

Suelos, agua, inundaciones y cambio climático en zonas de karst: el caso de Quintana Roo, México

Pereira-Corona Alberto¹, Patricia Fragoso-Servón¹, Oscar Frausto-Martínez²

¹Universidad de Quintana Roo, División de Ciencias e Ingeniería, Departamento de Ciencias.
Boulevard Bahía s/n esquina Ignacio Comonfort, col. Del Bosque, C.P. 77019, Chetumal, Quintana Roo.
Alberto Pereira C.: apereira@uqroo.edu.mx

²Universidad de Quintana Roo, División de Desarrollo Sustentable, Departamento de Ciencias y Humanidades.
Av. Andrés Quintana Roo s/n, Col. San Gervasio, CP 77600, Cozumel, Quintana Roo.

Resumen

La gestión de riesgos implica la capacidad de establecer la probabilidad de manifestación de un peligro particular en un sitio determinado y, con base en ello, instrumentar acciones para impedir dicha manifestación o reducir la afectación a la población o los recursos de los que ella depende. Las inundaciones son resultado de un conjunto de factores que interactúan en un espacio dado, entre los cuales las características del suelo y subsuelo, la precipitación pluvial, la orografía y más recientemente las obras humanas, son fundamentales. Recientemente se ha empezado a estudiar y entender el cambio climático (CC); el comportamiento de la temperatura global es relativamente predecible, no así la precipitación pluvial. Desde el punto de vista de la planeación, es necesario prepararse para muy diferentes condiciones dada la incertidumbre de los escenarios de CC en cuanto a la precipitación. El objetivo del presente documento es presentar un modelo multicriterio con información geográfica para la identificación de zonas sujetas a inundaciones como resultado de la concurrencia de factores geológicos, geomorfológicos, edafológicos y climáticos. Mediante un SIG se evaluaron los sitios con mayor peligro de inundación en función de su orografía, edafología y proyecciones pluviométricas de acuerdo con los escenarios de CC usados. El mapa resultante fue contrastado con el registro histórico de inundaciones y precipitaciones pluviales de los últimos 20 años para verificar la certeza en la definición de las áreas en peligro de inundación; se sobrepuso la información de población por asentamiento para estimar la población expuesta y la probabilidad de afectación.

Los resultados muestran que el modelo y el mapa tienen una certeza cercana al 75% en la proyección de sitios con posibilidades de inundarse; ello permite priorizar la atención para los sitios con probabilidades mayores a 65%, enfocando los esfuerzos en las áreas donde el peligro es más probable y la población más vulnerable.

Abstract

TRisk management implies the ability to establish the probability of manifestation of a particular hazard in a given site and based on this, implement actions to prevent such manifestation or reduce the impact on the population or the resources on which it depends. Floods are the result of a set of factors that interact in a given space, among which the characteristics of soil and subsoil, rainfall, orography and, more recently, human works are fundamental. Recently we have begun to study and understand climate change (CC); the behavior of global temperature is relatively predictable, but not rainfall. From the point of view of planning, it is necessary to be prepared for very different conditions given the uncertainty of CC scenarios in terms of precipitation. The objective of this paper is to present a multicriteria model with

geographic information for the identification of areas subject to floods because of the concurrence of geological, geomorphological, soil and climatic factors. Using a GIS sites most likely to be flooded for its topography, soil and rainfall projections per CC scenarios used they were evaluated. The resulting map was contrasted with the historical record of floods and rainfall of the last 20 years to verify the certainty in the definition of areas in danger of flooding; information on the population settlement was overlapped to estimate the exposure of the population and the chance of damages to occur.

The results show that the model and the map have a certainty close to 75% in the projection of sites with possibilities of flooding, allowing to prioritize the attention for sites with probabilities greater than 65%, focusing efforts in the areas where the danger is most likely and the population is most vulnerable.

Introducción

En el caso de la población humana, el riesgo, como producto de la probabilidad de manifestación de un peligro. La vulnerabilidad de la población o sistema expuesto a él no es un fenómeno natural, sino una construcción consecuente con los patrones de desarrollo de la misma y la ocupación de espacios en los cuales se manifiestan dichos peligros (Aven, 2008; Cardona, 2003; Cavazos, 2015).

La gestión moderna de riesgos implica la capacidad de medir o proyectar la probabilidad de que un conjunto de condiciones en un sitio determinado sea suficientemente grande como para ameritar la ejecución de acciones tendientes, ya sea a impedir la manifestación de un peligro específico o bien, a construir las condiciones para reducir la afectación a la población o los recursos de los que ella depende (Blaikie et al., 2014).

Las características del suelo y subsuelo, la precipitación pluvial, la orografía y más recientemente las obras humanas, son los principales factores que interactúan para dar como resultado inundaciones. Estas pueden tener diferente origen en función de la manifestación de los atributos mencionados. Particularmente, se tienen ya bien identificados por su velocidad como súbitas o paulatinas, o por los procesos de origen, ya sea por acumulación de precipitaciones, por desbordamiento de ríos y otros cuerpos de agua interiores, por las marejadas de tormenta en las zonas costeras, tal como lo refieren diferentes textos y trabajos de

Apel et al. (2004), CENAPRED (2009), Kundzewicz y Takeuchi (1999), Messner y Meyer (2006), Plate (2002) y Sayers et al. (2013), entre muchos otros. Sin embargo, hay procesos de inundación que no tienen su origen directo en ninguno de estos procesos individualmente, sino en una combinación de los mismos, junto con otros factores específicos del espacio geográfico, los cuales no han sido adecuadamente tipificados o descritos.

Las inundaciones derivadas de forzamientos en el comportamiento del agua subterránea han sido muy someramente descritas para otras regiones del planeta (Kreibich y Thielen, 2008) incluyendo aquellas con sistemas kársticos, como lo atestiguan estudios realizados en zonas kársticas de yeso en Inglaterra (Hughes et al., 2011; Robins y Finch, 2012) o karst de carbonatos en Francia (Jourde et al., 2014).

Si bien este trabajo no pretende llegar a la tipificación y descripción fina de estos fenómenos en la península de Yucatán, da cuenta de inundaciones que no tienen su origen directo en los procesos superficiales mencionados, sino que se encuentran íntimamente ligadas al comportamiento sinérgico de esos procesos con las aguas subterráneas en una zona kárstica de la península de Yucatán.

Desafortunadamente, como hacen notar Hughes et al. (2011) no hay ni métodos ni datos suficientes y adecuados para poder hacer una valoración del riesgo de inundaciones derivado de cambios en el comportamiento de las aguas subterráneas.

El cambio climático (CC) es un hecho que recientemente empezamos a estudiar y tratar de entender. Si bien el comportamiento de la temperatura global es relativamente predecible con las herramientas disponibles, no lo es así el de la precipitación pluvial (Conde Álvarez y Gay García, 2008; García, 2012; Golicher y Morales, 2004; Magaña et al., 1999; Petrișor, 2011; Tejeda-Martínez et al., 2008; Vörösmarty et al., 2013), de modo que desde el punto de vista de la planeación, es necesario prepararse para actuar en muy diferentes condiciones dada la incertidumbre de los escenarios de CC en cuanto a la precipitación pluvial (Amendola, 2004; Campos et al., 2014; Costanza, 2001; Lerer, 2008).

La gestión moderna de riesgos implica la capacidad de establecer la probabilidad de que un conjunto de condiciones permita la manifestación de un peligro en un sitio determinado y haga necesario intervenir para impedir la manifestación del peligro, o bien, construir las condiciones para reducir la afectación a la población o a los recursos de los que ella depende en caso necesario (mitigación de efectos).

Esta gestión del riesgo implica no solo conocer la probabilidad de que el peligro se manifieste, sino que involucra el poder localizar geográficamente

esa posibilidad y determinar las medidas o estrategias de acción más adecuadas para manejarlo en función de la población afectada y su vulnerabilidad.

Esta tarea se complica cuando los peligros están en extremos opuestos de la escala respecto a un mismo elemento o factor, como en el caso de las sequías y las inundaciones (Figura 1).

El objetivo de este trabajo fue determinar a partir de la información disponible de geomorfometría, edafología, precipitaciones, información de campo y los escenarios extremos de CC, las probabilidades de que se produzcan inundaciones en Quintana Roo, su ubicación y magnitud, para estimar las áreas y la población que puede resultar afectada.

Metodología

Mediante la superposición de las diferentes capas de datos en un sistema de información geográfica (SIG) se evaluaron los sitios con mayor probabilidad de inundarse en función de su orografía, edafología y proyecciones pluviométricas de acuerdo con los escenarios de CC usados.



Figura 1. Dos vistas del mismo espacio en el norte de Quintana Roo, la primera durante una sequía, la segunda durante una inundación. Fotos A. Pereira C.

La información orográfica fue derivada del Modelo Digital de Terreno (MDT) del INEGI (2013) con la técnica de Priego Santander et al. (2010) modificada por Fragoso-Servón et al. (2014), la cual permite la descripción geomorfométrica semiautomatizada de grandes espacios con escasa disección vertical.

La información geológica se derivó de la información cartográfica del INEGI (2000) en escala 1:250,000 por ser la única existente en una escala relativamente adecuada para el Estado y fue utilizada para calificar la información topográfica, geomorfométrica y edafológica generada en escala 1:50,000.

Para hacer comparables la información de fallas y fracturas en escala 1:50,000 generada por Oscar Frausto y Thomas Ihl (comunicación personal, 2014) y la información de depresiones kársticas y cuerpos de agua en la misma escala por Fragoso-Servón et al. (2014) se elaboraron por interpolación de datos, coberturas de la densidad por kilómetro cuadrado (considerando la extensión proporcional) de estos atributos para todo el Estado y se sobrepusieron en un SIG. El resultado ubica espacios en los cuales las densidades medias y altas de estos procesos coinciden.

Uno de los aspectos determinantes en la manifestación de este peligro radica en la naturaleza de los suelos y subsuelos sobre los cuales se acumulan las precipitaciones de modo que se incorporó como base edafológica el mapa de suelos 1:50,000 recientemente producido por Fragoso-Servón (2015).

Los escenarios de CC utilizados fueron los escenarios extremos de precipitación para el estado de Quintana Roo producidos para el Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático (PEACC; Pereira et al., 2013) los cuales ya presentan los escenarios extremos de sequías y de máximos de precipitación de acuerdo con Orellana et al. (2009) y los modelos internacionalmente aceptados para la

construcción de escenarios de CC con diferentes supuestos de comportamiento de la atmósfera (Pereira et al., 2013).

Toda la información cartográfica se utilizó en proyección Universal Transversa de Mercator para simplificar los procesos de análisis y el manejo de distancias y superficies asociadas a la evaluación del riesgo de inundación. El mapa resultante fue contrastado con el registro histórico de inundaciones de los últimos 20 años (reportes de CONAGUA, CAPA, periódicos, etc.) y con la información obtenida en campo mediante entrevistas para otros proyectos en los años de 1999, 2002, 2008 y 2010 (D.O.F., 2012; UQRoo, 2000 y 2004), para determinar la confiabilidad del mismo y establecer la probabilidad de inundación. Posteriormente se sobrepuso la información de población por asentamiento humano para estimar la población expuesta al peligro y la probabilidad de afectación.

Resultados y discusión

La construcción del modelo geomorfométrico al igual que otros estudios previos (Frausto e Ihl, 2008), muestra para el norte de Quintana Roo una serie de planicies escalonadas que se encuentran separadas por acumulaciones de materiales orientadas de manera aproximadamente perpendicular al radio que va desde la zona de deformación atribuida al impacto del meteorito de Chicxulub hacia el este sureste y aproximadamente paralelas a la dirección general de lo que se conoce como sistema de fracturas de Holbox.

El análisis de la densidad de fallas muestra tres áreas en las cuales se concentra una gran cantidad de eventos por unidad de superficie (Fragoso et al., 2014): una en la zona norte está asociada al sistema de fracturas de Holbox en altitudes de hasta 40 metros sobre nivel medio del mar (msnm) (Frausto e Ihl, 2008), otra hacia el centro del Estado en donde se inicia el ascenso hacia la parte alta del mismo con cotas

entre los 50 y 70 msnmm donde, de acuerdo con la información geológica disponible, afloran los contactos entre capas de diferente antigüedad para el Estado y otra al sur en la porción geológicamente más antigua del Estado.

Las manifestaciones externas a la karsticidad se concentran igualmente en tres áreas en el sur, donde se asocian con una orografía de mediana energía en la cual las formaciones principales son lomeríos mediana y fuertemente disecionados. Las formas de disolución en este caso se encuentran en los valles y hondonadas en las que la acumulación de escurrimientos superficiales incrementa la velocidad de disolución de la masa kárstica.

El resto es un sistema con variaciones en densidad, que corre desde la parte norte del Estado, en donde se encuentra asociado con el sistema de fallas de Holbox y que discurre en dirección norte-noreste a sur-suroeste hacia el punto de inicio de los acolinamientos en la cota, entre los 50 y 70 msnmm en la parte central y en la porción sur en zonas con lomeríos (Fragoso et al. 2014).

Cuando se califican las formaciones kársticas con los elementos geológicos (por fallamiento), son dos los espacios en los cuales claramente coinciden las mayores densidades por unidad de superficie para ambos procesos: el sistema de fracturas de Holbox en la parte norte y centro del Estado (Figura 2) presenta condiciones diferentes en cuanto a inundaciones, pues en el agrupamiento al norte sobre el sistema de fallas de Holbox las inundaciones se presentan principalmente por precipitaciones torrenciales, mientras que en la porción central del Estado, por precipitaciones en combinación con escurrimientos hacia los valles kársticos, aunque en menor cuantía.

El siguiente aspecto analizado se deriva de la combinación de la orografía con los tipos de suelo predominantes en la porción norte del Estado, que es en donde se hallaron los espacios

más amplios de coincidencia entre los procesos de fallamiento y de disolución kárstica, como lo reporta (Fragoso, 2015). Las estructuras orográfica (Figura 3) y geológica definidas como las depresiones kársticas y los sistemas de fallas y fracturas (Figura 2), aportaron información sobre las características del flujo de agua en las capas superiores del sustrato, permitiendo explicar los fenómenos de inundación por escurrimiento en la zona sur y aquellos derivados de precipitaciones pluviales intensas en el centro y el norte del Estado.

La velocidad de infiltración de las precipitaciones se ve influida también por la naturaleza del suelo que hay sobre ese basamento geológico con o sin fracturas y disoluciones. Así, los suelos más impermeables como los Gleysoles se encuentran asociados a sistemas o unidades litológicas que quedan sumergidas al menos por una parte del año, es decir, son sitios naturalmente inundables por la impermeabilidad del suelo; en el norte de Quintana Roo se encuentran asociados a los sistemas de humedales y otros espacios con inundaciones temporales o permanentes que coinciden con zonas que representan mínimos altitudinales locales en la estructura del terreno.

Para el caso de los sitios de interés, la cartografía de suelos muestra dominancia de Leptosoles (Fragoso, 2015); sin embargo, en los lugares en los que se forman depresiones, ya sea por procesos de disolución o por fractura del basamento rocoso, los suelos dominantes son Gleysoles que, al no alcanzar un mínimo de superficie en su cobertura respecto al área representada, no son reportados como suelos principales.

La verificación de los tipos de suelo a escalas mayores se tomó de los informes técnicos y el trabajo de campo realizados para la elaboración del programa de Ordenamiento Ecológico Territorial de la Zona Continental de Isla Mujeres (UQRoo, 2000) (datos de 1999), el Programa Estatal de Ordenamiento Territorial de Quintana Roo (UQRoo, 2004) (datos de 2002), el Programa de Ordenamiento Ecológico Local del Municipio

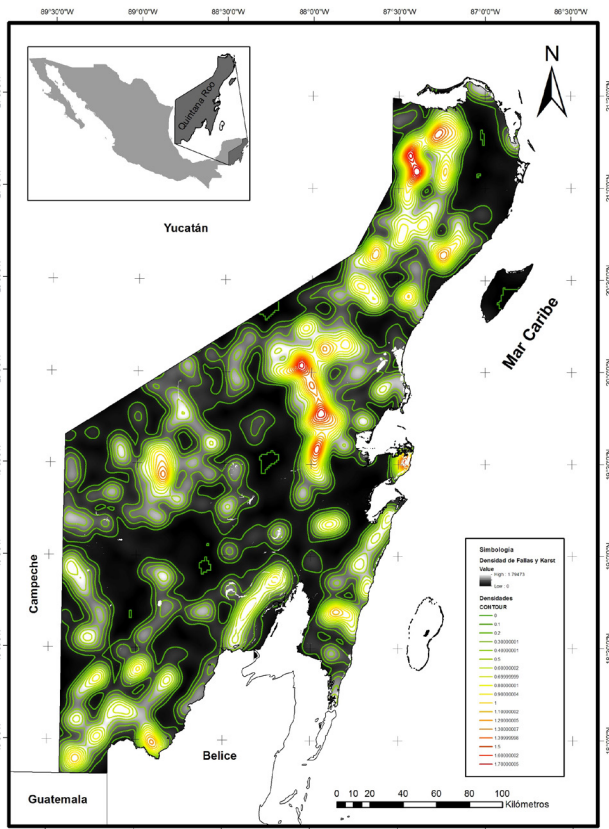


Figura 2. Mapa resultante de la combinación visual de la densidad de fallamientos y fracturas y la densidad de formaciones kársticas negativas en Quintana Roo.

de Lázaro Cárdenas (por decretarse) (datos de 2008) y el Programa de Ordenamiento Ecológico Marino y Regional del Golfo de México y Mar Caribe (D.O.F., 2012) (datos de 2010). Durante la realización de dichos ordenamientos se hicieron entrevistas en campo en localidades y poblados que se encuentran dentro de los espacios en los que confluyen los atributos mencionados de orografía, fallamiento y karsticidad. En dichas entrevistas los habitantes manifestaron que con frecuencia en la temporada de lluvias y de nortes se presentan inundaciones en los así llamados “bajos” sin que haya llovido en las cercanías. Igualmente, los entrevistados de la zona que se encuentra hacia Pac-Chen al sur-suroeste del sistema de fracturas de Holbox manifestaron que en muchas de esas ocasiones lo que sucede es que empieza a brotar agua del suelo provocando la inundación (Figura 4).

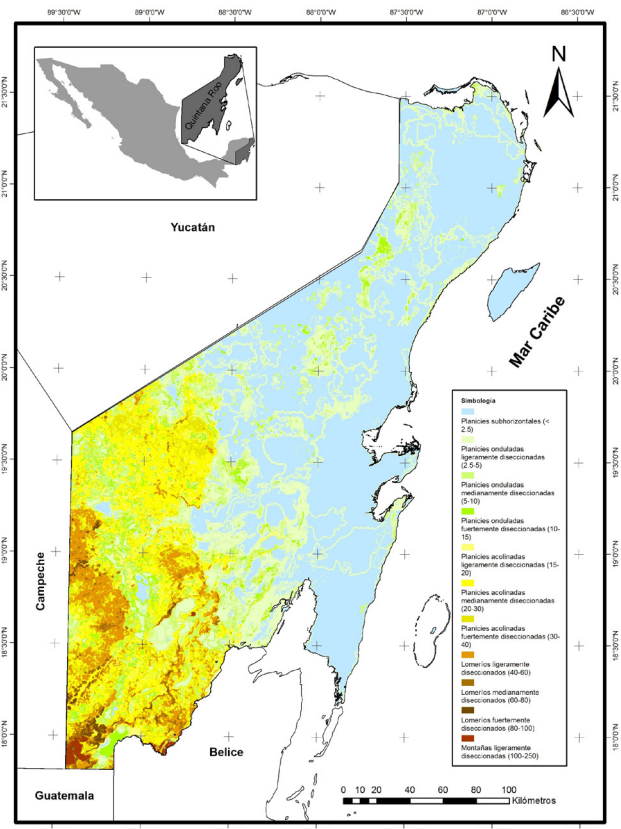


Figura 3. Estructura geomorfométrica de Quintana Roo. Elaboración propia.

Los elementos detectados en los trabajos mencionados en los párrafos anteriores hacen suponer que los procesos que están generando el forzamiento en el comportamiento del acuífero, responden a los tipos 1 y 4 de los mencionados por Hughes et al. (2011), es decir, precipitaciones muy intensas o prolongadas, o bien una configuración particular de las estructuras subterráneas que crea barreras y canaliza subsuperficialmente los aportes de zonas distantes hacia esos puntos de menor altura local antes mencionados, pudiendo muy posiblemente, ser una combinación de ambos.

Una revisión del terreno en dichos sitios mostró la abundancia de fracturas menores y procesos superficialmente pequeños de disolución kárstica, además de la presencia de materiales calcáreos superficiales intemperizados, consolidados y

parcialmente cementados conocidos como caliche o calcreto en las partes que rodean las depresiones y los poblados, frecuentemente debajo de una capa de suelos delgados de tipo Leptosol. Si bien se da por hecho que el caliche es una formación sedimentaria que se ha consolidado en un clima árido, la presencia de dichas formaciones inmediatamente por debajo de suelos delgados en la península de Yucatán ya se ha documentado anteriormente por otros autores como Bautista y Palacio (2005) y Sedov et al. (2008 y 2007), y bien podrían representar esa conformación particular del subsuelo que, al impedir la infiltración de las precipitaciones hacia capas más profundas de la masa kárstica favorece su desplazamiento de manera subsuperficial hacia los sitios de menor altura topográfica.

La intersección de las zonas en las que se manifiestan los atributos hasta ahora mencionados define el conjunto de sitios en los cuales esta inundación por aguas subterráneas puede presentarse.

Al combinar todos estos elementos se obtiene una zona al norte del Estado en donde se presenta una forma particular de inundación, en la cual no hay precipitaciones suficientes que la justifiquen, pues éstas se presentan más al norte o al oeste según testimonio de los habitantes de la zona (Figura 4).

Al comparar el mapa resultante con los registros históricos de reportes de inundaciones para la zona en la que confluyen los atributos estudiados, se obtuvo una alta coincidencia (superior al 70%) entre los poblados incluidos en la zona determinada como área de concurrencia de estos fenómenos y los reportes de poblados aislados por inundaciones en diferentes años desde 1996, como se muestra en sombreado gris de la Figura 4. El resultado anterior puede ligarse fácilmente con la gestión de riesgos, en este caso particular, con la prevención de daños y pérdidas en la población que habita esta zona por efecto de inundaciones, ya no solo por precipitaciones torrenciales in situ, sino también

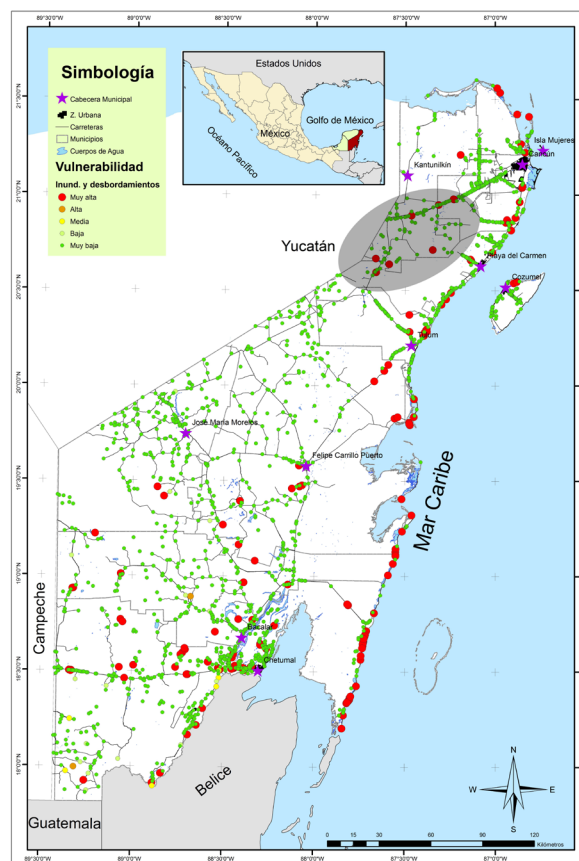


Figura 4. La zona sombreada muestra el área de Pac-chén, donde confluyen alta densidad de fallas y fracturas, alta densidad de formas kársticas negativas, presencia de caliches, suelos delgados y reportes de inundaciones por agua que surge del suelo en el norte de Quintana Roo. Elaboración propia.

por el efecto de precipitaciones cercanas que fluyen subsuperficialmente hacia la zona.

Desde el punto de vista de la planeación y la prevención de esos riesgos de inundación, se utilizaron los escenarios climáticos construidos por Orellana et al. (2009) para el Atlas de Cambio Climático de la Península de Yucatán considerando los dos escenarios más extremos en cuanto a precipitaciones pluviales.

Los escenarios climáticos extremos seleccionados muestran dos condiciones que permiten orientar los esfuerzos para la reducción de riesgos en la zona de interés. El primero de ellos (Figura 5) muestra una probabilidad media de que las precipitaciones para esa zona de la península

se incrementen pasando a conformar un clima más húmedo con aumento de las precipitaciones tanto en verano como en invierno, lo que significaría un mayor peligro de inundaciones. El segundo escenario extremo (Figura 6) muestra las condiciones en el supuesto de aridización de la península. En este caso las precipitaciones de verano serían complementadas con un ligero incremento en las precipitaciones invernales por efecto de los nortes, en cuyo caso las probabilidades de inundaciones se conservarían en los niveles actuales, mismos que ya obligan a tomar medidas para la protección de la población actualmente asentada en ese espacio (Pereira et al., 2013).

En la Tabla 1 se muestran las anomalías de precipitación registradas por las estaciones meteorológicas en la zona de estudio. Es de hacer notar que los años en los que se presentan estas anomalías coinciden con los años en que hay reportes para al menos un subconjunto de más de diez de los poblados que caen dentro de la zona más baja de la microcuenca. Coincidentemente, las estaciones que se encuentran al norte y al oeste de la zona en la que se presentan las inundaciones por aguas subterráneas están en los sitios topográficamente más altos de las microcuencas (Zona Alta), en tanto que las que se encuentran al este y al sur están a menor altura topográfica dentro de la zona.

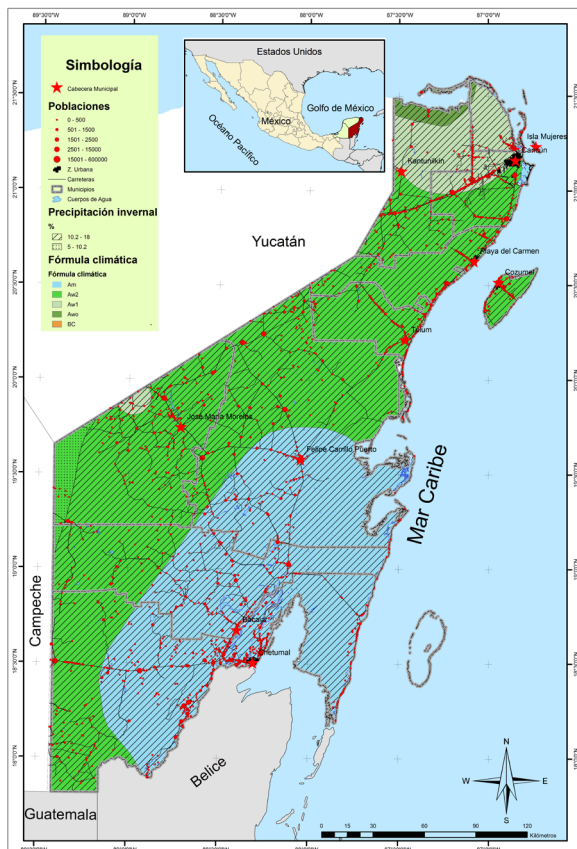


Figura 5. Escenario de cambio climático mostrando la zona que incrementaría sus precipitaciones. Fuente: Pereira C. et al. (2013) con base en datos vectoriales de Orellana et al. (2009).

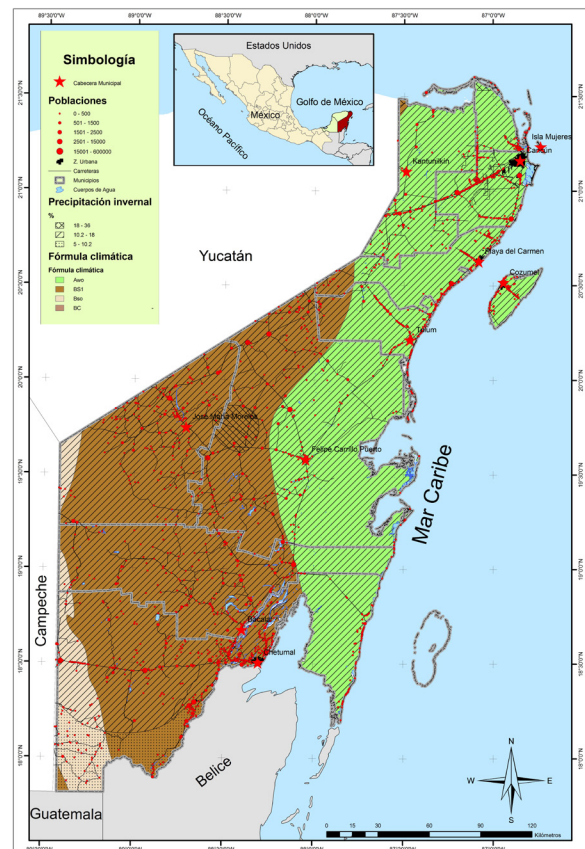


Figura 6. Escenario de cambio climático mostrando la zona que reduciría sus precipitaciones. Fuente: Pereira C. et al. (2013) con base en datos vectoriales de Orellana et al. (2009).

A partir de la información derivada de los escenarios seleccionados se construyó el mapa de peligros de inundación por incremento de las precipitaciones (Figura 7) el cual muestra que si bien en la zona específica no es de esperarse un incremento substancial en las mismas, el incremento en las zonas cercanas, particularmente al norte de la zona de interés, podría aumentar la frecuencia de aparición de estas inundaciones por agua subterránea en los sitios donde se registran mínimos altitudinales locales.

En la Tabla 2 se pueden ver los huracanes que han afectado Quintana Roo y la coincidencia casi completa que hay entre la presencia de eventos

con categoría de huracán y el incremento de precipitaciones, alcanzándose para dichos años de coincidencia los máximos mensuales y también varias de las precipitaciones máximas diarias, lo que puede indicar que estos fenómenos extremos son parte de la causa del forzamiento en el comportamiento del acuífero en esta zona.

La zona delimitada por el análisis abarca un total de 110 asentamientos en Quintana Roo y 19 en Yucatán. De estos 129, 65 se encuentran en las zonas más bajas o en el fondo de las microcuencas locales y de ellos, 48 (73% aproximadamente) han reportado inundaciones súbitas en diferentes años por aguas subterráneas ("agua que sale del suelo" - en palabras de los pobladores).

Tabla 1. Normales mensuales y extremas mensuales y diarias e3 precipitación en la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia con datos del smn.

Estación	Nombre	ELEMENTOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
23012	COBA														
	Zona Baja	NORMAL	52.7	38.2	40.4	59.9	99.7	138.2	106.5	152.3	194.4	134.9	66.4	36.6	1,120.20
Latitud	20°29'19" N.	MAXIMA MENSUAL	171	119.5	177.5	372.9	293.8	344.9	250.8	323.5	359.1	431.1	132.4	197.7	
Longitud	087°44'15" W.	AÑO DE MAXIMA	1994	2002	1990	2010	2001	1993	2005	2000	1994	1998	1997	1972	
Altura	5.0 MSNM.	MAXIMA DIARIA	60	78.7	69	103.8	112	100	87	86.7	84.8	80	117.3	78.3	
		FECHA MAXIMA DIARIA	01/1974	11/2008	19/1990	21/2010	27/2001	16/1993	21/2005	19/1973	03/1974	10/1995	30/2001	31/1972	
23027	VICTORIA														
	Zona Baja	NORMAL	60.3	49	46.7	53.3	119.7	183	113.2	167.3	207.9	180.1	88	60.1	1,328.60
Latitud	20°47'26" N.	MAXIMA MENSUAL	166.2	232.5	181	160.5	633.7	377	364.5	312.6	388.5	478.7	388.7	309.5	
Longitud	087°16'49" W.	AÑO DE MAXIMA	1998	2002	1987	1989	1984	1969	2010	2007	1995	2005	1997	1976	
Altura	5.0 MSNM.	MAXIMA DIARIA	114	61	90	85	99	160	160	112	150	305	114	81.2	
		FECHA MAXIMA DIARIA	10/2009	24/1990	23/1989	28/1993	03/1966	16/1982	05/2010	31/1973	14/1988	23/2005	02/2004	19/1976	
23157	IDEAL														
	Zona Alta	NORMAL	58.1	43.6	62	44.1	111.7	163.9	168.4	189.2	222.9	183.8	74.5	46.6	1,368.80
Latitud	20°52'56" N.	MAXIMA MENSUAL	151	176	296	166	285.9	349.5	289	412	335.8	496	225	118	
Longitud	087°32'47" W.	AÑO DE MAXIMA	1994	1997	1994	2004	1993	2010	2001	2000	1992	1995	1997	2004	
Altura	22.0 MSNM.	MAXIMA DIARIA	100	65	260	60	112	73.2	115	82	68	218.5	68	100	
		FECHA MAXIMA DIARIA	23/1995	22/1991	28/1994	12/2004	24/2003	10/2008	17/2005	05/2000	19/1998	23/2005	23/1997	23/2004	
23030	NUEVO XCAN														
	Zona Alta	NORMAL	52.9	42.2	45.2	55.4	100.4	137.9	125	156.4	180.5	128	67.8	54.3	1,146.00
Latitud	20°53'00" N.	MAXIMA MENSUAL	110	120	135	277.1	252	420	294.5	467	357	246	202	173.5	
Longitud	087°35'00" W.	AÑO DE MAXIMA	1978	1965	1969	1962	1974	1961	1989	1973	1963	1962	1968	1990	
Altura	26.0 MSNM.	MAXIMA DIARIA	47	80	60	101	120	120	108	123	104	140	69	100	
		FECHA MAXIMA DIARIA	11/1962	22/1965	21/1969	09/1962	22/1974	12/1965	29/1989	05/1990	17/1967	08/1971	15/1970	10/1966	
23011	KANTUNILKIN														
		NORMAL	46.2	39.5	43.2	50.7	112.8	192.4	177.6	195	224.3	170.6	70.2	44.8	1,367.30
Latitud	21°05'45" N.	MAXIMA MENSUAL	292	130	148	262	410.1	565.9	453.5	419	521.5	569.5	295.5	203.7	
Longitud	087°29'08" W.	AÑO DE MAXIMA	1988	2009	1993	1985	1984	1953	1989	2009	1988	2005	1988	1964	
Altura	15.0 MSNM.	MAXIMA DIARIA	100	120	98	90.5	110.5	365.8	174	131	248	310	120	62	
		FECHA MAXIMA DIARIA	10/1988	02/2009	07/1993	16/1966	28/2001	16/1982	29/1989	20/2009	30/1995	21/2005	21/1988	12/1964	
23023	SOLFERINO														
		NORMAL	51.5	41.6	32	48.3	93.8	167.5	157.8	162.4	209.3	142	82.3	54.2	1,242.70
Latitud	21°20'45" N.	MAXIMA MENSUAL	177.1	156.3	157.5	225.5	410.2	483.2	309.4	279.8	450	599.5	251.7	205.4	
Longitud	087°25'49" W.	AÑO DE MAXIMA	1983	2002	1981	1995	1984	1982	1989	1973	1995	2005	1988	1976	
Altura	14.0 MSNM.	MAXIMA DIARIA	95.2	108.5	104.4	160	145	111.5	175.5	84.7	164.8	300	180	70	
		FECHA MAXIMA DIARIA	15/1972	24/1974	08/1981	27/1995	27/1998	17/1993	29/1989	18/1973	09/1970	21/2005	20/1988	09/1978	
23014	LEONA VICARIO														
	Zona Baja	NORMAL	51.5	46.8	36	53.8	82.8	149.6	116.3	134.8	187.4	157.4	76	51.4	1,143.80
Latitud	20°59'18" N.	MAXIMA MENSUAL	117	257.6	137.6	271.3	218	566.8	230.3	308	487.2	418.4	243	199.5	
Longitud	087°12'16" W.	AÑO DE MAXIMA	1966	2007	1981	2010	1974	1982	1998	2007	1997	1999	1997	1964	
Altura	8.0 MSNM.	MAXIMA DIARIA	70	85.5	73.1	117	87	262.6	90	126	176	97.5	73	100	
		FECHA MAXIMA DIARIA	17/1991	28/1992	07/1981	14/2010	20/1973	16/1982	09/2010	24/1977	04/1974	03/2003	09/1975	27/2000	
31068	CHAN CENOTE														
	Zona Alta	NORMAL	38	39.3	41	51.9	79.7	160.1	184.6	174.9	191.1	139.1	62.2	46.1	1,208.00
Latitud	20°59'27" N.	MAXIMA MENSUAL	115	109	176.7	231	275.5	302.1	321.4	298.4	338	389.5	204.2	173.7	
Longitud	087°47'02" W.	AÑO DE MAXIMA	1994	1997	2004	1989	1984	1988	2005	1992	1991	2005	1991	1982	
Altura	30.0 MSNM.	MAXIMA DIARIA	60	61	149.2	105.4	80.1	95	140.5	94.3	100	156	74.2	88.7	
		FECHA MAXIMA DIARIA	03/1985	08/1985	19/2004	28/2004	24/2003	16/1994	17/2005	27/1980	14/1988	22/2005	11/1979	15/2005	

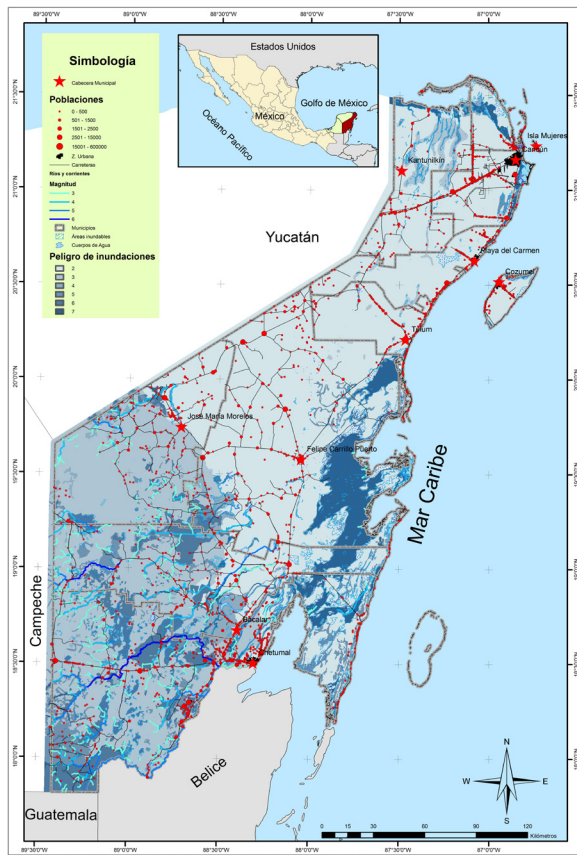


Figura 7. Escenario de cambio climático mostrando el peligro de inundaciones. Fuente: Pereira C. et al. (2013) con base en datos vectoriales de Orellana et al. (2009).

Dentro del área delimitada por el análisis se encuentran poblaciones con carácter urbano como son Leona Vicario y Nuevo Xcan donde la problemática no es tan grave por hallarse en sitios relativamente altos respecto al resto del área; además, ambos presentan grados de marginación relativamente bajos comparados con los demás asentamientos, que son eminentemente rurales y con grados de marginación altos y muy altos, lo que los hace más vulnerables.

La comparación de los sitios reportados con inundaciones súbitas por aguas subterráneas contra la zona delimitada con el análisis muestra una certeza cercana al 75% en la identificación de sitios con posibilidades de inundarse por este fenómeno. Ello permite establecer sitios prioritarios de atención para los cuales el mapa presenta probabilidades por encima de 65%

Tabla 2. Huracanes que han afectado Quintana Roo. Fuente: Elaboración propia.

Año	Nombre	Categoría
1995	Roxane	3
1998	Earl	t
1999	Katrina	t
2000	Gordon	t
2001	Chantal	t
2002	Isidoro	2
2003	Bill	d
	Larry	d
	Claudette	1
2004	Ivan	5
2005	Emily	5
	Wilma	5
2006		
2007	Dean	5
2008	Dolly	2
2009	Ida	2
2010	Karl	3
	Paula	2
2011	Don	t
	Rina	1
2012	Ernesto	2
2013	Karen	t
2014	Dolly	t

permitiendo enfocar los esfuerzos inicialmente de prevención y posteriormente de mitigación en las áreas en las cuales el peligro es más probable y la población es más vulnerable.

En total, considerando los 129 asentamientos, se tienen poco más de 25,000 personas en Quintana Roo expuestas a inundaciones por aguas subterráneas, de las cuales, poco menos de 15,000 se encuentran en los asentamientos de la parte baja de las microcuencas y expuestas con mayor probabilidad y frecuencia a dichas inundaciones que, en ocasiones, pueden aislar

los asentamientos involucrados por varios días y en casos extremos, más de una semana.

Esta investigación ha permitido establecer tres tipos de problemas que se presentan en el territorio que genéricamente son todos catalogados como inundaciones. Específicamente se ha detectado inundaciones por precipitación, por escurrimiento y problemas de inundación por afloramiento (que no habían sido reportados en México), que se presentan en sitios donde el material kárstico subyacente presenta procesos de hundimiento y fracturación extensos y que al mismo tiempo se encuentra formando un mínimo altitudinal local, lo que permite que el agua precipitada a varias decenas de kilómetros, al infiltrarse en las primeras capas del basamento, se desplace hacia estos sitios aflorando como si se tratara de manantiales provocando inundaciones importantes e imprevistas sin que haya precipitación en el sitio específico.

El razonamiento, considerando el relieve y la geología de la zona es el siguiente: para un sistema kárstico con un manto freático superficial, los sistemas de disolución (karsticidad), así como las fallas y fracturas representan, desde un punto de vista funcional, sitios en los cuales la infiltración de las precipitaciones tiene lugar a mayor velocidad dado que a la permeabilidad del medio se suman las discontinuidades formadas por los procesos de disolución y fallamiento.

No obstante, dicha permeabilidad incrementada no implica en manera alguna un flujo unidireccional. Por el contrario, se convierte en un sistema tanto de conducción como de alivio de la presión hidrostática para el acuífero subyacente, de forma semejante a lo descrito por Bonacci et al. (2006) en una zona kárstica de Croacia.

En estas condiciones, los sistemas fracturados en sitios de mayor altura relativa y que rodean esos valles kársticos en la parte más profunda de los escalonamientos descritos, reciben las precipitaciones y el líquido se moviliza entre la

capa de caliche superficial y la masa calcárea subyacente, que es menos porosa, de manera semejante a lo descrito para el caso de Francia en cuanto al origen de los forzamientos del acuífero por precipitaciones anormalmente abundantes (Jourde et al., 2014), desplazándose por gravedad hacia los puntos más bajos en donde la presión hidrostática lo obliga a fluir por los puntos de disolución y las fracturas con el gradiente de presión y contra la gravedad, es decir, hacia el exterior.

Tratando de aventurar una explicación más o menos fina del fenómeno, es posible inferir que cuando las precipitaciones que se presentan en zonas cercanas a este sitio son anormalmente abundantes (Hughes et al., 2011; Robins y Finch, 2012; Jourde et al., 2014) como las ocasionadas por los huracanes (Pereira et al., 2013 y Tablas 1 y 2) y penetran rápidamente la capa superficial de suelos delgados, llegan al material parental o de soporte de dicho suelo. En la zona se reportan calcretos que superyacen al material parental (Bautista y Palacio, 2005; Sedov et al., 2008; 2007), en donde a través de fracturas de diversos tamaños penetran hacia el subsuelo, donde se desplazan rápidamente entre la capa de calcreto y el material calcáreo subyacente, el cual presenta generalmente en la capa de contacto un aspecto pulverulento donde las partículas, por tensión superficial, envuelven las gotas de agua infiltradas y permiten su movilización horizontal entre ambas capas (caliche y caliza subyacente) antes de que la saturación del sistema induzca una mayor presión y se inicie el mojado de la capa calcárea no cementada que soporta el sistema.

Este movimiento subsuperficial de agua desemboca entonces en los sitios en los cuales la capa superior de calcreto se ha roto, ya sea por obras civiles como la construcción de inmuebles, u otras infraestructuras de servicios comunes en poblados pequeños. Otro de los factores que favorece la ruptura de estas capas de caliche es la tala de las selvas bajas y medianas originales para ganadería o para actividades agrícolas, ya que la quema posterior fractura rápidamente los

calcretos, facilitando que aflore el agua que se mueve subsuperficialmente.

Finalmente, en esta porción del norte del Estado, donde se presentan estos escalonamientos basculados en las planicies, la gravedad hace que esas aguas fluyan hacia los sitios donde se presentan mínimos altitudinales locales (los llamados bajos) en los que al estar fracturada la capa superficial por la actividad antrópica, permite que el agua continúe su fluir superficialmente hacia las hondonadas, en las que se encuentran suelos más impermeables, como los Gleysols, produciendo inundaciones por “agua que surge del suelo”, en lugar de las típicas producidas por escurrimiento o precipitación.

Conclusiones

El trabajo refleja la importancia de contar con una buena base de datos en lo que se refiere a edafología, geología, geomorfología, hidrología y población en el manejo de este tipo de riesgos para la población en Quintana Roo.

Los escenarios de cambio climático usados presentan un incremento en la pluviosidad, incremento en frecuencia y volúmenes precipitados en verano y asociados a los huracanes para el caso de oscilación hacia un clima más húmedo e incremento en la cantidad de precipitaciones invernales y asociadas a nortes en el caso de tender hacia la aridización y un clima más extremo. En ambos casos el incremento en el volumen precipitado y las alteraciones en cuanto a su distribución temporal hacen suponer un incremento en la frecuencia de aparición de volúmenes mayores a las medias normales para la zona y por tanto mayor probabilidad de que se presente este fenómeno.

Se documenta un proceso de inundación compuesto por pequeños fenómenos reportados anteriormente en forma independiente y que da origen a una forma de inundación que no se había documentado, al menos para Quintana Roo, que es la inundación súbita por afloramiento o inundación por aguas subterráneas.

Se obtuvo un mapa base de peligros de inundación susceptible de usarse como base en la construcción de un modelo dinámico que permita la simulación de los procesos, mismo que se está elaborando y alimentando con la información disponible.

Con base en el mapa de peligros de inundación presentado y los datos históricos de precipitaciones extremas ligadas particularmente al paso de huracanes, se puede estimar que la población afectada por estos peligros es de alrededor de 15,000 habitantes, distribuidos en poco más de 45 asentamientos principalmente.

Con la información actualmente disponible es posible construir un modelo para definir estas zonas de inundación y su comportamiento, el cual puede ser una herramienta útil en las dependencias ligadas a Protección Civil, para reducir los peligros a los que está expuesta la población del Estado.

Finalmente, a modo de reflexión, es necesario indicar la necesidad de mejorar y afinar el modelo, hacer más específica la información y a mayor escala con el fin de construir una herramienta más robusta para su uso en planeación del desarrollo y en las actividades de Protección Civil.

Agradecimientos

Se agradece al proyecto FOMIX-UQROO-2011-2 cuyo equipamiento fue usado en parte del trabajo de campo y colecta de datos, así como el procesamiento posterior de los mismos, al Proyecto del Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático (PEACC) por las facilidades otorgadas para el uso de una parte importante de la información base. Igualmente se agradecen los comentarios y sugerencias hechos por los revisores para mejorar el manuscrito original, así como el invaluable apoyo del Dr. Luis Delgado Argote en la parte de edición.

Referencias

- Amendola, A., 2004, Management of change, disaster risk, and uncertainty: an overview. *Journal of Natural Disaster Science*, 26(2), 55–61.
- Apel, H., Thieken, A. H., Merz, B., Blöschl, G., 2004, Flood risk assessment and associated uncertainty. *Natural Hazards and Earth System Science*, 4(2), 295–308.
- Aven, T., 2008, Risk analysis: assessing uncertainties beyond expected values and probabilities. Chichester, England ; Hoboken, NJ: Wiley.
- Bautista Zúñiga, F. y Palacio, A. G., 2005, Caracterización y manejo de los suelos de la Península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales. Campeche, Camp; Mérida, Yuc; México: Universidad Autónoma de Campeche: Universidad Autónoma de Yucatán: Instituto Nacional de Ecología].
- Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I., Wisner, B., 2014, At risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters. Routledge. https://books.google.com.mx/books?hl=en&lr=&id=4M6AAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=modern+natural+risk+management&ots=xkz7190_id&sig=LZpMTaxWmVvsHJWOnv2qFzo9CvM&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Bonacci, O., Ljubenkov, I., Roje-Bonacci, T., 2006, Karst flash floods: an example from the Dinaric karst (Croatia). *Natural Hazards and Earth System Science*, 6(2), 195–203.
- Campos, M., Velázquez, A., McCall, M., 2014, Adaptation strategies to climatic variability: A case study of small-scale farmers in rural Mexico. *Land Use Policy*, 38, 533–540. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.12.017>
- Cardona, O. D., 2003, The need for rethinking the concepts of vulnerability and risk from a holistic perspective: a necessary review and criticism for effective risk management. *Mapping Vulnerability: Disasters, Development and People*, 17.
- Cavazos, M. T. P. (Ed.), 2015, Conviviendo Con La Naturaleza (1st ed.). México, D.F. Ensenada, B.C., México: INECC. http://www.researchgate.net/profile/Tereza_Cavazos/publication/281375691_Conviviendo_con_la_Naturaleza_El_problema_de_los_desastres_asociados_a_fenmenos_hidrometeorologicos_y_climticos_en_Mxico/links/55e47e3108ae6abe6e902813.pdf
- CENAPRED, 2009, Inundaciones. CENAPRED-SG.
- Conde Álvarez, A. C., Gay García, C., 2008, Guía para la Generación de Escenarios de Cambio Climático a Escala Regional, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.
- Costanza, R., 2001, Visions, Values, Valuation, and the Need for an Ecological Economics: All scientific analysis is based on a “preanalytic vision,” and the major source of uncertainty about current environmental policies results from differences in visions and world views. *BioScience*, 51(6), 459–468.
- D.O.F., 2012, Programa de Ordenamiento Ecológico Marino y Regional del Golfo de México y Mar Caribe, Diario Oficial de la Federación 292.
- Fragoso Servón, P., 2015, Análisis espacial de los suelos de Quintana Roo con un enfoque Geomorfoedafológico, Tesis Doctorado, Universidad de Quintana Roo, Chetumal, México.

- Fragoso-Servón, P., Bautista, F., Frausto, O., Pereira, A., 2014, Caracterización de las depresiones kársticas (forma, tamaño y densidad) a escala 1: 50,000 y sus tipos de inundación en el Estado de Quintana Roo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 31(1), 127–137.
- Frausto, O. e Ihl, T., 2008, Capítulo 2, Mapa de Formas Exocársticas del Norte de Quintana Roo a escala 1: 50000. En: *Estudio Geohidrológico del Norte de Quintana Roo, México* (pp. 41–54). <http://biblioteca.coqcyt.gob.mx/bvic/Captura/upload/.../ESTUDIO-GEOHIDROLOGICO-LIBRO.pdf#page=41>
- Frausto, Oscar y Thomas Ihl, comunicación personal 2014, Mapa de Fallamientos y Fracturas en Quintana Roo. Cozumel, Q. Roo, México.
- García, E., 2012, Distribución de la precipitación en la República Mexicana. *Investigaciones Geográficas, Boletín Del Instituto de Geografía*, (50). <http://132.247.146.34/index.php/rig/article/download/30432/28253>
- Golicher, J. D. and Morales, J., 2004, Correlations between precipitation patterns in the state of Chiapas and the El Niño sea surface temperature index. 2004), *El Agua En La Frontera México-Guatemala-Belice*, San Cristobal de Las Casas, Chiapas, El Colegio de La Frontera Sur.
- Hughes, A. G., Vounaki, T., Peach, D. W., Ireson, A. M., Jackson, C. R., Butler, A. P., Bloomfield, Finch, J., Wheeler, H. S., 2011, Flood risk from groundwater: examples from a Chalk catchment in southern England. *Journal of Flood Risk Management*, 4(3), 143–155.
- INEGI. (2000). *Cartas Geológicas 1:250000. Vector Data*, México, D.F.: INEGI.
- INEGI. (2013). *Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0)*. Electronic, Aguascalientes, México: INEGI.
- Jourde, H., Lafare, A., Mazzilli, N., Belaud, G., Neppel, L., Dörfliger, N., Cernesson, F., 2014, Flash flood mitigation as a positive consequence of anthropogenic forcing on the groundwater resource in a karst catchment. *Environmental Earth Sciences*, 71(2), 573–583.
- Kreibich, H. and Thieken, A. H., 2008, Assessment of damage caused by high groundwater inundation: Assessment of Damage Caused by High Groundwater. *Water Resources Research*, 44(9), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2007WR006621>
- Kundzewicz, Z. W. and Takeuchi, K., 1999, Flood protection and management: quo vadimus? *Hydrological Sciences Journal*, 44(3), 417–432.
- Lerer, S., 2008, Estimation of actual evapotranspiration using remote sensing data for the Yucatan Peninsula, Mexico (M.Sc. Thesis). Technical University of Denmark.
- Magaña, V., Amador, J. A., Medina, S., 1999, The midsummer drought over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, 12(6), 1577–1588.
- Messner, F. and Meyer, V., 2006, Flood damage, vulnerability and risk perception—challenges for flood damage research. Springer. http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4020-4598-1_13

- Orellana, R., Espadas-Manrique, C., Conde, C., Gay-García, C., 2009, Escenarios de Cambio Climático en la Península de Yucatán. (1st ed.). Mérida, Yucatán: Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. <http://www.cicy.mx/libros-en-venta/atlas-escenarios-de-cambio-climatico-en-la-peninsula-de-yucatan>
- Pereira C., A., Prezas H., B., Olivares M., J. A., Fragoso S., P., Niño T., C. A., 2013, Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático (Quintana Roo) - Statewide Program of Action on Climate Change (Quintana Roo) (Alessio Zanier Visintin, Trans.) (1st ed.). Quintana Roo, México: Universidad de Quintana Roo.
- Petrişor, A. I., 2011, GIS-based assessment of the distribution of 2100 predicted changes of precipitations and influence on biodiversity and natural protected areas in Romania. *Studia Universitatis Vasile Goldis, Life Sciences Series*, 21(2), 389-398. Plate, E. J., 2002, Flood risk and flood management. *Journal of Hydrology*, 267(1), 2–11.
- Priego Santander, Á., Bocco, G., Mendoza, M. E., Garrido, A., 2010, Propuesta para la generación semiautomatizada de unidades de paisajes (1st ed.). México, D.F.: Instituto Nacional de Ecología. <http://books.google.es/books?id=VaoA4Tg6mYEC>
- Robins, N. S. and Finch, J. W., 2012, Groundwater flood or groundwater-induced flood? *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 45(1), 119–122.
- Sayers, P., Y. L.i, G. Galloway, E. Penning-Rowsell, F. Shen, K. Wen, Y. Chen, T. Le Quesne. 2013. Flood Risk Management: A Strategic Approach. Paris, UNESCO. <https://openaccess.adb.org/handle/11540/81>
- Sedov, S., Solleiro-Rebolledo, E., Fedick, S. L., Gama-Castro, J., Palacios-Mayorga, S., Vallejo Gómez, E., 2007, Soil genesis in relation to landscape evolution and ancient sustainable land use in the northeastern Yucatan Peninsula, Mexico. *Atti Soc. tosc. Sci. nat. Mem. Serie A*, 112, 115–126.
- Sedov, S., Solleiro-Rebolledo, E., Fedick, S. L., Pi-Puig, T., Vallejo-Gómez, E., de Lourdes Flores-Delgadillo, M., 2008, Micromorphology of a soil catena in Yucatán: pedogenesis and geomorphological processes in a tropical karst landscape. In *New Trends in Soil Micromorphology* (pp. 19–37). Springer. http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-79134-8_3
- Tejeda-Martínez, A., Conde Álvarez, Conde Álvarez, L., García López, T., Guadarrama Oliveira, M. E., Gutiérrez Bonilla, A., López Flores, E., Magaña Rueda V., Ochoa Martínez, C.A., Salas Cisneros, G. V., Salazar Lizán, S., Welsh Rodríguez, C.M., 2008, Guía para la elaboración de Programas Estatales de Acción ante el Cambio Climático (PEACC). http://www2.inecc.gob.mx/sistemas/peacc/descargas/guias_prog_est.pdf
- UQRoo (Universidad de Quintana Roo), 2000, Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial de la Zona Continental de Isla Mujeres (Reporte Técnico) (p. 174). Quintana Roo, México: Universidad de Quintana Roo.
- UQRoo (Universidad de Quintana Roo), 2004, Programa Estatal de Ordenamiento Territorial (Reporte Técnico) (p. 3987). Quintana Roo, México: Universidad de Quintana Roo.

Vörösmarty, C. J., Bravo Guenni, L., Wollheim, W. M., Pellerin, B., Bjerklie, D., Cardoso, M., D'Almeida, C., Green, P., Colon, L., 2013, Extreme rainfall, vulnerability and risk: a continental-scale assessment for South America. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 371(2002), 20120408. <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0408>

Manuscrito recibido: 25 enero de 2016

Recepción del manuscrito corregido: 20 enero de 2017

Manuscrito aceptado: 25 enero de 2017