit aparente del agua que potencialmente se evapora y la que llueve es más de tres veces (figura 7). A este efecto se le agrega el estiaje en verano y la escasez de lluvia en invierno. Los valores de evaporación potencial se tomaron de la información que generan las estaciones convencionales de Conagua, las cuales utilizan un evaporímetro conocido como "tanque clase A", que es un tanque de acero inoxidable en una superficie de madera, su colocación sobre el terreno es tal que se despreja el efecto del viento, se mide la lámina de agua que se evapora del tanque. Por tal motivo los valores de la figura 7 se aplican sólo a cuerpos de agua y ríos perennes.

Canícula

De las 48 estaciones analizadas del estado de Guanajuato, 10 presentan un régimen de lluvia que se caracteriza por tener una sequía en el verano, junio-septiembre; popularmente a este fenómeno se le conoce como "canícula" o "sequía intraestival".

La canícula se debe principalmente a una variación en la circulación de los vientos alisios, su intensidad disminuye a medida que se sobrecalienta la porción tropical del Pacífico Oriental (Peralta *et al.*, 2008; Espadas & Orellana, 2010; Magaña & Caetano, 2007). En la figura 8 se presentan hietogramas, curva masa y distribución por época del año de ocho de estas estaciones que normalmente presentan esta condición de lluvia. Esta sequía intraestival se considera como una sequía meteorológica, pero si se extiende hasta el estiaje del próximo año se convierte en sequía climatológica con mayor impacto en los medios de producción y en el agua disponible (Magaña & Caetano, 2007; Hernández & Valdez, 2004).

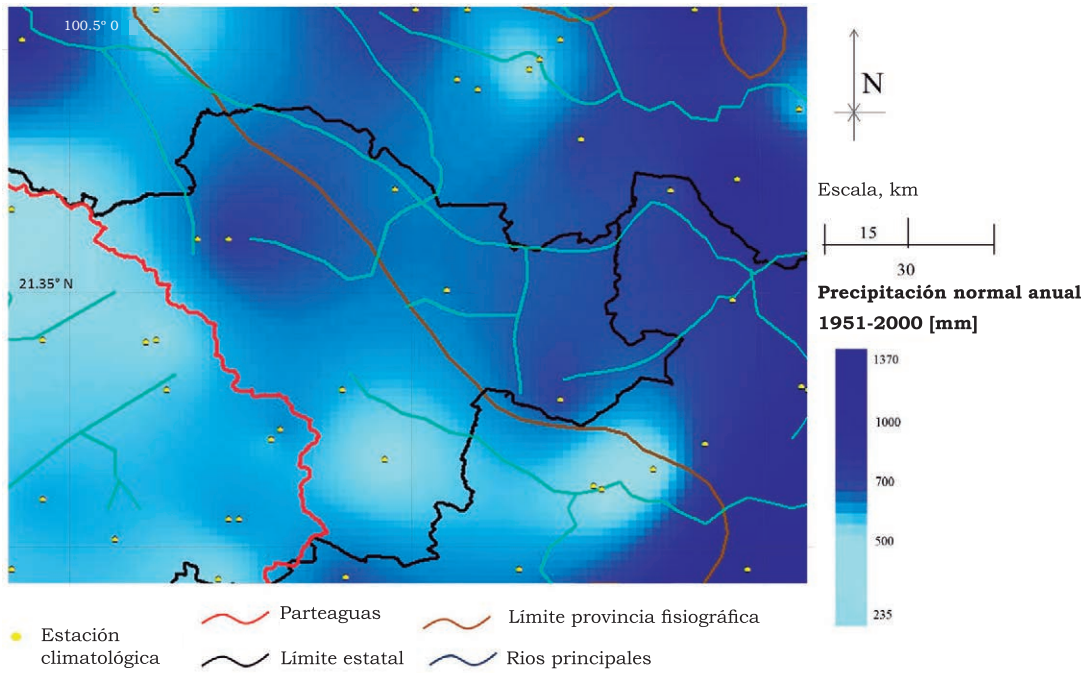


Figura 6. Distribución espacial de lluvia la lluvia media anual en la SGG.
Fuente: Elaboración propia.

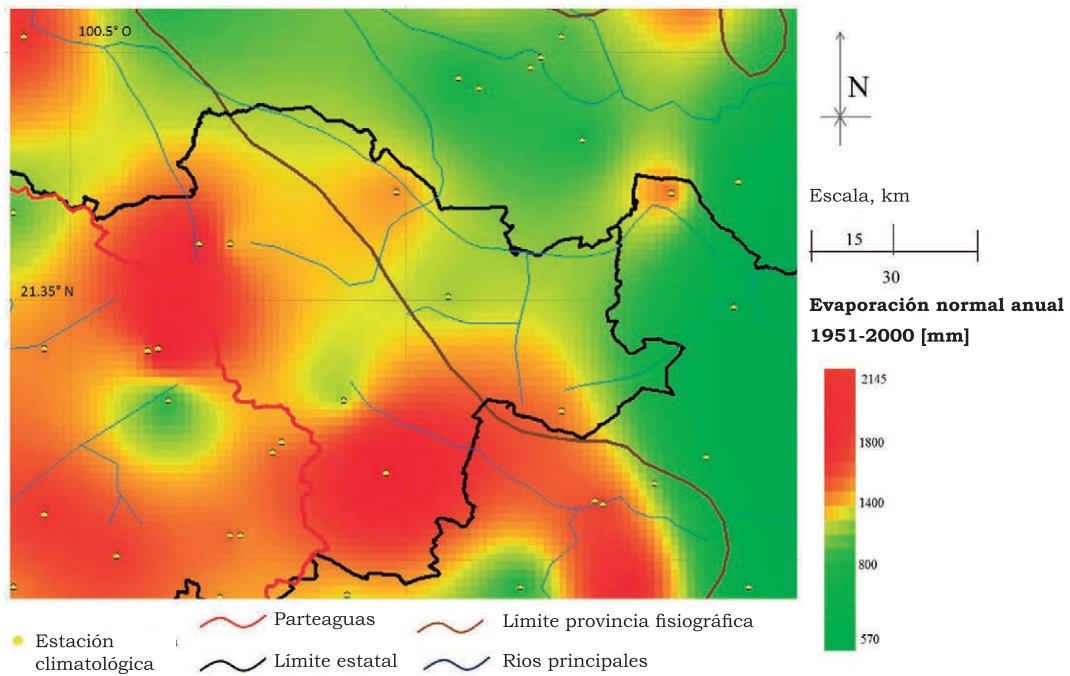


Figura 7. Distribución anual de la evaporación potencial SGG.
Fuente: Elaboración propia.

Dicho evento se presenta en los meses de julio y/o agosto. Los meses más lluviosos en la zona son junio y septiembre. Por la cercanía a la costa, las tormentas tropicales de septiembre y octubre son las que generan que el cierre del verano sea más lluvioso.

Es normal que los veranos de las latitudes que corresponden al Eje Neovolcánico y al sur de la Mesa del Centro presenten más del 70% de la lluvia total anual (Martínez, 2012). En la SGG el verano es poco más del 50% y la primavera aporta del 25%-35%. Las lluvias

invernales son menos frecuentes (figura 3), sin embargo, en zonas con elevación mayor a 2800 m s.n.m. el clima semifrío genera la presencia frecuente de niebla, neblina y nublados.

En la figura 8 se muestran la lluvia mensual y acumulada en algunas estaciones climatológicas que se encuentran dentro de la SGG. Este registro es de utilidad para plantear modelos de dotación de agua, tener un panorama del potencial hidrológico y climático y que pueda servir para diversos sectores, salud,

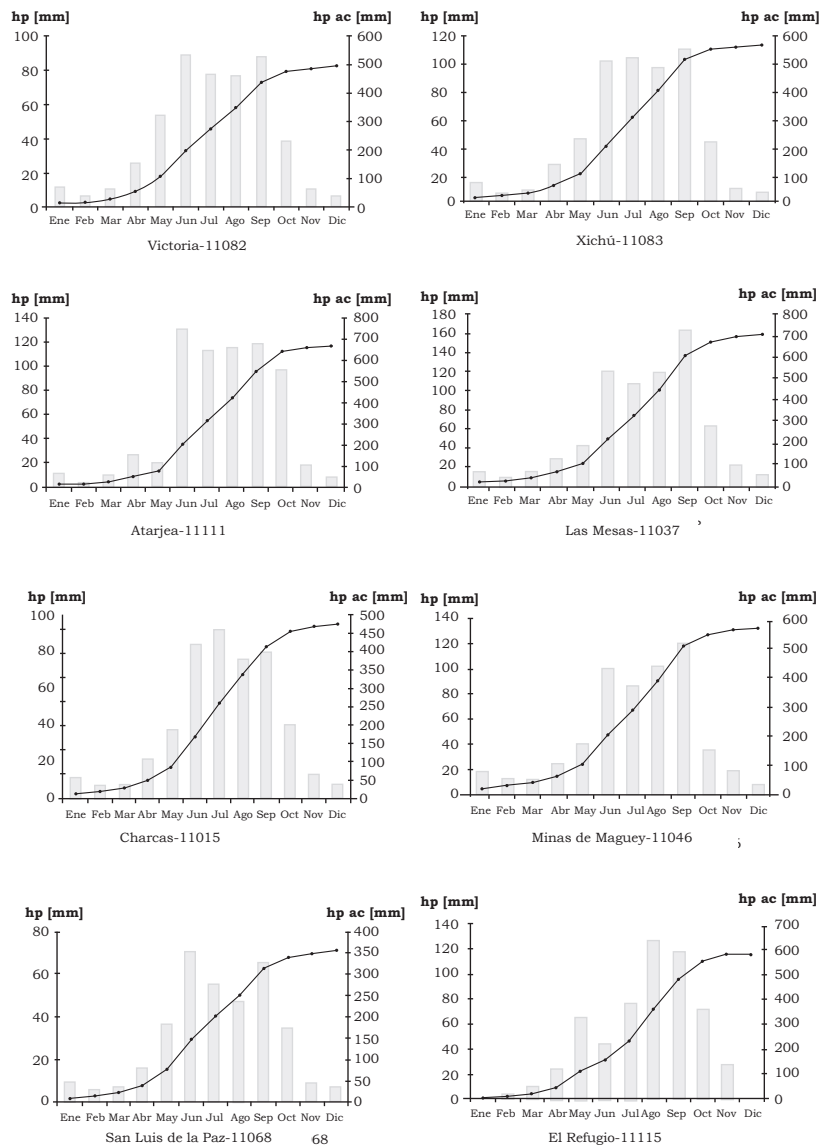


Figura 8. Hietogramas y curva masa de las estaciones que registran canícula. Fuente: Elaboración propia con datos de Peralta *et al.* (2008) y Pineda *et al.* (2007).

turismo e industria, ya que ayudaría a mejorar la gestión de recursos y ser más eficientes en la operación hidráulica de cada sector. En la región norte de la SGG la distribución anual de lluvias es dominada por el verano, con un 48%-56% de la precipitación total, los meses de primavera aportan otro 23%-30%, el otoño 10%-17%, mientras que el invierno aporta poco, 2%-6%. En Xichú, Guanajuato, se presenta la normal climatológica de la precipitación, y se observa que la canícula sólo se presenta con mayor frecuencia en el mes de agosto. Este mes aporta 16.9% del total anual. En el mes de septiembre es el que aporta más con un 19.3%. La estación Atarjea es la más cercana a la influencia de humedad del Golfo de México y la serranía de Hidalgo y Querétaro; 750 mm son los que precipitan en esta zona. El mes más lluvioso es junio, 19.2% del total anual se presentan en este mes.

En términos de riesgo hidrológico, avenidas máximas, significa que en este mes se puede saturar todo el espacio poroso y que la lluvia de los siguientes meses escurrirá directamente, generando frecuentes crecidas en los ríos.

En la zona de San Luis de la Paz se presenta la canícula en julio y agosto, y los septiembreros son muy lluviosos, 23.2% del total anual.

En la zona del Refugio, San Luis de la Paz, se caracteriza por no tener lluvias en diciembre (0 mm según la normal). El mes más lluvioso es agosto con un aporte de 22%, y en mayo se presentan lluvias convectivas que dejan un aporte de 11.4% al valor anual esperado, casi el mismo que julio, 13.4%. La estación El Vergel es la que marca un verano más normal a lo esperado en estas latitudes. Julio es el mes más lluvioso, 17.9% del valor total anual.

Índices de sequía

Se presenta un análisis preliminar de los indicadores de clima y sequía que complementan el panorama climático de la región SGG. Los mapas generados son la base para proponer los indicadores de afectación y adaptación del cambio climático. Con esta investigación se busca homogenizar los criterios y la forma de intervenir ante la sequía o el clima seco.

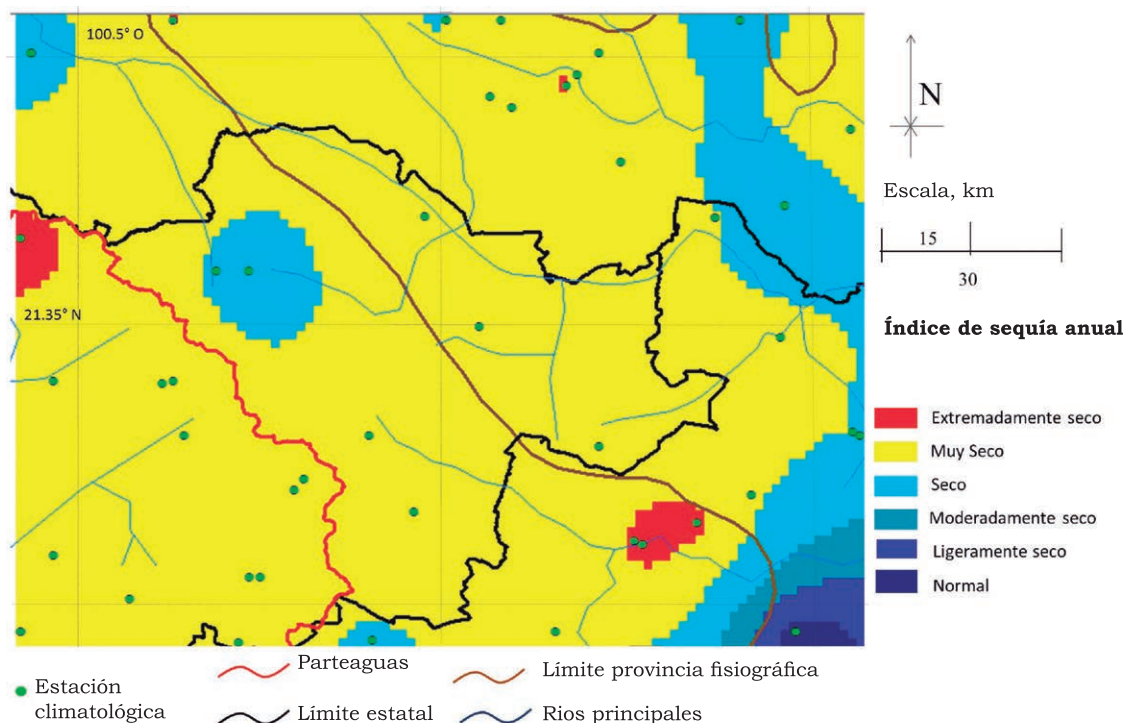


Figura 9. Índice de Sequía.
Fuente: Peralta *et al.* (2008).

La oscilación térmica puede considerarse como un indicador de conservación o deterioro, intervalos grandes incrementan la probabilidad de menor acceso al agua para abasto.

La figura 9 muestra un mapa de la distribución del índice de sequía, propuesto por Peralta *et al.* (2008). La condición que más predomina en la SGG es la de seco a muy seco.

Sin embargo, se cree que el relieve (figura 2) y la vegetación generan microclimas distintos dentro de este panorama seco y árido. En las figuras 10 y 11 se presenta la clasificación de la subregiones tanto de climas áridos como húmedos (Pineda *et al.*, 2007).

A pesar de que la SGG se encuentra por debajo del Trópico de Cáncer, predomina un clima árido, el más seco de los climas tropicales.

En un análisis nacional sobre el índice de severidad de la sequía meteorológica, la región de la SGG presenta un panorama de severo a muy fuerte; se estima que se mantendrá esta condición e inclusive puede aumentar (Magaña, 2004). Sin embargo, hay una discrepancia en los términos técnicos, políticos, económicos, culturales y sociales a nivel mundial para afrontar el fenómenos de la sequía (Hernández & Valdez, 2004).

Los reservorios de agua superficial y subterránea son los más afectados ante los efectos del clima seco (Björn *et al.*, 2011). Hay un efecto negativo en el caudal base cuando los valores de evapotranspiración aumentan en cuencas que se encuentran en el trópico (Crespo, 2005; Cadol, Kampf & Wohl, 2012).

Conocer y analizar los índices bioclimáticos, el efecto de la canícula y la presencia de eventos extraordinarios deben servir para reforzar los sistemas de alerta del sector salud, agricultura y protección civil. Es importante cruzar la información a nivel local de la condición climática, con los índices de crecimiento y desarrollo socioeconómico.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

Los eventos meteorológicos y climáticos son peligros naturales para los medios de producción de la región. El régimen de lluvia en la región de SGG recarga los reservorios superficiales y subterráneos con el exceso de humedad de las tormentas tropicales de septiembre y octubre. Las condiciones térmicas están controladas por la altitud, la vegetación, el uso y tipo de suelo. Parece ser que es determinante la distancia que hay a las costas. Estos factores propician climas

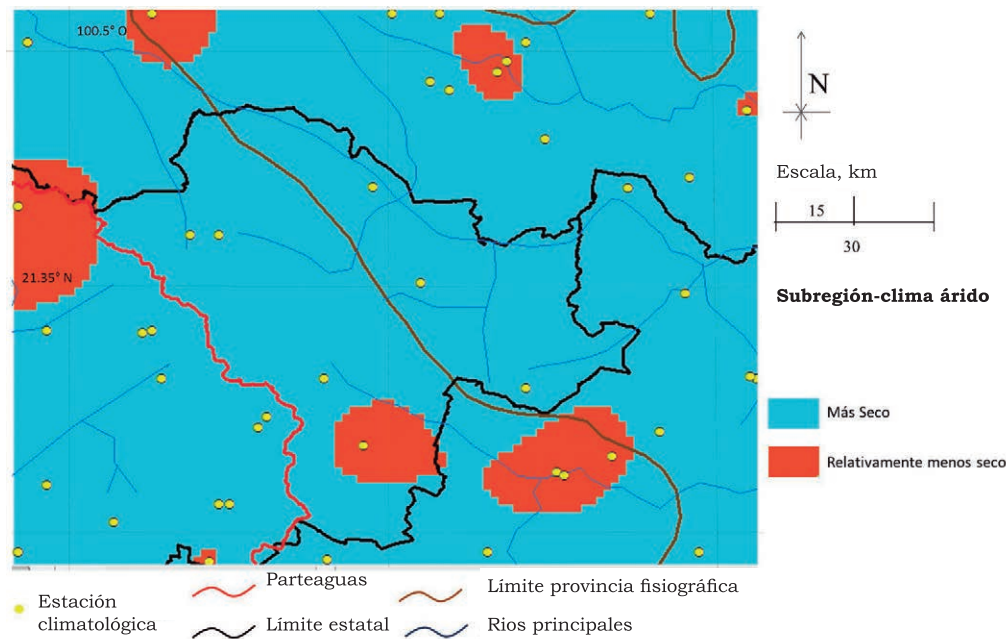


Figura 10. Subregión climática.
Fuente: Pineda *et al.* (2007).

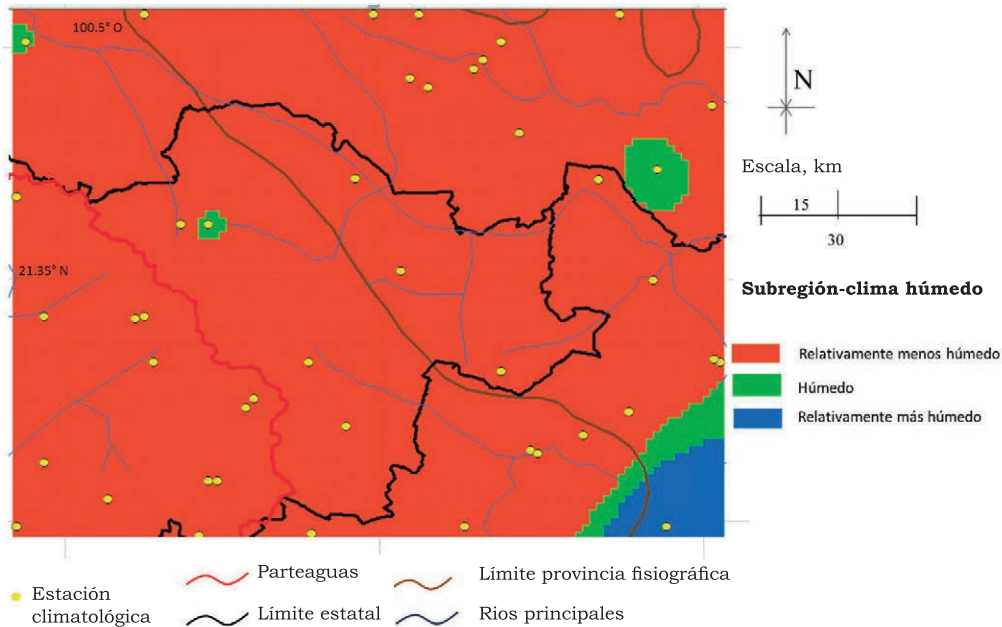


Figura 11. Subregión climática.
Fuente: Pineda *et al.* (2007).

cálidos, semicálidos secos y subhúmedos en zonas bajas; y en partes altas templados subhúmedos.

La geomorfología es fundamental en la regulación del clima, ya que la cantidad de radiación solar que reciben laderas con diferentes orientaciones es fundamental para la cantidad de humedad retenida en el suelo. La evaporación en toda la SGG es muy alta, casi el doble de lo que llueve se evapora. Por esta razón los flujos subterráneos son fundamentales para abastecer corrientes perennes.

En los mapas de clima y lluvia puede apreciarse que en la SGG predomina el clima semicálido y templado subhúmedo. Este efecto está ligado a la densidad de vegetación. En los mapas se visualiza claramente el efecto del relieve suave relacionado con altas temperaturas. La precipitación anual varía de 400 mm en la zona baja y del poniente de la sierra, a los 800 mm en las partes altas del sur y del este, en los límites de Querétaro. Aunque a nivel local el relieve y la altitud influyen en el régimen de lluvia, a nivel regional la relación de la lluvia con la altitud no existe, esto es porque la zona tiene una baja densidad de cobertura e información.

A través del hietograma y curva masa de las estaciones que se encuentran en la SGG se determina que el potencial de lluvia que entra a las cuencas es tres veces menor al potencial de evaporación. Este déficit

denota la escasez de agua superficial y los conflictos que genera dicha problemática. A pesar del estado seco-subhúmedo de la SGG, el régimen hidrológico es alto, debido a los acuíferos cársticos y fracturados que aportan un flujo base significativo, generando varios ríos perennes.

Por otra parte, los hietogramas de las estaciones de Guanajuato muestran un régimen pluviométrico dominado por la sequía intraestival o canícula. Es importante generar análisis más precisos y específicos sobre esta sequía meteorológica. La sequía meteorológica es un fenómeno normal en algunas zonas de la SGG, ocurre en los meses de julio y agosto.

Sin embargo, debido al cambio climático es probable que esta sequía meteorológica sea más recurrente al grado de representar grandes periodos de sequía climática.

El clima neutral entre lo húmedo y lo seco se presenta en el estado de Querétaro, mientras que en toda la región de SGG es de seco a muy seco, empero, a escala de microcuenca las condiciones se modifican debido al relieve (figura 2). Aunado a la aridez que domina, la vulnerabilidad del recurso hídrico se incrementa si se considera que la SGG es también una región mineralizada, las minas y depósitos de residuos interactúan con el agua de lluvia aportando cantidades significativas al escurrimiento base y vasos de captación.

Los mapas de clima (figura 7) no justifican el hecho de que en esta región se haya construido un embalse, la presa El Realito, lo cual se traduce como una exportación de agua a otras cuencas. La evaporación a la que está sujeta este cuerpo de agua es más de 1400 mm anuales, y con el embalse y la deforestación puede seguir aumentando. El clima semiárido genera mayor responsabilidad con el uso eficiente del agua (Gleick, 2010; Gitay *et al.*, 2002).

Esta región del país es una de las menos instrumentadas con respecto al clima y escurrimiento, además debido a la fisiografía y geología son muy vulnerables a derrumbes y colapsos de caminos. Es necesario implementar modelos de simulación climática e hidrológica a nivel cuenca y microcuenca, ya que el cambio climático hace más difícil la predicción de los fenómenos que impactan sobre regiones puntuales. Los mapas generados se están incorporando a la estrategia y plan de manejo de la reserva de la biósfera de la Sierra Gorda de Guanajuato.

En 2009, la Universidad de Guanajuato instaló una estación meteorológica en la comunidad de Palomas Xichú, Guanajuato (1230 m s.n.m.), con el fin de implementar una red de observatorios ambientales. El objetivo de esta red es la de integrar el trabajo comunitario a una acción directa en contra del cambio climático, trabajando proyectos productivos, en conservación de cuencas, instrumentación y monitoreo hidrológico, impulso de la cartografía regional y local de los recursos naturales.

AGRADECIMIENTOS

Parte del financiamiento fue aportado por el proyecto “Elaboración del Programa de Conservación y Manejo de la Reserva de la Biósfera de la Sierra Gorda de Guanajuato”, financiado por la Conagua.

A los árbitros que evaluaron este trabajo, ya que con sus aportaciones y comentarios oportunos retroalimentaron y mejoraron la calidad de este manuscrito.

REFERENCIAS

- Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S. & Palutikof, J. P. (2008). *Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: IPCC Secretariat.
- Björn, T., Jörg, S., Otfried, D. & Gunnar, L. (2011). Measures to sustain seasonal minimum runoff in small catchments in the mid-latitudes: A review. *Journal of Hydrology*, 408, 296-307.
- Cadol, D., Kampf, S. & Wohl, E. (2012). Effects of evapotranspiration on baseflow in a tropical headwater catchment. *Journal of Hydrology*, 4(14), 462-463.
- Comisión Nacional del Agua (2011). *Extractor rápido de Información Climatológica ERIC III*. México: Conagua, IMTA.
- Conde, C., Estrada, F., Martínez, B., Sánchez, O. & Gay, C. (2011). Regional climate change scenarios for México. *Atmósfera*, 24(1), 125-140.
- Crespo, G. (2005). Comparación de dos metodologías para el cálculo del índice de severidad de sequía para doce reservas de la Biósfera Mexicana [Informe técnico de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, Ciencia y la Cultura, 133].
- Espadas, C. & Orellana, R. (2010). Sequía Intraestival. *Observatorio de Cambio Climático de Yucatán*, 65-76.
- Estrada, F., Martínez, B., Conde, C. & Gay, C. (2012). The new national climate change documents of Mexico: what do the regional climate change scenarios represents. *Climatic Change*, 110, 1029-1046.
- Gitay, H., Suárez, A. & Watson, R. T. (2002). *Climate Change and Biodiversity. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change Geneva*. Geneva: IPCC Secretariat.
- Gleick, P. H. (2010). Climate change, exponential curves, water resources, and unprecedented threats to humanity. *Climate Change*, 100, 125-129.
- Hergt, T., Carrillo-Rivera, Morales-Manilla, Ángeles-Serrano, González-Abraham & Rosales-Lagarde (2002). *Relación de las condiciones geohidrológicas y su relación con el bosque: en la Sierra Gorda de Querétaro*. México: Instituto Nacional de Ecología.
- Hernández, M. E. & Valdez, M. G. (2004). *Sequía meteorológica. Cambio climático: una visión desde México. Sección III. Impactos, vulnerabilidad y adaptación*. México: Semarnat, Instituto Nacional de Ecología.
- Hutjes, R. W. A., Kabat, P., Running, S.W., Shuttleworth, W. J., Field, C., Bass, B., da Silva Dias, M. A. F., Avissar, R., Becker, A., Claussen, M., Dolman, A. J., Feddes, R. A., Fosberg, M., Fukushima, Y., Gash, J. H. C., Guenni, L., Hoff, H., Jarvis, P. G., Kayane, I., Krenke, A. N., Changming, L., Meybeck, M., Nobre, C. A., Oyebande, L., Piltmant, A., Pielke Sr., R. A., Raupach, M., Saugier, B., Schulze, E. D., Sellers, P. J., Tenhunen, J. D., Valentinia, R., Victoria, R. L., Vörösmarty, C. J. (1998). Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle. *Journal of Hydrology*, 212-213.
- 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.
- Magaña, R. V. (2004). *Los impactos del niño en México*. México: Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Gobernación.
- Magaña, V. & Caetano, E. (2007). *Pronóstico climático estacional regionalizado para la República Mexicana como elemento para la reducción de riesgo, para la identificación de opciones de adaptación al cambio climático y para la alimentación del sistema: cambio climático por estado y por sector* [informe final de proyecto. INE/A1-006/2007, 41].
- Martínez Arredondo, J. C. (2012). *Determinación de la influencia de las condiciones hidrológicas y climatológicas en el flujo base en la cuenca Esperanza-Soledad-Santa Ana del sistema hidrológico río Guanajuato* (tesis de Maestría en Ciencias del Agua). Universidad de Guanajuato: Guanajuato.
- Peralta, A. R., Barba, L. R. Magaña, V. O. Matthias, A. D. & Luna, J. J. (2008). Temporal and spatial behavior of temperature and precipitation during the canícula (midsummer drought) under El Niño conditions in central Mexico. *Atmósfera*, 21(3), 265-280.

- Pineda, L. F., Carbajal, N. & Medina, E. (2007). Regionalization and classification of bioclimatic zones in the central-northeastern region of México using principal components analysis (PCA). *Atmósfera*, 20(2), 133-145.
- Regalado, C. M., Ritter, A. & Gómez, L. A. (2007). Análisis geoestadístico de la distribución de lluvia penetrante en una cuenca forestal del Parque Nacional de Garajon. *Estudios de la zona no saturada del suelo*, VIII, 289-293.
- Serrano, V. S. & M., Sánchez, S. (2002). Cartografía de precipitaciones y temperaturas en el valle medio del Ebro mediante la utilización de diferentes técnicas estadísticas. *Geographica*, 42, 73-92.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). (2011). *Carta Geológico-Minera: SLP F14C35, Xichú F14C36 y Carricillo F14C37*. México: Secretaría de Economía.
- Vargas, A., Santos, A., Cárdenas, E. & Obregón, N. (2011). Análisis de la distribución e interpolación espacial de las lluvias en Bogotá, Colombia. *Dyna*, 78(167), 151-159.
- Vázquez, J. (2006). *Datos climáticos de la República Mexicana: Panorama actual y requerimientos inmediatos*. Trabajo presentado en el 1er Foro del Medio Ambiente Atmosférico.
- Vidal Zepeda, R. (2005). Las regiones climáticas de México I.2.2. I Textos Monográficos, 2 Naturaleza. Instituto de Geografía, Universidad Autónoma de México, 10, 209.
- Vörösmarty, Ch., Green, P., Salisbury, J. & Lammers, R. (2008). Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth. *Science*, 289, 284-288.