

Respuesta hidrológica al cambio climático en regiones áridas: caso de estudio en los Comondú, Baja California Sur, México

Hydrologic response to climate change in arid regions: Case study in los Comondú, Baja California Sur, Mexico

Jobst Wurl¹, Cynthia Nayeli Martínez García¹ y Miguel Ángel Imaz Lamadrid²

¹ Laboratorio de Hidrogeología, Área de Conocimiento de Ciencias del Mar y de la Tierra, Universidad Autónoma de Baja California Sur. Carretera al Sur Km 5.5, La Paz, Baja California Sur, 23080. México

² Petróleos Mexicanos (Pemex), Villahermosa, Tabasco. Carretera Villahermosa-Cárdenas Km. 7 Campo Carrizo, Villahermosa, Tabasco C.P. 86000. México
e-mail: jwurl@uabcs.mx

Recibido: 30 de abril de 2015.

Aceptado: 08 de julio de 2016.

Wurl J., C. N. Martínez García y M. Á. Imaz Lamadrid. 2017. Respuesta hidrológica al cambio climático en regiones áridas: caso de estudio en los Comondú, Baja California Sur, México. *Hidrobiológica* 27 (1): 13-22.

RESUMEN

Antecedentes. En la actualidad, el cambio climático es uno de los fenómenos con mayor relevancia dentro del medio científico; dicho proceso se ha registrado como un incremento de las temperaturas a escala global. Para la zona central de Baja California Sur (BCS), México, los modelos climáticos indican, además, un aumento en la frecuencia de precipitaciones extremas. El área de estudio abarca dos poblaciones (San José y San Miguel de Comondú) cuyas zonas urbanas y rurales se encuentran ubicadas en una cañada de aproximadamente 16 km de longitud y hasta 800 m de ancho. **Objetivos.** Realizar un análisis estadístico histórico de la variabilidad climática y modelar la respuesta del arroyo Comondú ante eventos extremos de precipitación. **Métodos.** Se analizó la variabilidad climática de acuerdo con las bases de datos de la estación climatológica de Comondú, operada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). También se determinó el patrón de los escurrimientos en el arroyo Comondú durante episodios de precipitación extrema, similares o cercanos a eventos con tiempo de retorno de 1000 años por medio de los modelos hidrológicos e hidráulicos de los software HEC-1 y HEC-RAS. **Resultados.** Para el caso de los Comondú, se observa una clara tendencia a la alza en los datos de precipitación extrema de 24 horas, lo cual implica que el peligro de inundaciones en la zonas pobladas y de cultivos aumenta considerablemente. La ocurrencia de un evento de 1000 años afectaría cerca de 86,864 m² en la zona urbana de ambos poblados y 201,570 m² en la zona de cultivo. **Conclusiones.** Los resultados de la modelación indican un incremento en área, profundidad y velocidad de la corriente, lo que aumenta el riesgo de inundación en las zonas bajas de los Comondú. Con base en los resultados de la modelación, se pueden promover medidas que permitan salvaguardar a la población y la economía de este lugar.

Palabras clave: Análisis de precipitaciones, cambio climático, inundaciones, modelación hidráulica.

ABSTRACT

Background. Currently, climate change is one of the most relevant phenomena within the scientific environment; this change has been recorded as an increase in temperatures on a global scale. For the central zone of Baja California Sur (BCS), Mexico, climate models also indicate an increase in the frequency of extreme precipitation. The study area covers two towns (San José and San Miguel de Comondú) whose urban and rural areas are located in a ravine of approximately 16 km in length and up to 800 m in width. **Goals.** To carry out a historical, statistical analysis of the climatic variability and model the response of the Comondú stream to extreme precipitation events. **Methods.** Climatic variability was analyzed with databases from the Comondú weather station, operated by the National Meteorological Service (SMN). In addition, the runoff pattern in the Comondú stream was ascertained in the event of extreme precipitation events, similar to or close to events with a return time of 1000 years, using hydrological and hydraulic models of HEC-1 and HEC-RAS software. **Results.** In the case of Los Comondú, BCS, there is a clear upward trend in the 24-hour extreme precipitation data, which implies that the danger of flooding in populated areas and crops increases considerably. The occurrence of a 1000-year event would affect about 86,864 m² of the urban area of both towns and 201,570 m² of the area under cultivation. **Conclusions.** The results of our modeling indicate an increase in area, depth, and speed of the stream, increasing the risk of flooding in the lower areas of Los Comondú, BCS. Based on our modeling's results, measures should be promoted to safeguard the population and the economy of Los Comondú.

Key words: Climate change, floods, hydraulic modeling, rainfall analysis.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con el IPCC (2007), el cambio climático se refiere a las alteraciones en el estado del clima, que pueden ser identificadas por cambios en la media o variabilidad de sus propiedades y que persiste por un periodo extenso, típicamente décadas o más. UNFCCC (2007) lo atribuye directa o indirectamente a la actividad humana, la cual altera la composición global de la atmósfera y que es adicional a la variabilidad natural del clima observada en periodos comparables de tiempo. Independientemente de las variables que lo producen, resulta evidente (según datos de IPCC (2007) y UNFCCC (2007)) que en la mayor parte del planeta se está presentando un aumento en las temperaturas. Datos del IPCC (2007) sostienen que las regiones de Norteamérica, Groenlandia, África, Europa y Asia, han presentado (de 1970 a 2004) aumentos de temperatura de 0.2 hasta 3.5 °C. Meehl *et al.* (2007) afirmaron que como resultado del calentamiento global, el tipo, frecuencia e intensidad de eventos extremos como ciclones tropicales, inundaciones, sequías e intensas precipitaciones, aumentarán, aunados a incrementos de temperatura relativamente pequeños.

Para el caso de México, el IMTA (2010) presentó mapas con las precipitaciones esperadas en el contexto del cambio climático a escala regional en los cuales se observan anomalías de hasta -45% en las precipitaciones invernales y de -35 a -40% para las veraniegas hacia el año 2098. Christensen *et al.* (2007) pronosticaron para la península de Baja California disminuciones en la precipitación media anual de 5 a 10%; a su vez, Gay *et al.* (2006) propusieron variaciones de precipitación de entre -3% y -9% para el año 2050. Por su parte, el INE (2012) pronosticó que la precipitación total anual disminuirá hacia el 2020 entre 0 y 15% y para el 2080 entre 5 y 20%, en tanto que la temperatura media anual aumentará entre 2 y 4 °C para el mismo periodo.

Aun cuando los modelos numéricos (modelo global de circulación general de la atmósfera (AGCM, por sus siglas en inglés) en el Módulo de Variabilidad Climática Regional, el modelo norteamericano del Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL-R30), modelo del Canadian Climate Center (CCCM), entre otros, muestran una tendencia hacia escenarios de sequía en general para la península de Baja California, los datos registrados por las estaciones meteorológicas localizadas dentro de la cuenca de los Comondú y la Purísima, obtenidos del SMN (2012b, 2012c) indican una tendencia a la alza en la frecuencia de precipitaciones extremas. Para el caso de la región de los Comondú el riesgo es evidente, toda vez que la población y su zona rural se encuentran ubicados en el lecho y terrazas del arroyo con el mismo nombre, flanqueado por elevaciones topográficas hasta de 200 m por arriba de las zonas bajas, motivo por el cual es imprescindible conocer la respuesta del arroyo ante eventos extremos de precipitación con el fin de promover medidas que permitan salvaguardar a la población y la economía del lugar.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. La región de los Comondú se encuentra conformada por dos poblaciones principales: San José y San Miguel de Comondú, cuyas zonas urbanas y rurales se encuentran ubicadas en una cañada de aproximadamente 16 km de longitud y 800 m de ancho. Los habitantes de ambas poblaciones se dedican a la ganadería y agricultura principalmente. La región se localiza 135 km al norte de Ciudad Cons-

titución, por la carretera Ciudad Insurgentes, BCS. Desde la ciudad de Loreto se puede acceder a los Comondú a través de una brecha que los conecta con el poblado de San Javier (Fig. 1). La región de los Comondú se encuentra ubicada dentro de la cuenca Mezquital-Comondú, con 5001.11 km² de área y cuyo principal afluente es el arroyo Comondú. INEGI (1996) propuso un coeficiente de escurrimiento para el área de estudio de 0 a 5% en las zonas bajas y 5 a 10% en los zonas serranas.

La sierra La Giganta está constituida principalmente por rocas extrusivas y epiclásticas del Mioceno pertenecientes a la formación Comondú (Heim *et al.*, 1922); presenta rocas volcánicas de composición andesítica y tobas riolíticas (Hausback, 1984) con algunas alternancias de estratos epiclásticos (Aranda-Gómez & Pérez Venzor, 1988). Hacia el norte de los Comondú se manifiestan una serie de aparatos volcánicos que originaron derrames de composición basáltica (SGM, 2000) y fueron fechados por Sawlan y Smith (1984) en 3.59 +/- 0.12 ma que cubren discordantemente a la formación Comondú. Hacia el noreste de los Comondú se pueden apreciar claramente algunos de dichos eventos volcánicos, producidos por un derrame basáltico que bloqueó las antiguas corrientes que bajaban de la sierra La Giganta, dando origen a un total de once lagunas temporales, localmente llamadas llanos. Hacia el oeste, las rocas de la citada formación tienden a estar cubiertas por secuencias de sedimentos poco consolidados a consolidados de edades que van del Pleistoceno al Holoceno. Los sedimentos no consolidados corresponden a depósitos aluviales y eólicos (INEGI, 1996).

Clima. De acuerdo con la clasificación climática desarrollada por Köppen (1936), en el área predominan dos tipos de clima: en la cuenca, un clima muy árido y semicálido tipo BWh(x'), con una temperatura media anual entre 18 y 20 °C. La temperatura del mes más frío es menor a 18 °C; mientras que en las zonas bajas cerca de la desembocadura, predomina un clima muy árido y cálido tipo BW(h')(x'), con una temperatura media anual de 22.6 °C. La temperatura media mensual varía de 17.6 °C en enero a 28.6 °C en agosto (García & CONABIO, 1998; SMN, 2013b).

Las lluvias en el estado de Baja California Sur ocurren principalmente en verano debido al efecto de ciclones tropicales y en menor grado en invierno. Según CONAGUA (2015), la proporción entre las lluvias veraniegas e invernales es de 70 y 30%, respectivamente. En la estación climatológica "Comondú" se registran en promedio 170.7 mm de precipitación al año, 1466.1 mm de evaporación potencial anual y 3.7 días con neblinas (SMN, 2013b). El mes con mayor precipitación es septiembre con 45.05 mm en promedio y la menor precipitación corresponde a junio con sólo 0.18 mm (SMN, 2013b). En la Figura 2 se presenta el valor máximo anual de la precipitación ocurrida en 24 horas (SMN, 2012a). En

la década 2000-2010 la precipitación diaria máxima observada alcanzó casi 240 mm, mientras que en las siete décadas anteriores ningún registro llegó a 90 mm.

Vegetación riparia. La vegetación riparia en el arroyo Comondú corresponde a dos asociaciones nativas y a cultivos: en el palmar domina *Washingtonia robusta* H. Wendland (palma real), acompañada por especies como *Vallesia glabra* (Cav.) Link (otatave); *Acacia farnesiana* (Linnaeus) Willdenow; *Ambrosia ambrosioides* (Cav.) W.W. Payne y *Cercidium praecox* (Ruiz & Pav.) Harms (palo brea) (Jiménez & Salinas, 2007). La segunda asociación nativa se integra por dos gramíneas ar-

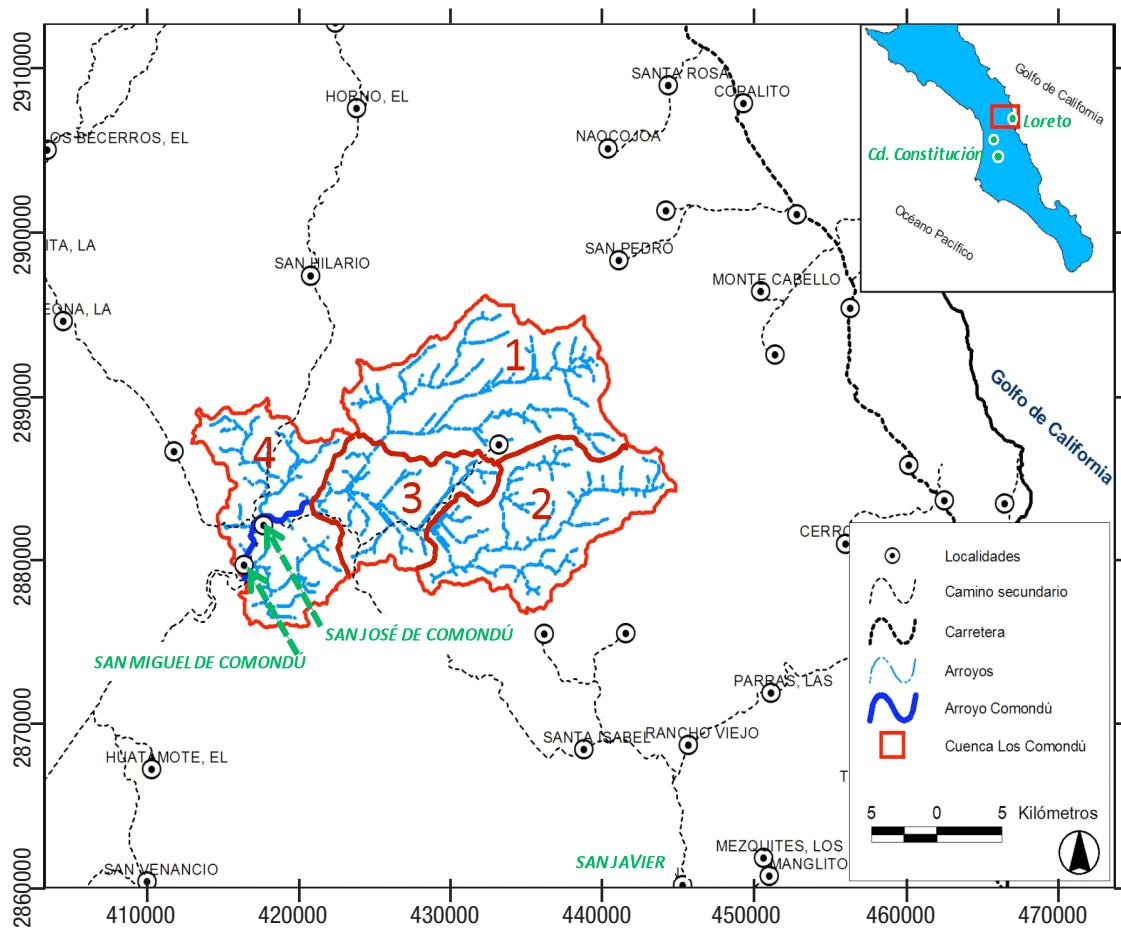


Figura 1. Localización del área de estudio (entre San José y San Miguel de Comondú, BCS., México) y del sistema de drenaje superficial.

bustivas denominadas comúnmente carrizos (*Phragmites communis* Trin. y *Arundo donax* Linneo) que se establecen en la orilla del cuerpo de agua y que se acompañan por otras hierbas acuáticas, principalmente de la familia de las ciperáceas y otras gramíneas (Jiménez & Salinas, 2007).

Además existen áreas de cultivo donde dominan el dátil (*Phoenix dactylifera* Linneo), el mango (*Mangifera indica*, Linneo) y diversos cítricos (*Citrus spp.*) que representan especies perennes de la herencia de los cultivos introducidos por los misioneros jesuitas (1697-1768) (Ortega Santos, 2015). Routson (2012) presentó un listado (levantado en enero del 2010) del área cultivada total de 65.6 ha, donde reconoció a 19 especies introducidas por la misión San José de Comondú de un total de 42 especies de cultivos perennes, pertenecientes a diecinueve familias. Sólo en pocos lugares de la península se conservó la vegetación introducida por los misioneros; las inundaciones pueden provocar su desaparición del oasis.

La vegetación circundante del oasis corresponde al matorral sarcocauale; entre los elementos relevantes de su elenco florístico se puede mencionar a *Olneya tesota* A. Gray 1855 (Fabaceae) y *Amoreuxia palmatifida* Moc. et Sessé ex DC., Prodr. 2: 638–639. 1825. (Cochlos-

permaceae), por ser especies incluidas en la NOM-059, así como *Cylindropuntia alcahes* var. *gigantensis* F. A. C. Weber 1895 (Cactaceae) (Jiménez & Salinas, 2007).

Para la realización de los cálculos requeridos para el análisis de las respuestas del sistema hidrológico al cambio climático, el trabajo se realizó en tres etapas:

1. Cálculo de la precipitación por medio del programa estadístico AX (Ajuste de Función de Probabilidad) para distintos períodos de retorno (Jiménez Espinosa *et al.*, 1997).
2. Cálculo de los volúmenes y caudales que arriban aguas arriba del oasis con el modelo hidrológico HEC-1, lo cual simula los procesos de precipitación-escorrimiento superficial de los sistemas de cuencas dendríticas (USACE, 1990).
3. Determinación de las zonas de inundación con el modelo hidráulico HEC-RAS, modelo unidimensional empleado para cálculos hidráulicos y perfiles de agua superficial (USACE, 2010).

Análisis numérico. Para el análisis de la precipitación se tomó en consideración la estación climatológica “Comondú” (3008), localizada dentro

del poblado de San José de Comondú y operada por el Servicio Meteorológico Nacional. Según la base de datos de SMN (2012a), la estación climatológica se encuentra a una altura de 300 m sobre el nivel del mar. Los registros del clima iniciaron en el año 1938 y han permitido contar con información de variables relevantes para analizar los procesos ambientales en la zona. La forma más común de representar el carácter probabilístico de las precipitaciones es en términos de un periodo de retorno (recurrencia), que se interpreta como el lapso que en promedio transcurre entre la ocurrencia de fenómenos de cierta intensidad. Para dicho efecto, se realizó un análisis estadístico de la estación meteorológica Comondú, con la finalidad de definir las lluvias máximas esperadas en diferentes períodos de retorno para determinar los caudales correspondientes a los períodos de retorno de 20, 50, 100, 500 y 1000 años.

El análisis estadístico se realizó utilizando el Software AX en su versión 1.05, elaborado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) y la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (Jiménez Espinosa, et al., 1997). Dicho programa ajusta distintas funciones de probabilidad a muestras de datos y calcula el error estándar de cada una de las mismas respecto a las de la muestra de estudio. A partir de las condiciones climáticas de la región, se definió el método Doble Gumbel como el más adecuado para su aplicación al modelo, porque considera la precipitación como una mezcla constituida por precipitaciones convectivas y de origen ciclónico (Yáñez-Bautista, 2012). Una vez identificados los tiempos de retorno se utilizó el modelo HEC-1 para calcular los escurrimientos en respuesta a la precipitación sobre la cuenca hidrológica, que el modelo representa como un sistema de elementos hidrológicos interconectados. Los elementos incluyen subcuenca, uniones o confluencia de cauces, reservorios, fuentes y derivaciones, para los cuales se asignan atributos y parámetros. HEC-1 es un programa numérico de modelación de cuencas que contiene varios métodos, con los cuales se simulan escurrimientos superficiales y flujos en sistemas río-reservorios. El modelo hidrológico aunado a la estimación del posible daño por inundación provee las bases para la evaluación de proyectos de control de inundaciones (Feldman & Goldman, 1981). El resultado del proceso de modelación es el cálculo de hidrogramas hipotéticos de escurrimiento para una localidad específica. Para calcular el tiempo de retraso (el

intervalo de tiempo entre el centro de masa de la lluvia en exceso y el máximo flujo resultante), se utilizó el método Tulsa Rural (USACE, 1990), el cual se expresa con la siguiente fórmula:

$$T_{LAG} = Ct * \left[\frac{L * Lca}{\sqrt{S}} \right]^M$$

Dónde:

T_{LAG} = Tiempo de retraso (horas).

Ct = Coeficiente adimensional (varía entre 1.8 y 2.2, dependiendo del gradiente del terreno).

L = Longitud de la cuenca (millas).

Lca = Longitud al centroide (millas).

M = Coeficiente de poder, en este caso 0.3 (ver Taylor & Schwarz, 1952).

S = Pendiente de la línea de flujo máximo (pies / millas).

Los análisis hidrológico e hidráulico fueron realizados por medio de los programas HEC-1 y HEC-RAS (USACE, 1990, 2010). El modelo digital de elevaciones (MDE) fue generado por medio de datos topográficos en ASTER GDEM con el fin de definir zonas de inundación con escenarios de lluvias extremas. ASTER es un instrumento satelital de imágenes construido por el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI) y operado por la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio de los EE. UU. Las imágenes son recopiladas en 14 bandas espectrales a través de tres telescopios separados y sistemas de sensores. ASTER GDEM es producido mediante el procesamiento automático de las 1.5 millones de imágenes disponibles en la base de datos ASTER, incluyendo la correlación estereográfica para producir escenas individuales denominadas ASTER GDEM Masking de nubes con el fin de remover los pixeles que éstas representan, y así facilitar la remoción de interferencias y la corrección de valores incompletos (NASA, 2009). El modelo digital de elevaciones (MDE) generado con base al ASTER GDEM tiene una resolución nominal de 30 m en planimetría y brinda resultados satisfactorios para la modelación hidrodinámica (Werner, 2001; Wang, 2012).

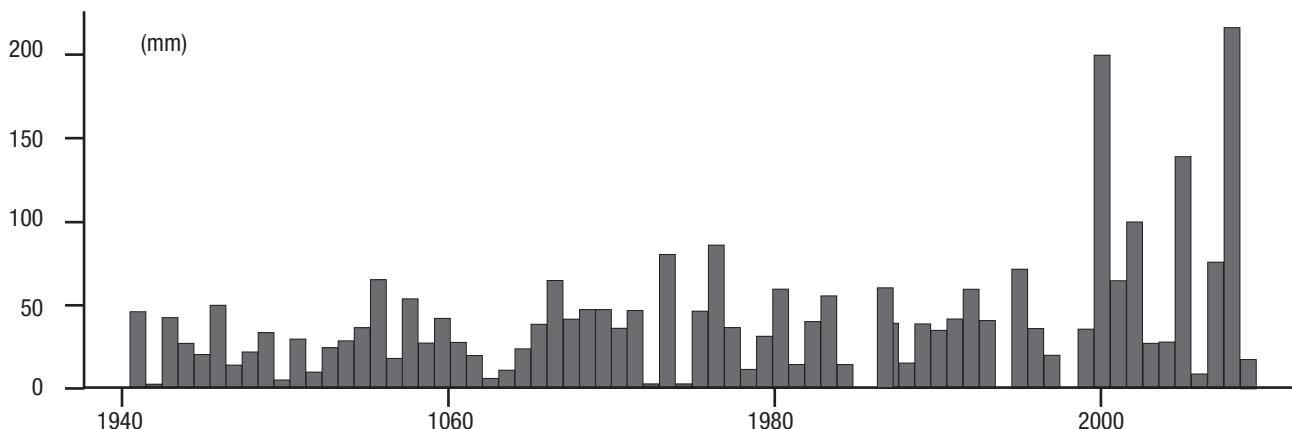
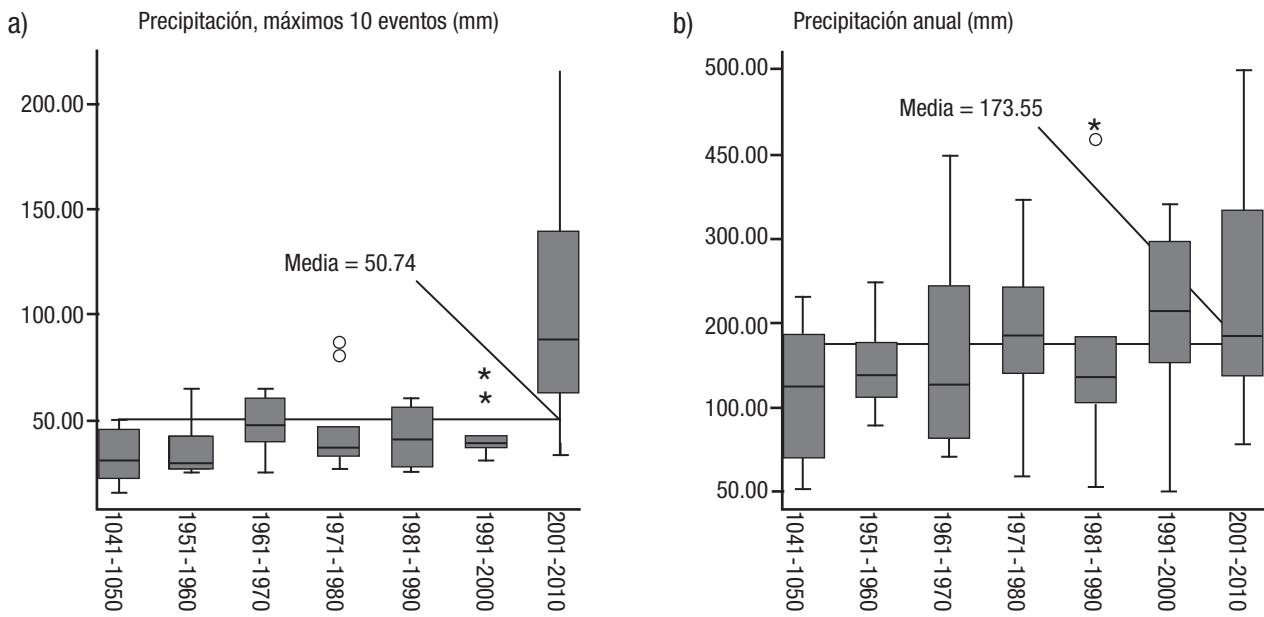


Figura 2. Promedio diario y máximo de precipitación en 24 horas por década-mes (registrado en la estación meteorológica 3008 Comondú, BCS., México); datos tomados de SMN (2012a).



Figuras 3a-b. a) Diez precipitaciones máximas (en 24 horas) por década representada en un diagrama de caja (box plot). b) Precipitación total anual, representada en un diagrama de caja (box plot).

Se utilizó el programa de parametrización topográfica TOPAZ (Garbrecht & Martz, 1997) para la delimitación de las cuencas hidrográficas, el cálculo de los parámetros morfométricos y la definición de redes de drenaje. TOPAZ es una herramienta de análisis que provee procesamiento y evaluación de DEM en formato raster para identificar rasgos topográficos (Martz, 2002). Se generó asimismo la planta topográfica refinada para el área del arroyo, sobre la cual se definieron secciones perpendiculares a la línea de flujo del arroyo, rasgo indispensable para la modelación hidráulica. La integración de los datos generados se realizó mediante el modelo hidráulico HEC-RAS (Hydrologic Engineering Centers River Analysis System), un software integrado que permite realizar simulaciones hidráulicas unidimensionales para flujos de corrientes permanentes y variables (USACE, 2010). Mediante dicho software se puede modelar el comportamiento de un escurreimiento en respuesta

a la topografía, puentes, bordos y presas. El modelo HEC-RAS usa como base la Fórmula de Manning:

$$Q = \frac{1}{n} * Rh^{0.666} * \sqrt{S} * A$$

Donde:

Q = Gasto real máximo, m³/s.

S = Pendiente.

Rh = Radio Hidráulico (Área/Perímetro mojado), m.

A = Área (sección transversal), m².

n = Coeficiente de rugosidad Manning, en este estudio se utilizó n = 0.033.

Tabla 1. Parámetros morfométricos de la Cuenca Mesquital-Comondú, Baja California Sur, México y de sus subcuenas.

| | Área (km ²) | Pendiente | Longitud ^{*)} (km) | Factor forma | Sinuosidad | Elevación media (m.s.n.m.) |
|---|-------------------------|-----------|-----------------------------|--------------|------------|----------------------------|
| Subcuenca 1 | 120.3 | 0.26 | 16.577 | 2.28 | 1.08 | 626.4 |
| Subcuenca 2 | 59.6 | 0.13 | 11.851 | 2.36 | 1.19 | 522.3 |
| Subcuenca 3 | 108.7 | 0.30 | 16819.7 | 2.60 | 1.32 | 716.4 |
| Subcuenca 1, 2, 3 entrada al arroyo Comondú | 288.6 | 0.25 | 45.2 | 2.42 | 1.19 | 638.8 |
| Subcuenca 4 | 88.4 | 0.13 | 11.3 | 1.45 | 1.42 | 488 |
| Subcuenca 1, 2, 3, 4 después del arroyo Comondú | 377.0 | 0.22 | 56.5 | 2.19 | 1.25 | 603.4 |
| Toda la cuenca Comondú | 853.2 | 0.15 | 135.5 | 3.17 | 1.58 | 513.9 |

^{*)} Longitud del cauce principal (km)

Tabla 2. Datos resultantes del análisis climático (estación meteorológica 3008 Comondú (BCS, México) y modelación hidráulica entre San José y San Miguel de Comondú.

| Tiempo de retorno (años) | Precipitación (mm) | Escurrimiento (m³/s) | Escurrimiento (millones de m³) | Área inundada (km²) | Aumento del área de inundación (%) |
|--------------------------|--------------------|----------------------|--------------------------------|---------------------|------------------------------------|
| 10 | 92.15 | 382.7 | 9.981 | 0.930 | 10.1 |
| 20 | 116.18 | 607.2 | 15.837 | 1.031 | 22.0 |
| 50 | 147.22 | 930.1 | 24.259 | 1.093 | 29.3 |
| 100 | 170.29 | 1186.8 | 30.954 | 1.132 | 34.0 |
| 500 | 223.26 | 1811.4 | 47.247 | 1.206 | 42.7 |
| 1000 | 245.12 | 2221.3 | 57.233 | 1.244 | 47.2 |

Para la delimitación de áreas inundables se realizaron los siguientes pasos: para la preparación geométrica del modelo se empleó la extensión GEO-RAS, creando una red triangular (TIN) mediante curvas de nivel a 1 m de equidistancia. Se definió el cauce principal, la dirección de flujo, secciones transversales cada 50 m para el cauce principal, los bordos y límites del arroyo. Una vez construidas las geometrías se ingresaron los escurrimientos generados por el modelo HEC-1, el cual se ejecutó en modalidad supercrítica. Con la información obtenida se definieron las zonas de inundación para cada tiempo de retorno. Los mapas resultantes se presentan en la Figura 6.

RESULTADOS

En la Tabla 1 se presentan los parámetros morfométricos, obtenidos por medio del programa TOPAZ para la cuenca Comondú y las subcuencas 1, 2, 3 y 4 (Fig. 1). Al inicio del arroyo Comondú se observa (subcuencas 1,2,3) una pendiente media del cauce principal de 25%, lo cual indica un relieve escarpado (con excepción de la subcuenca 2) que propicia altas velocidades del caudal en caso de tormentas al ingresar al arroyo Comondú (subcuenca 4).

En la Figura 3a se presenta en un diagrama de caja (*boxplot*) las diez precipitaciones máximas (en 24 horas) por década y en la Figura 3b

la precipitación diaria máxima, analizada por décadas. Según los datos del SMN (2012c), la precipitación máxima diaria refleja un aumento en la intensidad de lluvias observadas en la última década (2001-2010), en comparación con las precipitaciones de las seis décadas anteriores.

Las lluvias más intensas ocurren en el verano, entre los meses de agosto y octubre, corroborando la proporción entre lluvias veraniegas e invernales definida por CNA (2002). Aunque la temporada de huracanes empieza para la región en mayo y termina en noviembre, las lluvias más intensas ocurren entre agosto y octubre (57%), mientras que las invernales entre diciembre y enero (38%). De acuerdo con el SMN (2013a), las tres lluvias más intensas de la última década ocurrieron en los años 2006, 2001 y 2009 siempre en septiembre y fueron de 140, 200 y 217 mm (Fig. 2). De los cálculos de tiempos de retorno, utilizando las bases de datos de precipitaciones diarias de SMN (2012b), se obtuvieron los valores que se muestran en la Tabla 2.

Comparados el análisis estadístico y el cálculo de tiempo de retorno, resulta evidente que los eventos extremos de precipitación (en 24 horas) sugieren una tendencia al alza que los acerca a los tiempos de retorno de 1000 años. Para el caso de la estación meteorológica Comondú, la precipitaciones de 200 y 217 mm, registrados en 2001 y 2009, estuvieron a sólo 45 y 28 mm por debajo del evento calculado para 1000 años. De seguir las tendencias pronosticadas, los datos es-

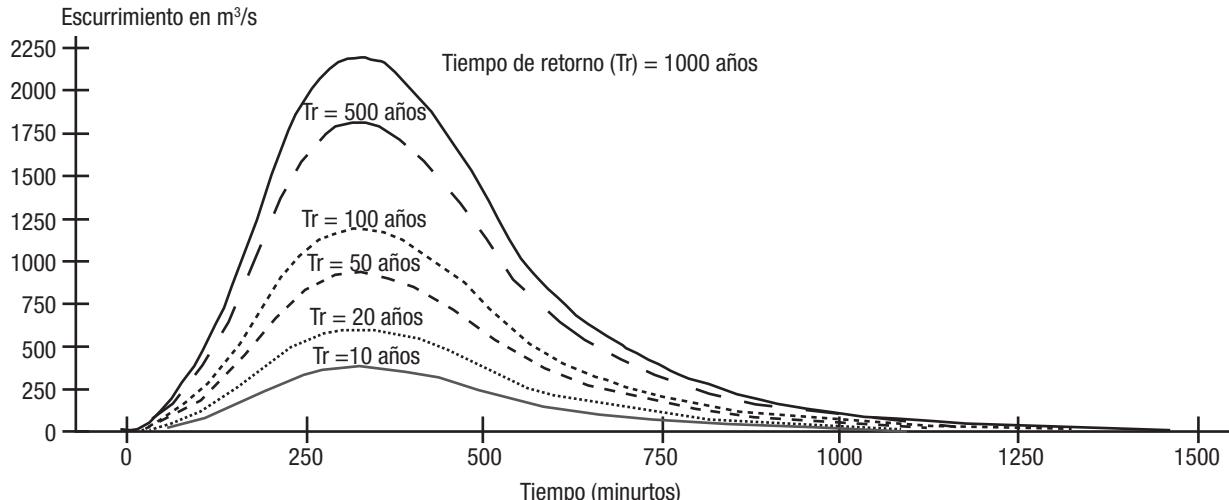
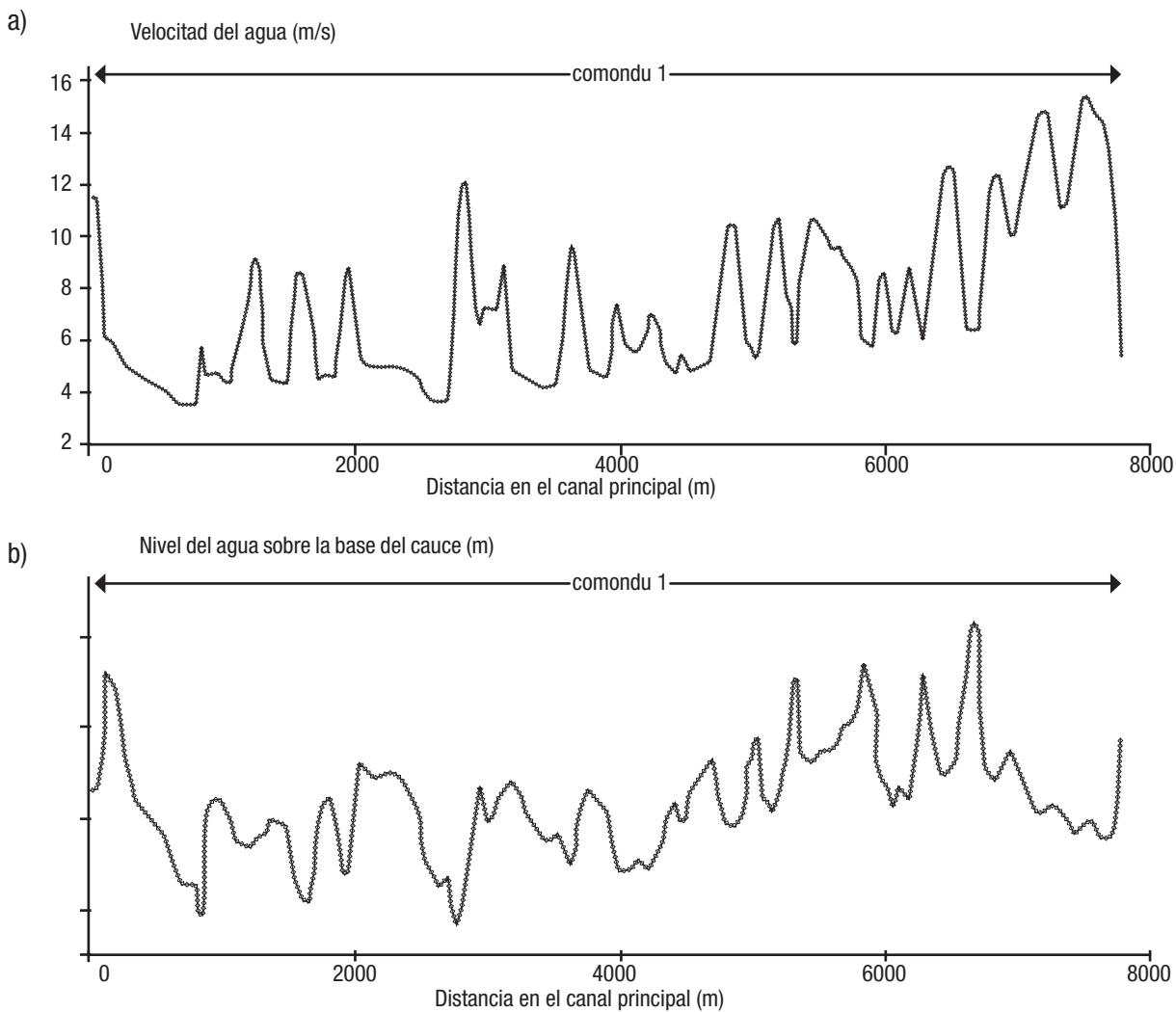


Figura 4. Hidrogramas resultantes de la modelación hidrológica a distintos tiempos de retorno (arroyo Comondú, aguas arriba de San José de Comondú, BCS., México).



Figuras 5a-b. a) Velocidad del agua (en m/s) alcanzada por el escurrimiento de 1000 años a lo largo del trayecto modelado (entre los manantiales de San José de Comondú y San Miguel de Comondú, BCS., México. b) Profundidad hidráulica alcanzada por el escurrimiento de 1000 años a lo largo del trayecto modelado (entre los manantiales de San José de Comondú y San Miguel de Comondú).

tudiados indicarían que en un periodo de tiempo relativamente corto, se pudiera presentar una mayor frecuencia de eventos similares o inclusive por encima del evento de 1000 años. Lo antes expuesto implica que un incremento importante de los caudales conllevaría mayor riesgo de las zonas de inundación, las cuales en el caso de la región de los Comondú se encuentran ocupadas por zonas urbanas y rurales. Los caudales resultantes del análisis hidrológico, calculados a partir de los tiempos de retorno con el modelo hidrológico, se muestran en la Tabla 2, por su parte, la Figura 4 muestra el hidrograma obtenido para cada uno de estos caudales.

Debido a la fisiografía característica del área de estudio, en la cual el arroyo se encuentra flanqueado por fuertes elevaciones topográficas, el impacto de un aumento del caudal en el arroyo se reflejaría con mayor intensidad en la magnitud del flujo superficial, velocidad y altura, que en un aumento del área de inundación (ver Tabla 2). Los caudales resultantes de los eventos simulados muestran un importante aumento

de los niveles en el drenaje de la cuenca. A partir del cálculo para un evento de 1000 años, las zonas más estrechas del cauce del arroyo Comondú alcanzarían velocidades de hasta 15 m s⁻¹ (Fig. 5a) y niveles hasta 4.2 m sobre el lecho del arroyo (Fig. 5b).

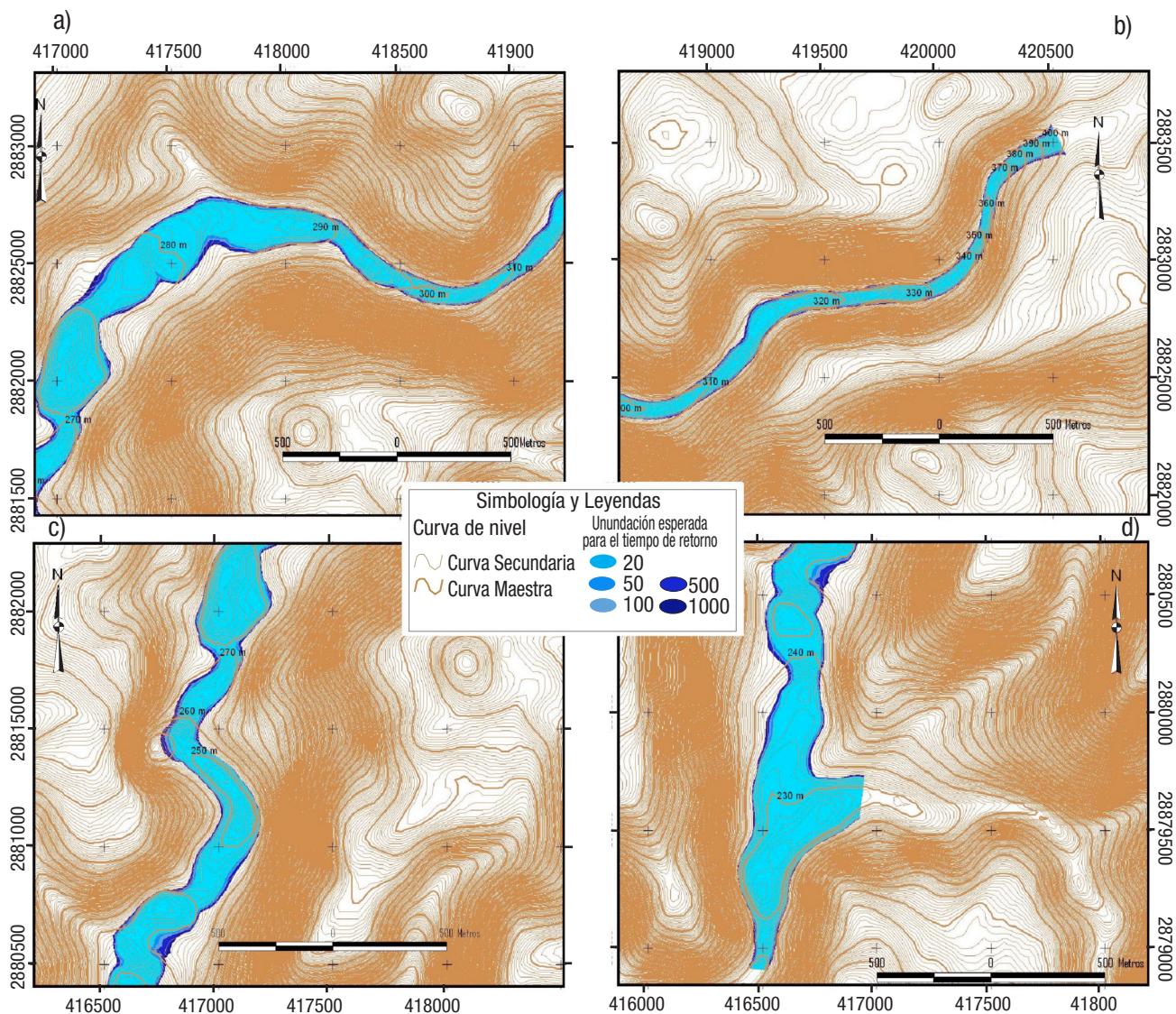
La Figura 6 muestra los efectos en el arroyo Comondú en un mapa ante diferentes eventos de precipitación, donde se puede apreciar que la respuesta del arroyo es de un incremento en el área de inundación. Al tomar como referencia un área de inundación de 0.845 km², lo cual corresponde a una lluvia máxima en 24 horas para un tiempo de retorno de 2 años (40 mm de lluvia), se aumentaría la zona afectada hasta 10.1% respecto al tiempo de retorno de 10 años, de 34.0% para 100 años, 42.7% para 500 años y 47.2% para 1000 años. La ocurrencia de un evento de 1000 años generaría importantes afectaciones en las poblaciones de los Comondú; según el mapa de la cañada del oasis propuesto por Tenza *et al.* (2013) se afectarían cerca de 86,864 m² en la zona urbana y 201,570 m² en la zona de cultivo.

DISCUSIÓN

El cambio climático, ya sea como un resultado de actividades antropogénicas o como parte de un ciclo natural, es un fenómeno real y medido que está ocurriendo a nivel global. Diversos modelos se han realizado con el fin de cuantificar por regiones los efectos del cambio climático. Para el caso de la región de estudio, los pronósticos elaborados por Christensen *et al.* (2007), Gay *et al.* (2006) e INE (2012), indican una tendencia a la sequía y disminución de la precipitación anual. Sin embargo, en los Comondú el promedio anual de precipitación presenta la tendencia a una ligera alza, lo que contrasta con el pronóstico de la precipitación por los modelos AGCM, GFDL-R30, CCCM (ver Introducción). En este contexto, los datos del SMN (2012c) reflejan un aumento significativo en la intensidad de lluvias extremas observadas en la última década (2001-2010), con respecto a las precipitaciones observadas en las seis décadas anteriores (Fig. 3). Este tipo de inconsistencias, al parecer, obedecen al nivel de detalle de los modelos, por lo cual se

requieren análisis y modelaciones hidráulicas a nivel local, con el fin de conocer a detalle la forma en la que el cambio climático se manifiesta en determinadas poblaciones y/o regiones.

Para el caso de los Comondú, se observa una clara tendencia a la alza en los datos de precipitación extrema de 24 horas, que se acercan al evento de los 1000 años, lo cual implica que el peligro de inundaciones en las zonas pobladas y de cultivos aumenta considerablemente. La falta de mediciones actuales del escurrimiento en el estado de Baja California Sur dificulta un análisis preciso de los efectos del cambio climático. Por lo anterior, es de suma importancia medir los escurrimientos y continuar realizando modelos climáticos e hidráulicos para poder cuantificar los efectos locales que se pudieran esperar ante el fenómeno extremo de escurrimiento y así tomar las medidas adecuadas en lo científico, técnico, social y económico para proteger y salvaguardar a las poblaciones de esta región, con base en la incidencia, magnitud y precipitaciones de los ciclones.



Figuras 6a-d. Áreas de inundación según las seis escenarios en la región de Los Comondú, Baja California Sur, México. a) Zona entre los mananales y San José de Comondú. b) Área de San José de Comondú. c) Área entre San José de Comondú y San Miguel de Comondú. d) Área de San Miguel de Comondú.

REFERENCIAS

- ANONYMOUS. 2009. *Global DEM Validation; Summary Report*. In cooperation with NGA and other collaborators. METI (Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan), NASA (United States National Aeronautics and Space Administration) & USGS (U.S. Geological Survey). 28 p. Disponible en línea en: https://lpdaac.usgs.gov/sites/default/files/public/aster/docs/ASTER_GDEM_Validation_Summary_Report.pdf (consultado el 11/09/2013).
- ARANDA-GÓMEZ, J. & J. A. PÉREZ-VENZOR. 1988. Estudio geológico de Punta Coyotes, Baja California Sur: Universidad Nacional Autónoma de México. *Revista del Instituto de Geología* 7: 1-21.
- CONAGUA (COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA). 2015. Actualización de la disponibilidad de agua en el acuífero Santo Domingo estado de Baja California Sur. Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica, México, 29 p. Disponible en línea en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/102796/DR_0306.pdf. (consultado el 24 de marzo del 2016).
- CHRISTENSEN, J. H., B. HEWITSON, A. BUSUIOC, A. CHEN, X. GAO, I. HELD, R. JONES, R. K. KOLLI, W.-T. KWON, R. LAPRISE, V. MAGAÑA RUEDA, L. MEARN, C. G. MENÉNDEZ, J. RÄISÄNEN, A. RINK, A. SARR & P. WHETTON. 2007. Regional Climate Projections. In: Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor & H. L. Miller (eds.). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom. pp. 849-926
- FELDMAN, A. D., P. B. ELY & D. M. GOLDMAN. 1981. *The new HEC-1 Flood Hydrograph Package*. U.S Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering. Center, Davis, California. 34 p.
- GAY, C., C. CONDE, H. EAKIN, R. SEILER, M. VINOCUR & M. WEHBE. 2006. *Vulnerability and Adaptation to Climate Change: The Case of Farmers in Mexico and Argentina*. Reporte Final del proyecto: Assessments of Impacts and Adaptations to Climate Change (AIACC), LA-29. International START Secretariat. Washington, DC. EEUU. 173 p. Disponible en línea en: http://www.start.org/Projects/AIACC_Project/Final%20Reports/Final%20Reports/FinalRept_AIACC_LA29.pdf (consultado el 24 de marzo del 2016).
- GARBRECHT, J. & L. W. MARTZ. 1997. TOPAZ Version 1.20: An automated digital landscape analysis tool for topographic evaluation, drainage identification, watershed segmentation and subcatchment parameterization - Overview. Rep.#GRL 97-2, Grazinglands Research Laboratory, USDA, Agricultural ResearchService, El Reno, Oklahoma, 21 p.
- GARCÍA, E. & CONABIO (Comisión Nacional de Biodiversidad). 1998. Mapa de Climas; clasificación de Koppen, modificado por García. Escala 1:1,000,000. México.
- HAUSBACK, B. P. 1984. Cenozoic volcanic and tectonic evolution of Baja California Sur, México. *Geology of the Baja California Peninsula. Pacific Section SEPM*, Tulsa, United States 39: 219-236.
- HEIM, A. 1922. Notes on the Tertiary of southern Lower California. *Geologic Magazine* 59: 529-547.
- IMTA (INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA). 2010. *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México, ante el cambio climático. Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México, Volumen III*. 164 p. Disponible en línea en: https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/atlas-2016/files/assets/common/downloads/publication.pdf. (consultado el 24 de marzo del 2016).
- IVANOVA A. y A. E. GÁMEZ (Eds.).2012. *Plan estatal de Acción ante el Cambio Climático para Baja California Sur*. Disponible en línea en: http://spyde.bcs.gob.mx/cgds/files/proyectos/PEACC/foros/PLAN_ESTATAL_DE_ACCION_ANTE_EL_CAMBIO_CLIMATICO-BCS_documento_para_consulta_publica.pdf. (consultado el 24 de marzo del 2016).
- INEGI (INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA). 1996. *Estudio geohidrológico del estado de Baja California Sur*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía del estado de Baja California Sur. México. 179 p.
- JIMÉNEZ, F. E. J. & D. SALINAS. 2007. *Ficha informativa de los humedales de Ramsar (FIR)*. Versión 2006-2008. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Disponible en línea en: <ramsar.conanp.gob.mx/documentos/fichas/104.pdf> (consultado el 24 de marzo del 2016).
- JIMÉNEZ ESPINOSA, M., R. DOMINGUEZ MORA & M. CRUZ. 1997. *Manual de operación de los programas AX.exe y Carachid.exe (para hidrología)*. Centro Nacional de Protección de Desastres, Área de Riesgos Hidrométricos, 32 p.
- KÖPPEN, W. 1936. *Das geographische System der Klimate*. Bornträger Verlag, Berlin. 44 p.
- MARTZ, L. W. 2002. *SLURP-TOPAZ Overview and Applications*. Background Material for MAGS Model Training Workshop, 4-5 September 2002, York University, Toronto, Canada, 51 p.
- MEEHL, G. A., T. F. STOCKER, W. D. COLLINS, P. FRIEDLINGSTEIN, A. T. GAYE, J. M. GREGORY, A. KITOH, R. KNUTTI, J. M. MURPHY, A. NODA, S. C. B. RAPER, I. G. WATTISON, A. J. WEAVER & Z. -C. ZHAO. 2007. *Global Climate Projections*. In: Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (Eds.). 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom pp. 747-846.
- ORTEGA SANTOS, A. 2015. Diálogo de saberes ambientales entre Europa-América. Agroecosistemas oasisanos en Baja California Sur. XVIII-XX, *Asclepio* 67 (1): 76. DOI: 10.3989/asclepio.2015.02
- PACHAURI, R. K AND REISINGER, A. (Eds.). 2007. *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 p.
- ROUTSON, R. 2012. Conservation of agro-biodiversity in Baja California Oases. A Dissertation Submitted to the Faculty of the School of Geography and Development. Thesis for Degree of Doctor in Philosophy. The University of Arizona, Arizona, USA (2012), 417 p. Disponible en línea en: <http://arizona.openrepository.com/arizona/handle/10150/228179> (consultado el 24 de marzo de 2016).

- SAWLAN, M. G. & J. G. SMITH. 1984. Petrologic characteristics, age and tectonic setting of Neogene volcanic rocks in northern Baja California Sur, México. *Geology of the Baja California Peninsula. Pacific Section SEPM*, Tulsa, United States (39): 237-252.
- SGM (SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO). 2000. *Carta Geológico-Minera 1:250000 Clave G12-7-8, Villa Constitución, Baja California Sur, México*. Disponible en línea en: http://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/22_G12-7-8_GM.pdf (consultado el 5 de agosto de 2015).
- SMN (SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL). 2012a. *Estadística descriptiva de la estación meteorológica 3008 Comondú*. Disponible en línea en: <http://smn.cna.gob.mx/climatología/Estadística/3008.pdf> (consultado el 5 de agosto de 2013).
- SMN (SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL). 2012b. *Base de datos de precipitaciones, evaporación y temperaturas diarias de la estación meteorológica 3029 La Purísima*. Disponible en línea en: <http://smn.cna.gob.mx/climatología/Diarios/3028.txt> (consultado el 5 de agosto de 2013).
- SMN (SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL). 2012c. *Base de datos de precipitaciones, evaporación y temperaturas diarias de la estación meteorológica 3008 Comondú*. Disponible en línea en: <http://smn.cna.gob.mx/climatología/Diarios/3008.txt> (consultado el 5 de agosto de 2013).
- SMN (SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL). 2013a. *Normales climatológicas de la estación meteorológica 3008 Comondú*. Disponible en línea en: <http://smn.cna.gob.mx/climatología/Normales5110/NORMAL03008.TXT> (consultado el 3 de agosto de 2013).
- SMN (SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL). 2013b. *Base de datos climáticos mensuales de la estación meteorológica 3008 Comondú*. Disponible en línea en: <http://smn.cna.gob.mx/climatología/Mensuales/bcs/00003008.TXT> (consultado el 5 de agosto de 2013).
- TAYLOR, A. B. & H. E. SCHWARZ. 1952. Unit-Hydrograph Lag and Peak Flow Related to Basin Characteristics. *Transactions, American Geophysical Union* 33 (2): 235-246.
- TENZA, A., A. BRECEDA, M. CARIÑO, J. MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ & A. GIMÉNEZ. 2013. *Claves de sustentabilidad de agroecosistemas tradicionales basados en regadíos y ganadería extensiva en oasis de Baja California* (México). DOI: 10.13140/RG.2.1.1789.1920.
- UNFCCC (UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE). 2007. *Impacts, vulnerabilities and adaptation in developing countries*. United Nations Climate Change Secretariat, Bonn, Germany. 68 p.
- USACE (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS). 1990. *HEC-1. Flood. Hydrograph Package. User's Manual. Hydrologic*. Engineering Center, Davis, California, U.S.A. 24 p.
- USACE (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS). 2010. *User's manual for HEC-RAS Versión 4.1*. Hydrologic Engineering Center, Davis, California, U.S.A. 790 p. Disponible en línea en: http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_4.1_Reference_Manual.pdf. (consultado el 5 de agosto de 2013).
- WANG, W., X. YANG & T. YAO. 2012. Evaluation of ASTER GDEM and SRTM, and their Suitability in Hydraulic Modeling of a Glacial Lake Outburst Flood in Southeast Tibet. *Hydrological Processes* 26: 213-225. DOI: 10.1002/hyp.8127
- WERNER, M. G. F. 2001. Impact of Grid Size in GIS Based Flood Extent Mapping using a 1D Flow Model. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere* 26: 517-522. DOI: 10.1016/S1464-1909(01)00043-0
- YAÑEZ-BAUTISTA, S. 2012. Análisis de la precipitación y escurrimiento en cinco cuencas de la región hidrológica XI Grijalva-Villahermosa, contrastando métodos tradicionales con el modelo japonés de alta resolución. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura del IPN. México. 104 p. Disponible en línea en: <http://www.repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/7179> (consultado el 5 de agosto de 2013).