

DOI: 10.24850/j-tyca-2026-02-09

Artículos

Variación espacio-temporal del uso de suelo y las inundaciones en el contexto de cambio climático
Spatio-temporal variation of land use and flooding in the context of climate change

Samuel Rodríguez-Flores¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0885-5022>

Carlos Muñoz-Robles², ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4744-3602>

Patricia Julio-Miranda³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8379-4528>

José Antonio Quevedo-Tiznado⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6963-2012>

¹Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Morelos, México, samuel_rodriguez@tlaloc.imta.mx

²Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Investigación de Zonas Desérticas, San Luis Potosí, México, carlos.munoz@uaslp.mx

³Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Programa Multidisciplinario de Posgrado en Ciencias Ambientales, San Luis Potosí, México, patricia.julio@uaslp.mx

⁴Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, Ciudad de México, México, aquevedo@xanum.uam.mx

Autor de correspondencia: Samuel Rodríguez-Flores,
samuel_rodriguez@tlaloc.imta.mx

Resumen

Las modificaciones en las variables climatológicas, en específico la precipitación en contexto de cambio climático, pueden repercutir en una variabilidad en la escurrimiento de las cuencas. Esta variabilidad puede evaluarse mediante modelos hidráulicos de inundaciones, ya que consideran la distribución espacial y temporal del agua en la cuenca. Las inundaciones se estimaron a través de modelación hidráulica con el *software Iber 2.6*, donde se analizaron escenarios históricos y proyectados durante un periodo de 42 años. El análisis de cambio climático para el año 2027 fue proyectado mediante el escenario *ECHAM-5* en su versión A2. Los resultados indicaron inundaciones importantes en las zonas montañosas ($Y = 10.69$ m y $v = 21.08$ m/s), especialmente donde se presentan cambios de cobertura vegetal, cambios de usos de suelo o asentamientos humanos. La validación se realizó por medio de información de campo y entrevistas, y se compararon los resultados obtenidos con el modelo contra las observaciones de la población. Los resultados se presentan en mapas donde se observan los tirantes y las velocidades correspondientes a cada zona de inundación. Este tipo de modelos puede utilizarse para evaluar la interacción de la cobertura vegetal, usos de suelo y asentamientos humanos con las inundaciones a fin de proponer medidas de gestión, restauración y/o mitigación contra este tipo de eventos. Dicha investigación tiene como objetivo caracterizar la variabilidad espacio-temporal de la escurrimiento mediante modelación hidráulica (*Iber*) en el contexto del cambio climático para identificar zonas

potenciales de inundación en la subcuenca de Santa Cruz de Aquismón, San Luis Potosí, México.

Palabras clave: vegetación, utilización de la tierra, ingeniería hidráulica, mecánica de fluidos, hidrología, modelos matemáticos, cuenca, México.

Abstract

Changes in climatological variables, specifically precipitation in the context of climate change, can have an impact on runoff variability in watersheds. This variability can be evaluated by means of hydraulic flood models, since they take into account the spatial and temporal distribution of water in the basin. Floods were estimated through hydraulic modeling with Iber 2.6 software where historical and projected scenarios were analyzed over a period of 42 years. The climate change analysis for the year 2027 was projected using the ECHAM-5 scenario in its A2 version. The results indicated significant flooding in mountainous areas ($Y=10.69$ m and $v=21.08$ m/s), especially where there are changes in vegetation cover, changes in land use or human settlements. The validation was carried out by means of field information and interviews, comparing the results obtained with the model against the observations of the population. The results are presented in maps showing the flows and velocities corresponding to each flood zone. This type of model can be used to evaluate the interaction of vegetation cover, land use and human settlements with floods in order to propose management, restoration and/or mitigation measures against this type of event. This research aims to characterize the spatio-temporal variability of runoff through hydraulic modeling (Iber) in the context of climate change to identify potential flood zones in the Santa Cruz de Aquismón sub-basin, San Luis Potosí, Mexico.

Keywords: Vegetation, land use, hydraulic engineering, fluid mechanics, hydrology, mathematical models, basin, Mexico.

Recibido: 25/09/2024

Aceptado: 27/06/2025

Publicado *ahead of print*: 16/07/2025

Versión final: 01/03/2026

Introducción

Las inundaciones son el resultado del desbordamiento del agua, cuando el cauce no tiene la suficiente capacidad para transitar ese flujo, lo cual provoca que zonas que normalmente no estén sumergidas presenten una acumulación de agua sobre esas áreas. Este tránsito excesivo del flujo puede ser provocado por diversos factores, como el exceso de precipitación, ciclones tropicales, fallas en la infraestructura hidráulica y por las actividades antrópicas presenten en la zona (Cenapred, 2001; Roblero-Hidalgo, Chávez-Morales, Ibáñez-Castillo, & Palacios-Vélez, 2022; Alarcón-Neva, Chavez-Morales, Palacios-Vélez, & Ibañez-Castillo, 2020). Las inundaciones son una problemática que se ha presentado a lo largo de los años, por lo que son asociadas como los desastres más dañinos en el contexto global. Se estima que en el periodo 1995-2015, las inundaciones han afectado alrededor de 2.3 billones de personas (Ward *et al.*, 2020). Además, sus afectaciones se han incrementado en el siglo XXI debido al cambio climático y las actividades antrópicas relacionadas con el crecimiento poblacional y económico que modifican la cobertura y el uso de suelo (Zhao, Weng, Chen, & Yang, 2020). Dicha

situación genera la necesidad urgente de manejar o controlar las inundaciones mediante la aplicación de medidas, estrategias, gestiones y restauraciones destinadas a reducir los riesgos presentes y futuros (Ward *et al.*, 2020). La situación es reconocida por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres, que promueve metodologías e investigaciones que ayuden a mitigar los efectos de las inundaciones (UNDRR, 2020).

Las investigaciones recientes se han centrado en metodologías para la gestión del agua en escenarios de cambio climático, y mediante el desarrollo y la aplicación de modelos numéricos y simulaciones (Le Coz *et al.*, 2016; Ramadan, Shalash, Fahmy, & Abdel-Aal, 2019; Wang *et al.*, 2025). Una manera efectiva de cuantificar la variabilidad y evolución de las inundaciones es por medio de la modelación, debido a las representaciones sistematizadas que relacionan la precipitación y la escorrentía, permitiendo simular diversos eventos de precipitación dentro de una cuenca (Roblero-Hidalgo *et al.*, 2022; Oropeza, 1999). Dado que las cuencas son espacios geográficos heterogéneos con características particulares y que tienen una complejidad relacionada con la delimitación del espacio físico para los procesos sociales y las cuestiones relacionadas con los límites políticos y administrativos. El análisis de cuenca o subcuenca es relevante desde una perspectiva de gestión, manejo o restauración, pues integra diferentes actores y variables que interactúan para generar cambios (Burgos & Bocco, 2015). Además, en muchos casos, un análisis de este tipo permite una mayor participación de los usuarios (gobierno y autoridades sociales), una mayor precisión en la información sobre los problemas y fortalece la participación ciudadana (Pimentel-Equihua & Velázquez-Machuca 2015).

Existen diversos estudios asociados con las inundaciones en contexto con las condiciones sociales del sitio, como la de Jia *et al.* (2022), cuya investigación analiza los impactos de las inundaciones en la agricultura y como esta se relaciona con las condiciones de marginación; o las de Tate, Rahman, Emrich y Sampson (2021), y Avand, Moradi y Ramazanzadeh-lasboyee (2022), que analizan la susceptibilidad de las comunidades rurales. Sin embargo, las investigaciones anteriores no analizan la integración de escenarios históricos y proyectados ni integran el cambio climático. Por otra parte, existen investigaciones como las de Shadmehri-Toosi, Doulabian, Ghasemi-Tousi, Humberto-Calbimonte y Sina-Alaghmand (2020), que analizan la variabilidad del peligro de inundación bajo distintos escenarios de cambio climático, y la de Janizadeh *et al.* (2021), que realiza evaluaciones de la vulnerabilidad ante inundaciones; pero estas investigaciones no incorporan escenarios históricos ni los cambios de cobertura y uso de suelo. Así, es importante la incorporación de algoritmos o metodologías para reproducir los posibles cambios en la cobertura y uso de suelo en escenarios históricos y proyectados de cambio climático. Para ello, se han implementado diversos algoritmos de proyección, como el de Markov (Acharya, Hori, & Karki, 2023; Guédet-Guédé *et al.*, 2025); este algoritmo se ha usado en estudios para analizar las condiciones históricas y futuras de la vegetación, pero son necesarias calibraciones y validaciones del algoritmo (Rodríguez-Flores, Muñoz-Robles, Quevedo-Tiznado, & Julio-Miranda, 2024).

En el caso de México, las investigaciones se han centrado en los eventos extremos que provocan desastres, a partir de un gran número de eventos importantes, entre los que destacan las inundaciones por los huracanes Ingrid y Manuel en 2013 (Alcántara-Ayala *et al.*, 2019), lo

cuales se agravaron por la ausencia de un ordenamiento territorial y los efectos del cambio climático en el aumento de las precipitaciones (Arreguín-Cortés, López-Pérez, & Marengo-Mogollón, 2016). La importancia de tales eventos llevó a la elaboración de un atlas de vulnerabilidad hídrica de México. Sin embargo, son escasas las investigaciones que integran en una misma propuesta los efectos del cambio de cobertura vegetal y usos de suelo con los cambios de la magnitud y distribución espacial de las precipitaciones en forma de inundaciones, a pesar de que las afectaciones conjuntas de dichos factores pueden alterar irreversiblemente los ecosistemas y las actividades humanas (Shah *et al.*, 2020). Es por ello que nuestra investigación aprovecha esta situación para realizar una evaluación de cuenca donde intervengan escenarios históricos y proyectados que puedan generar información útil y precisa en el contexto de manejo de cuencas.

La problemática identificada en la subcuenca de Santa Cruz de Aquismón incluye el suministro limitado de agua, la falta de gestión integrada y las frecuentes inundaciones y sequías, entre otros (Soto-Galera, Alcántara-Soria, & Paulo-Maya, 2018; UASLP, 2018). Esto constituye una oportunidad para evaluar los problemas relacionados con el exceso de escorrentía y los efectos del cambio climático que tienden a modificar la precipitación. Una modelación de inundaciones proporcionará información relevante sobre la dinámica de las cuencas y puede fundamentar posibles políticas o acciones para mitigar o gestionar sus problemas asociados con el exceso de escorrentía. El objetivo de esta investigación fue caracterizar la variabilidad espacio-temporal de las inundaciones en el contexto del cambio climático y relacionarlas con el cambio de cobertura vegetal y uso de suelo en la subcuenca Santa Cruz

de Aquismón, San Luis Potosí, México, utilizando modelos hidrológicos y pronósticos a 42 años, desde los años 1985, 1999, 2013 y escenarios futuros para 2027. La proyección del escenario de cambio climático de este estudio puede incluirse en el nuevo plan de desarrollo de la subcuenca, pues el plan actual termina en 2027 (Coplade, 2021); también se eligió este horizonte de tiempo por las implicaciones metodológicas descritas en Rodríguez-Flores, Muñoz-Robles, Ortiz-Rodríguez, Quevedo-Tiznado y Julio-Miranda (2022).

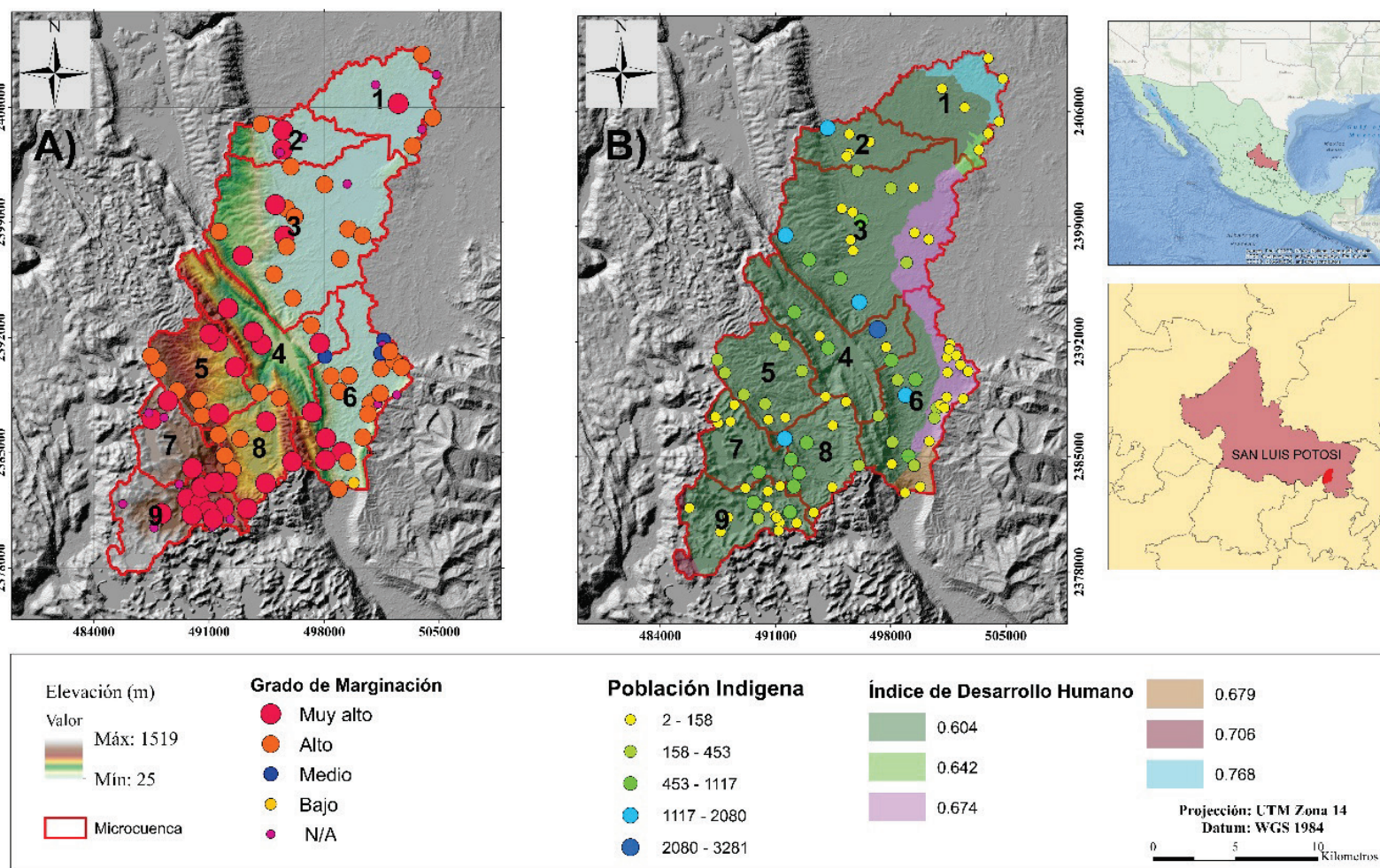
Materiales y métodos

En esta sección se presenta el área de estudio, procesamiento de imágenes satelitales, proyección de imágenes satelitales, escenario de cambio climático, recolección de información de campo, y el modelo de inundaciones y consideraciones que se tomaron en cuenta durante la investigación.

Área de estudio

El estudio se realizó en la subcuenca de Santa Cruz de Aquismón, en la región Huasteca de San Luis Potosí, México (Figura 1A). La subcuenca tiene una superficie de 329.39 km², que se divide en nueve microcuencas, y comprende los municipios de Aquismón, Ciudad Valles, Tanlajás y Tancanhuitz. La subcuenca está contenida dentro de la zona fisiográfica de la Sierra Madre Oriental, formada por rocas sedimentarias cuya configuración morfológica ha sido determinada por rasgos tectónicos y cambios morfoclimáticos (Lugo-Hubp, 1990; Palacio-Aponte & Julio-Miranda, 2018). El clima predominante es cálido húmedo A(f), con

precipitación media anual de 500 a 3 000 mm y temperatura media anual mayor a 18 °C (García, 2004).



Los suelos predominantes son vertisoles eutróficos y leptosoles cálcicos de alta erosionabilidad (FAO, 2007). La vegetación natural de la subcuenca es principalmente selva alta y mediana perennifolia, con diferentes etapas sucesionales de vegetación secundaria. Los usos

dominantes de la tierra son los cultivos y pastos. Esta región ha sufrido cambios en el uso de suelo y vegetación, provocando alteraciones y reducción de los ecosistemas forestales característicos (Reyes-Hernández, Aguilar-Robledo, Aguirre-Ribera, & Trejo-Vázquez, 2006) debido a una serie de transformaciones urbanas, económicas y sociales, en las que las actividades turísticas, petroleras y empresariales han generado un mal manejo de la red hídrica (Alberto-Velázquez & Talledos-Sánchez, 2019).

En cuanto a la condición social de la subcuenca (Figura 1B), el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) señala la existencia de asentamientos humanos de habla indígena en toda la subcuenca, con poblaciones que van de 2 a 3 251 habitantes, con un grado de marginación alto y muy alto (INEGI & Conabio, 2017; Coespo, 2018; Coneval, 2020), y un índice de desarrollo humano que va de 0.604 a 0.768, lo que indica grados de desarrollo de medio a alto (PNUD, 2019).

En la subcuenca se presentan diversas condiciones hidrometeorológicas asociadas con ciclones tropicales y sequías meteorológicas que afectan la forma en que grupos y sectores de la población desarrollan sus actividades económicas (Algara-Siller, Galindo-Mendoza, Contreras-Servin, & Mejia, 2009; Santillán-Fernández, Santoyo-Cortés, García-Chávez, Covarrubias-Gutiérrez, & Merino, 2016; Alberto-Velázquez & Talledos-Sánchez, 2019).

Procesamiento de imágenes satelitales

Los mapas de uso de suelo y cobertura vegetal se elaboraron utilizando imágenes del satélite Landsat 4-5 (resolución espacial de 30 m) de 1985, 1999 y 2013. Todas las imágenes se tomaron en febrero, en la estación

seca, para minimizar los errores de verborreo debidos a las condiciones asociadas con la estación húmeda. Se detectaron nueve tipos de uso de suelo y vegetación: tierras de cultivo, pastos cultivados, bosque de robles, bosque tropical, vegetación arbórea secundaria de bosque tropical, vegetación arbustiva secundaria de bosque tropical, suelo desnudo, agua y zonas urbanas. Las imágenes de satélite se clasificaron utilizando árboles de clasificación y regresión (CART), que se construyeron y procesaron en *RStudio* con la biblioteca *rpart* (Therneau, Atkinson, & Ripley, 2019). Las variables independientes utilizadas en cada clasificación de CART fueron el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), la topografía y la pendiente obtenida del modelo digital de elevación (MDE) descargado del satélite ALOS PALSAR (<https://search.asf.alaska.edu>) con una resolución espacial de 12.5 m.

Proyección de imágenes satelitales

Para proyectar el uso de suelo y la vegetación al año 2027, se utilizó el modelo de cambio de uso del suelo del *software* geoespacial y de monitoreo *IDRISI Andes*. El modelo utiliza el algoritmo de Markov, que describe los cambios en el uso de la tierra y la vegetación utilizando matrices que consideran el cambio y la permanencia (Noszczyk, 2019). Para crear el algoritmo de cambio se necesitan dos periodos de uso de suelo y vegetación para simular el futuro: un primer periodo base como el estado previo y un segundo periodo como la probabilidad de cambio (Kumar, Radhakrishnan, & Mathew, 2014). Además, esta proyección se realizó en dos partes: calibración del algoritmo y la respectiva proyección al año 2027.

El algoritmo de Markov se calibró utilizando las imágenes clasificadas de 1985 y 1999, con 1985 como estado previo y 1999 como imagen de probabilidad, dando como resultado la imagen proyectada de 2013. Una vez obtenida esta proyección de 2013, se incrementó la probabilidad de cambio para los usos de selva alta y mediana perennifolia y vegetación arbórea secundaria de selva alta y mediana perennifolia con tendencia a convertirse en tierras de cultivo. Para evaluar esta proyección, se calculó el coeficiente kappa con la imagen clasificada de 2013, obteniendo un valor de 0.72. Una vez calibrado el algoritmo de Markov, se realizó una proyección para el año 2027, tomando como base las imágenes de 1999 y 2013.

Escenario de cambio climático

Actualmente, el cambio climático es uno de los retos globales más importantes, ya que puede modificar los patrones espaciales de precipitación y temperatura, lo cual afecta los procesos que involucran al agua, suelo y vegetación (Yifru, Chung, Kim, & Chang, 2021). En este estudio se utilizó el escenario de cambio *MPI ECHAM 5* en su versión A2 para México. Fue descargado del repositorio del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (<http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/atlas>). El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) señala que este escenario se genera mediante modelos de circulación general considerando emisiones de gases de efecto invernadero y diversos desarrollos económicos y sociales, dando como resultado las versiones A1B, A2, B1 y B2 en horizontes corto (2030), medio (2050) y largo (2080) (Magaña & Caetano, 2007; Fernández-Eguiarte, Zavala-Hidalgo, Romero-

Centeno, Conde-Álvarez, & Trejo-Vázquez, 2015; Suástegui-Cruz, 2021). Se seleccionó el escenario *MPI ECHAM 5* en su versión A2 (2030) y (2050) debido a que presenta las mayores magnitudes de cambio con respecto a la precipitación, así como un crecimiento poblacional acelerado y poco desarrollo económico (IPCC, 2007).

Recolección de información de campo

Para recopilar datos de la subcuenca se realizaron visitas de campo en 2022, a fin de recopilar alturas de tirantes de inundaciones y testimonios de las localidades afectadas. La información se recopiló durante visitas de campo a 14 sitios ubicados en toda la subcuenca, que se seleccionaron por los problemas identificados por los modelos de inundación y los índices utilizados en esta investigación. Los 14 sitios visitados incluyeron centros de reunión comunitarios, puentes, campos deportivos, áreas de cultivo y áreas de vegetación natural, entre otros, asegurando así una amplia recolección de datos de diversas zonas.

Modelo de inundaciones

Para el análisis de inundaciones se utilizó el *software* de modelación bidimensional *Iber 2.6*. La base de datos de entrada para correr este modelo se obtuvo de diversas fuentes, como la estación hidrométrica del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) para datos de escurrimientos, el DEM ALOS PALSAR, uso de suelo y vegetación a partir del procesamiento de imágenes satelitales, y características del suelo a partir de mapas del INEGI con la adición de información de suelos de la FAO. La delimitación de la subcuenca se realizó con el *software ArcGIS*

10.3 y se trazaron nueve microcuencas con la finalidad de dividir y visualizar los resultados obtenidos en esta investigación.

Los datos de precipitación diaria para septiembre de 2013 se analizaron debido a que se presentó un evento extraordinario relacionado con los huracanes Ingrid y Manuel, que causó severas inundaciones, que derivaron en una declaratoria nacional de desastre (Gobierno de México, Diario Oficial de la Federación, 2013). Esta precipitación se revisó y comparó con la base de datos (Isoyetas) de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) (<https://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/isoyetas>), dando como resultado una precipitación correspondiente al evento extraordinario (lluvia a 24 h y periodo de retorno a 10 años). Una vez obtenidas las características de la precipitación, se descargó el escenario del Atlas Nacional de Riesgos con un periodo de retorno de tormenta de 10 años y una duración de 24 horas.

Las magnitudes de las áreas obtenidas del Atlas Nacional de Riesgos por Inundación (ANRI) se compararon con las áreas obtenidas por la simulación *Iber* con el fin de realizar una calibración. Para esta calibración se consideró el número de curva (NC) con relación a la humedad antecedente y el coeficiente de Manning. Cabe resaltar que este tipo de calibración se considera debido a la falta de información oficial (tirantes y velocidades), pero emplea otro tipo de información, como el ANRI, perteneciente a la Comisión Nacional del Agua (Conagua).

Una vez calibrado el modelo en torno a las áreas de inundación, se emplea una validación social con base en la información de campo y fotografías. Para ello, se identificaron los tirantes que se presentaron en la simulación y se compararon con la información que se proporciona en las localidades. Con esta información se puede inferir que las

inundaciones alcanzaron aproximadamente de 0.20 a 1 m en algunas zonas de interés y que se visitaron (Figura 2). Esto se debe a que la población local afirmó que la profundidad del agua alcanzada en el campo recreativo fue del tamaño de un escalón (10-20 cm), en contraste en el puente, que se afirmó alcanzó una profundidad de 1 m, e impidió el acceso a caminos fuera de la comunidad.



Figura 2. Fotografías de Aquismón. Izquierda: casa comunal de Santa Bárbara; derecha: puente vehicular junto a un asentamiento.

Resultados

Cambios de uso de suelo y cobertura

Los cambios en el uso de suelo y la cobertura vegetal se analizaron por periodos de años, de manera que los periodos de análisis fueron 1985-1999, 1999-2013 y 2013-2027 (Tabla 1).

Tabla 1. Uso de suelo y cobertura vegetal para los periodos de tiempo analizados.

	USC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Total
1999 (% de área total)											
1985 (% de área total)	Selva alta y mediana subperennifolia	0	0.03	0	21.09	0	0.02	0.03	0.03	0	21.21
	Pastizales cultivados	0	0.4	0	0	16.63	0.13	0.23	3.24	0.07	20.7
	Vegetación secundaria arbórea de alta y mediana subperennifolia	0	0.16	0	0.01	0.06	18.74	0.12	0.15	0.48	19.72
	Secundaria arbustiva de alta y mediana subperennifolia	0	0.08	0.01	2.97	1.86	8.21	0.07	16.28	0	29.47
	Agricultura	0	0.09	0	0	0.04	0.4	0.08	0	1.68	2.29
2013 (% de área total)											
1999 (% de área total)	Selva alta y mediana subperennifolia	0	0	0	17.32	0	0.03	0	0.27	0	17.62
	Pastizales cultivados	0.01	0.19	0	0	13.24	1.12	0.02	1.75	0.83	17.15
	Vegetación secundaria arbórea de alta y mediana subperennifolia	0	0.05	0	0.02	0.05	8.9	0.01	0.22	0.08	9.32
	Secundaria arbustiva de alta y mediana subperennifolia	0	0.01	0.2	3.7	4.59	7.13	0	26.58	0	42.22
	Agricultura	0	0.08	0	0	0.06	1.16	0.02	0	0.92	2.23
1999 (% de área total)											
2013(% de área total)	Selva alta y mediana subperennifolia	0	0	0	14.53	0	0	0	0	0	14.53
	Pastizales cultivados	0	0	0	0	14.86	0.53	0	2.51	0	17.89
	Vegetación secundaria arbórea de alta y mediana subperennifolia	0	0	0	0.02	0	4.87	0	0	0	4.89
	Secundaria arbustiva de alta y mediana subperennifolia	0	0	0.19	3.08	0	3.37	0	39.72	0	46.36
	Agricultura	0	0	0	0	0.05	0.55	0.04	0	1.81	2.45

Las celdas grises indican el porcentaje del área total que no presenta cambios en la subcuenca.

Los usos de suelo y cobertura vegetal que se presentaron a lo largo de los años y que cubren entre el 80 y 90 % de la superficie de la subcuenca son los siguientes: pastizales cultivados; selva alta y mediana subperennifolia; vegetación secundaria arbórea de selva alta y mediana subperennifolia; vegetación secundaria arbustiva de selva alta y mediana subperennifolia, y agricultura. En la zona norte de la subcuenca, los cambios se relacionaron con el desplazamiento de los pastizales cultivados, la selva alta y mediana subperennifolia por áreas de cultivo o infraestructura en asentamientos humanos. En contraste, en la zona sur de la subcuenca, la selva alta y mediana subperennifolia está cambiando a vegetación secundaria arbórea o arbustiva de selva alta y mediana subperennifolia debido a deforestación y a la elaboración de áreas de cultivo de subsistencia (Rodríguez-Flores *et al.*, 2022).

Zonas de inundación

A lo largo del tiempo, las zonas inundables se han mantenido en las mismas áreas de la cuenca, lo que corrobora el Atlas Nacional de Riesgos, pero con un cambio considerable en la magnitud de los tirantes, producto de los escurrimientos. En 1985 y 1999, los tirantes máximos eran de aproximadamente 8 m, pero con el tiempo han aumentado de modo considerable, alcanzando los 10.33 m en la microcuenca 4 (Figura 2).

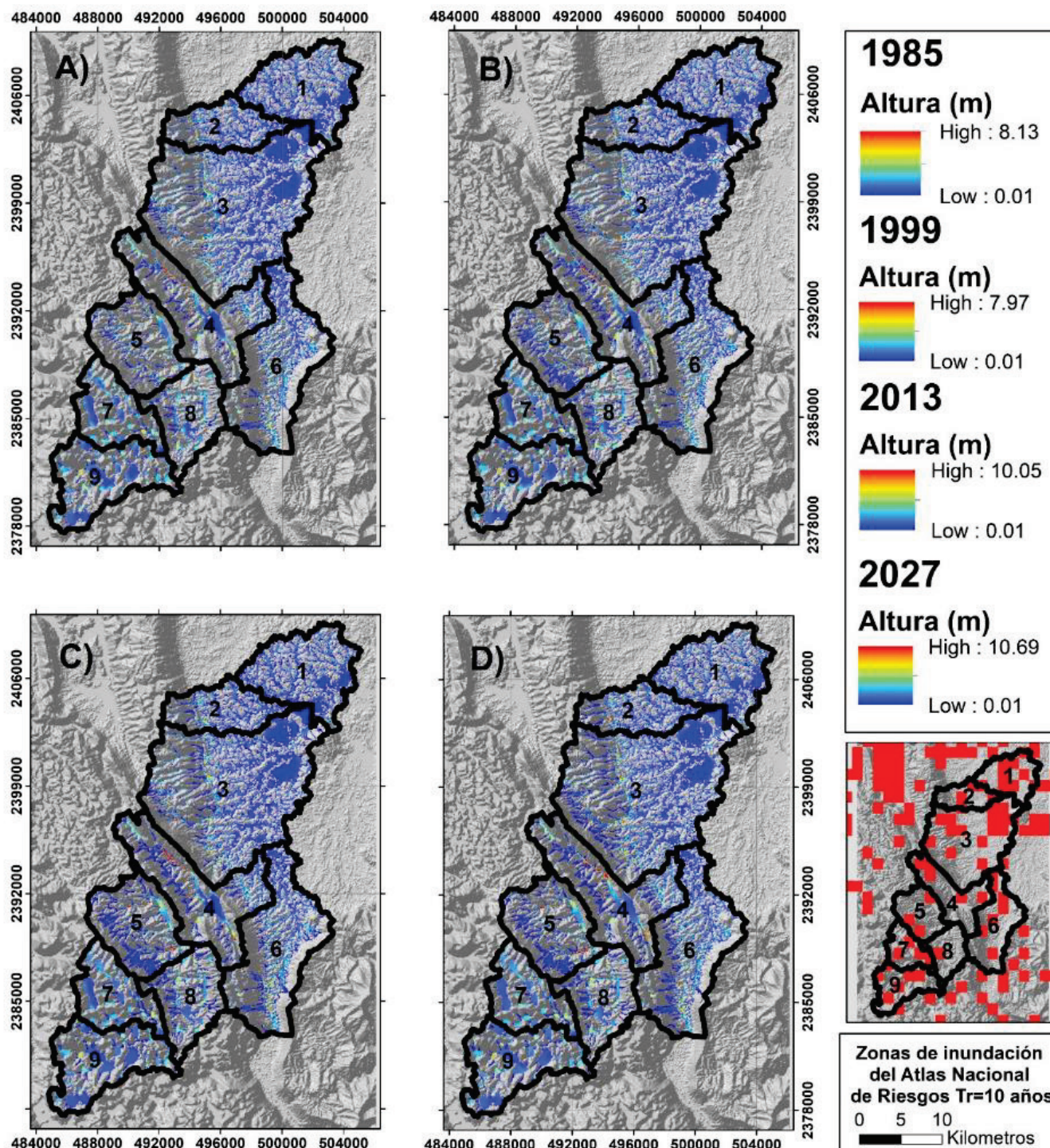


Figura 2. Zonas de inundación por microcuena para los años de análisis: A) 1985, B) 1999, C) 2013 y D) 2027.

Las zonas con mayores tirantes se encuentran en las microcuencas 3, 4 y 5; tales zonas son de suma importancia por la presencia de asentamientos indígenas con alto grado de marginación e índice de desarrollo humano medio, como Aquismón, O'c Tzén, La Linjá, Mantetzulel, Puhuitzé, Tampate, Tancuime y Tanute (Figura 3).

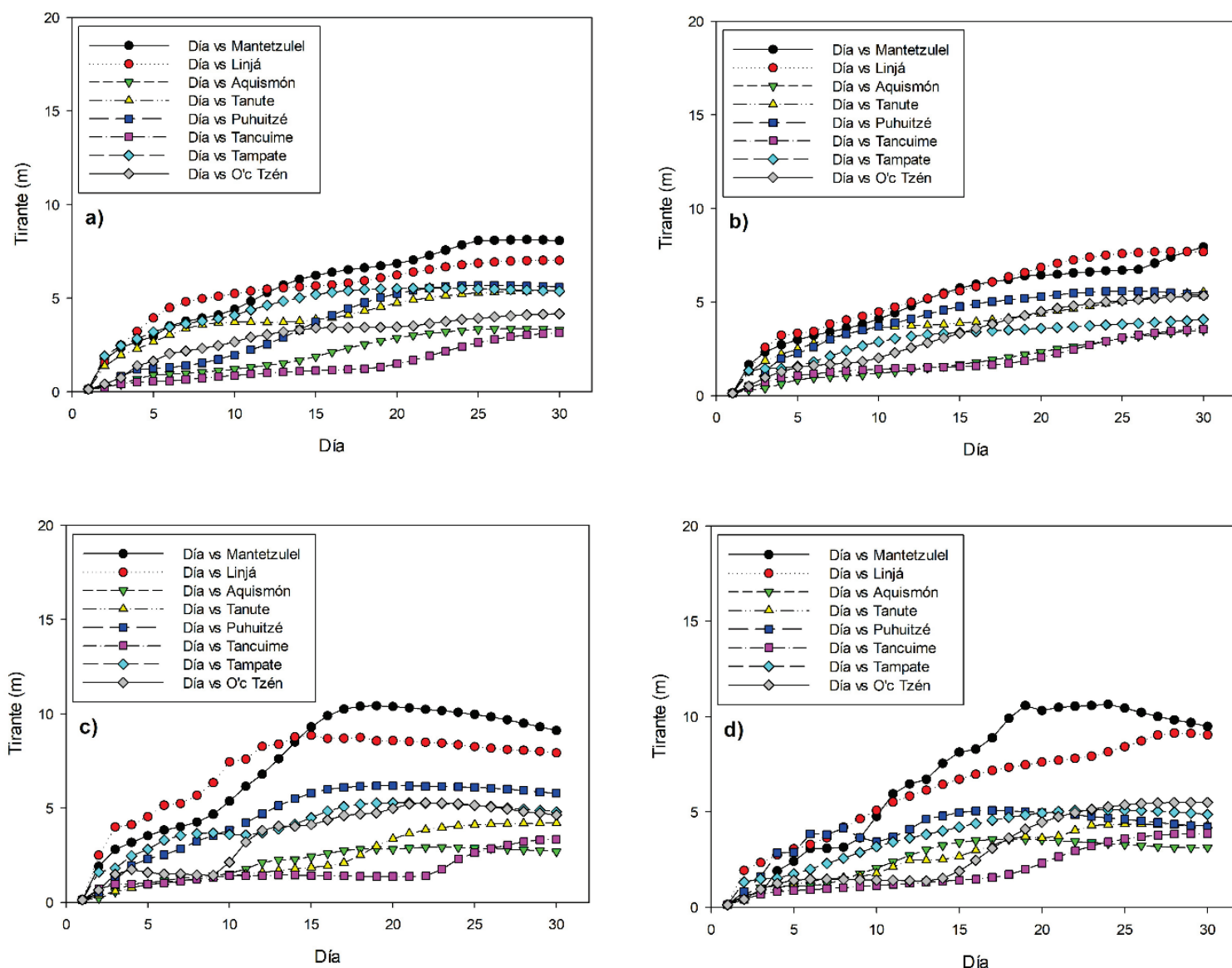


Figura 3. Tirantes de las localidades con asentamientos indígenas: A) 1985, B) 1999, C) 2013 y D) 2027.

Estos tirantes son de mínimo 3 m. Las localidades de La Linjá y Mantetzulel son las que poseen los tirantes más grandes, con alturas de unos 7 y 8 metros, respectivamente, para el año 1985. En el caso del escenario de cambio climático, estas mismas localidades alcanzan tirantes de 9 y 9.50 metros. En cuanto a la zona norte de la cuenca, los tirantes que se presentan para todas las fechas de análisis son del orden de 0.20 cm.

Las microcuencas con mayor superficie afectada son la 1, 2 y 3, cuyas inundaciones ocupan casi la totalidad de su superficie. Las inundaciones en la zona montañosa se presentan en las microcuencas 4 y 5, con tirantes de unos 10 m altura, como se muestra en el modelo (Figura 2). En cuanto a las velocidades en las zonas inundables con mayores tirantes, la magnitud de la velocidad se ha modificado con el paso de los años, en especial en las microcuencas 3, 4 y 5. En estas microcuencas, la velocidad cambiaría de 13.02 m/s para 1985 a 21.08 m/s para 2027, lo que implicaría un posible incremento a futuro del 61.90 % (Figura 4).

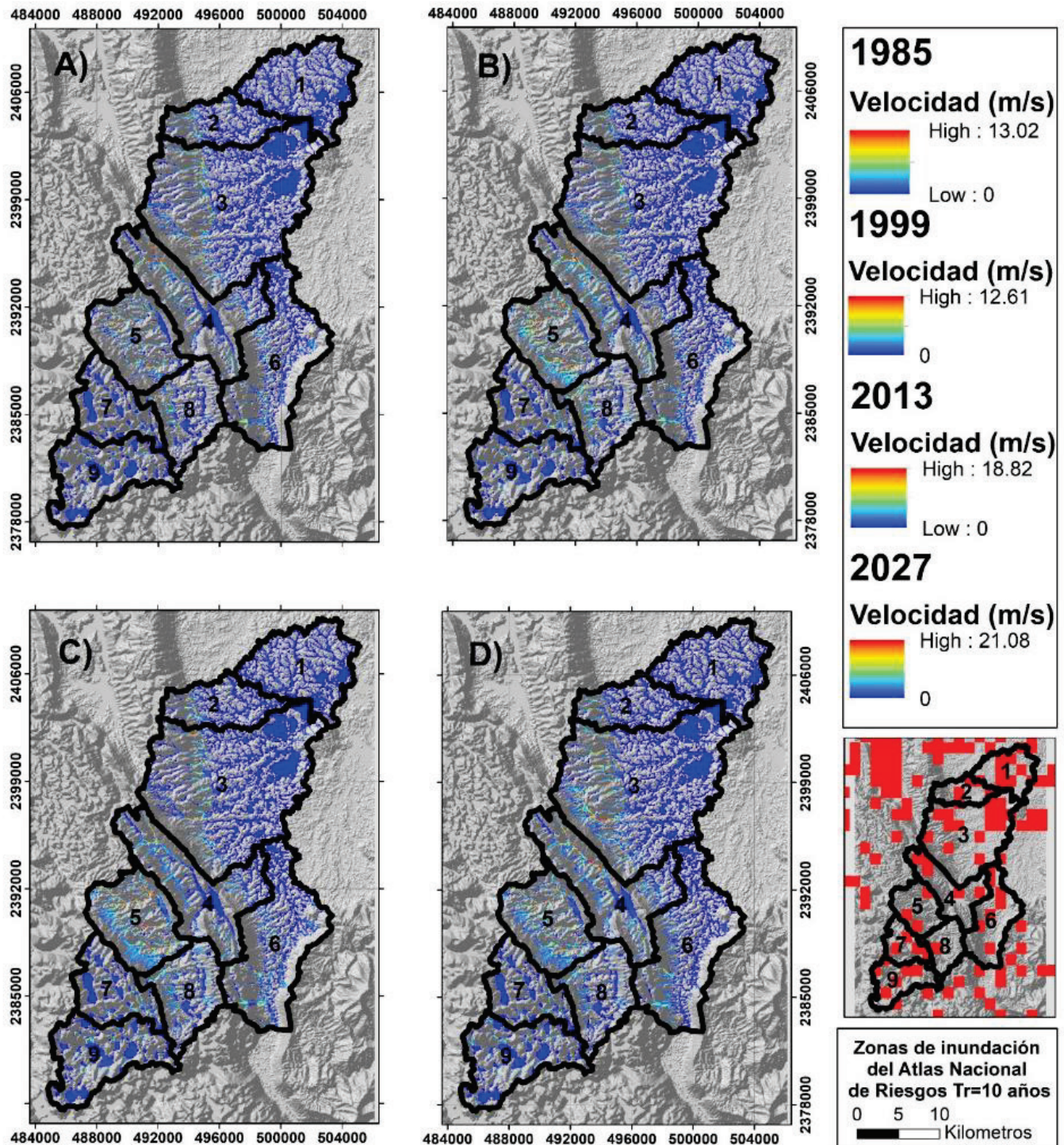


Figura 4. Velocidades de los tirantes de inundación por microfrecuencia para los años de análisis: A) 1985, B) 1999, C) 2013 y D) 2027.

En cuanto a las localidades de La Linjá y Mantetzulel, que son las que poseen mayores tirantes de las localidades indígenas, sus velocidades llegan al orden de 8.10 y 9.15 m/s para 1985; pero para 2027, sus velocidades aumentan considerablemente hasta los 15 y 20 m/s, respectivamente (Figura 5). Por último, en la parte norte de la subcuenca, las velocidades son de unos 0.05 m/s para todas las fechas de análisis.

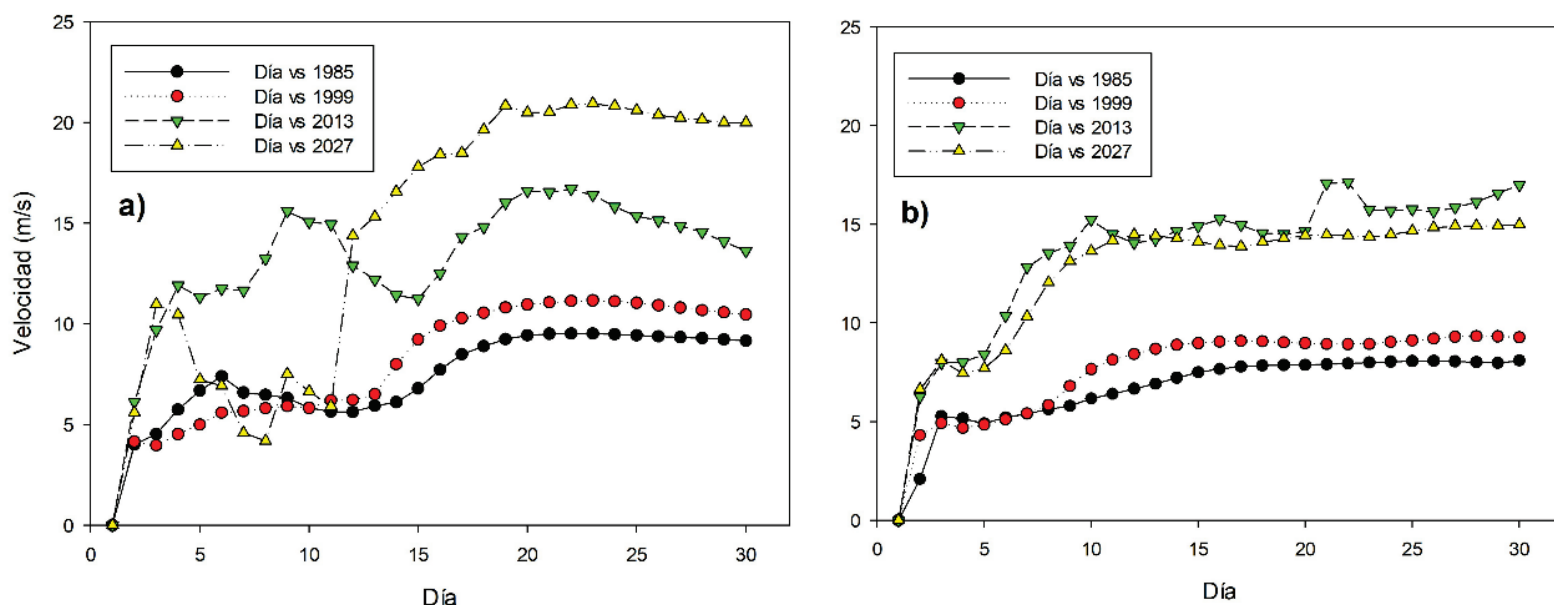


Figura 5. Velocidades de las localidades: A) Mantetzulel y B) La Linjá.

Discusión

El agua es fundamental para la conservación de los sistemas ambientales e hidrológicos debido a su influencia en la estructura y el funcionamiento de las cuencas hidrográficas, pues causa modificaciones en el volumen, la calidad y la cantidad de la escorrentía; además, se ve agravada por las perturbaciones antrópicas (El-Mahdy 2022; You *et al.*, 2022). Cuando se

incluyen los efectos del cambio climático, puede generarse una serie de problemas relacionados con el desarrollo económico y los procesos ecológicos de una cuenca (Guo *et al.*, 2019). Por ello, es necesario abordar el estudio del agua a través de enfoques que apliquen una variedad de metodologías que analicen las distintas situaciones que se puedan presentar en la zona de estudio.

Las inundaciones se han analizado a través del desbordamiento de ríos o la acumulación en áreas que normalmente no deberían estar sumergidas, incluyendo inundaciones urbanas, costeras y repentinas (IPCC, 2012). Con el paso del tiempo, estas zonas inundables han aumentado debido a los cambios hidrológicos y de uso del suelo, impactando en gran medida los asentamientos humanos en condiciones de pobreza, alta marginación y falta de servicios (Chang, Yip, van Zijll-de-Jong, Chaster, & Lowcock, 2015; Tate *et al.*, 2021). En la subcuenca de análisis consideramos este ámbito social debido a que las zonas donde se presentan mayores afectaciones son efectivamente localidades con nivel de desarrollo medio-bajo, alta marginación y donde se encuentra el mayor número de asentamientos humanos indígenas, lo que puede afectar su vida cotidiana y sus actividades económicas por los altos tirantes que se presentan en época de lluvias (microcuencas 3, 4 y 5). La mayor afectación por inundaciones puede originarse por lo que mencionan Tate *et al.* (2021) y Avand *et al.* (2022) en cuanto a que son localidades de difícil acceso, poseen escasa o nula infraestructura hidráulica, y en conjunto con la poca diversificación de actividades económicas, pueden llegar a comprometer el control de los escurrimientos. Sin embargo, actualmente la investigación sobre las características de las cuencas bajo un contexto social en conjunto con las zonas de cobertura y usos de suelo que presentan cambios o transiciones y su integración con el cambio

climático todavía es escasa, por lo que es un área para futuras investigaciones (Turnbull & Wainwright, 2019).

En los últimos años, los estudios relacionados con la evolución temporal y espacial de las inundaciones se han convertido en una tendencia (Wang *et al.*, 2014; Luo *et al.*, 2015; Itsukushima, 2018; Espinoza, Marengo, Schongart, & Jimenez, 2022); de particular interés son los estudios que relacionan el análisis histórico con el cambio climático con fines de desarrollo de políticas y gestión de riesgos (Liu, Chen, Mao, Irannezhad, & Pokhrel, 2022). Nuestra investigación aprovecha esta oportunidad de investigación aplicándola en México debido a que no se han realizado muchos estudios que integren un análisis espacio-temporal de inundaciones en contexto con el cambio climático. Para ello, esta investigación considera un análisis histórico y proyectado de 42 años, y presenta importantes hallazgos que en términos de un análisis actual o puntual con una sola fecha no podrían analizarse de manera concluyente o eficaz. Además, en términos de cambios de cobertura y uso de suelo permite visualizar y considerar la evolución espacio-temporal de las inundaciones en cuencas montañosas.

El análisis histórico integrado con el cambio climático muestra cómo las zonas inundables se modifican en dimensión (área cubierta) y en magnitud (altura del tirante), en específico en las zonas montañosas, a pesar de que esta zona tenga una pendiente pronunciada. Esta condición particular puede tener su origen en los procesos de erosión debido a que como lo mencionan Rodríguez-Flores *et al.* (2022), la cuenca de análisis ha presentado cambios en sus patrones de erosión y las montañas son las que presentan menor potencial erosivo. Además, en esta zona montañosa se identifican las áreas con mayores cambios con respecto a su cobertura vegetal y uso de suelo; especialmente se encuentran sitios

de transición de vegetación natural a vegetación secundaria, o en algunos casos a agricultura. Estos cambios en su cobertura y uso de suelo propician un aumento en los procesos de escurrimiento, que conlleva a mayores tirantes y una mayor cobertura de aguas por agua, cuestiones confirmadas con información de campo y en investigaciones como las de Janizadeh *et al.* (2021) y Lerner *et al.* (2018), quienes indican que una de las principales variables que influyen en las inundaciones es la cobertura y el uso de suelo. Es importante mencionar que aunque se hayan modificado las condiciones del ciclo hidrológico en cuestión de escurrimientos por cambios de cobertura y uso de suelo, es probable que también se haya alterado el ciclo hidrogeológico, lo que podría generar una oportunidad para realizar gestiones que propicien la recarga de acuíferos (Martínez-Carrillo *et al.*, 2025), cuestiones que podrían incorporarse en futuras investigaciones de la zona.

La variabilidad de las inundaciones en términos de precipitación y el cambio climático repercuten en la reducción de la cantidad de precipitación y su intensidad, lo que puede generar eventos como la sequía. Tal condición es similar a la encontrada por Salazar-Briones *et al.* (2018) y Arantes *et al.* (2021), quienes destacan el crecimiento poblacional y cómo las actividades humanas contribuyen al incremento de impactos hidrológicos negativos en las cuencas (inundaciones, sequías, infiltración y calidad del agua). En zonas altamente marginadas, como la subcuenca de estudio, Jia *et al.* (2022), y Lundgren y Strandh (2022) señalan que las afectaciones son aún mayores porque se ve afectada la capacidad de respuesta de la población y de los organismos que aplican medidas de reducción de riesgos. Un ejemplo claro de esta situación en la subcuenca es lo que sucede en las localidades de Mantetzulel y La Linjá, donde se han presentado eventos de tal magnitud que alcanzaron la

altura de un poste de luz y que tienden a aislar a los asentamientos durante la temporada de lluvias, donde el único medio de transporte son las lanchas o botes, sin que existan medidas de mitigación; esto es considerado por los pobladores como una situación que no se puede cambiar ni mejorar. En general, las microcuencas de montaña son las áreas donde se presentan mayores tirantes y velocidades del flujo, las cuales son superiores a 2 m/s y 3 m, respectivamente, lo que genera zonas de peligrosidad elevada, tal y como indican Roblero-Hidalgo *et al.* (2022), y la BOE (2008), que expresan que estas zonas son de especial cuidado debido a que se pueden generar pérdidas humanas. En contraste, la parte norte de la cuenca, donde la topografía es casi plana, se alcanzan a generar grandes áreas de inundación, pero de tirante somero y velocidad casi nula, por lo que a pesar de que se inunda en gran medida no causa una problemática, pues esta zona es agrícola y está drenado por un sistema de drenaje agrícola.

Una cuestión importante a resaltar en esta investigación es que si bien no se hizo una calibración y validación convencional, que requiere un análisis numérico por medio de coeficientes o estadísticos, se puede verificar una simulación por medio de la información recabada en campo de manera física (mediciones) o verbal (testimonios). Este tipo de validación y calibraciones sociales se han empezado a utilizar en zonas donde no se cuenta con la información suficiente o no existe (Sevillano-Rodriguez, Bravo-Peña, Alatorre-Cejudo, & Salcedo-Hurtado, 2020; Yuan-Fu, Ming-Jui, & Gwo-Fong, 2024; Rodríguez-Flores, Muñoz-Robles, Quevedo-Tiznado, & Julio-Miranda, 2025); ello brinda una alternativa para verificar la fiabilidad de los modelos; si bien se necesita más trabajo de campo para obtener los datos suficientes, no depende de otra modelación o metodologías complejas.

Los resultados obtenidos en esta investigación contribuyen al conocimiento del modelado de inundaciones a lo largo del tiempo; además, permiten comprender cómo las actividades antrópicas y el cambio climático pueden modificar la interacción sociedad-ecosistema. El conocimiento de cómo cambian las zonas de inundación puede contribuir al desarrollo de políticas, a una gestión adecuada y a reducir el riesgo en las cuencas, e identificar áreas potenciales de intervención con respecto a las necesidades específicas de la población, específicamente en zonas donde se presenten eventos extraordinarios con frecuencia, como en el caso de México.

Conclusiones

La modelación de inundaciones y el análisis del uso de suelo y cobertura vegetal en un contexto espacio-temporal es una herramienta eficaz para evaluar la variabilidad y evolución de la dinámica en las cuencas, en especial en aquellas que presentan un constante cambio relacionado con actividades antrópicas. Además, con la integración del cambio climático, que puede modificar los procesos hidrológicos o dinámica de las cuencas, es posible elaborar proyecciones que identifiquen zonas o variables importantes para realizar posibles manejos, restauraciones o gestiones. Sin embargo, estos modelos emplean calibraciones y validaciones numéricas que no siempre se pueden realizar, por lo que se puede optar por un análisis social para verificar la fiabilidad de la simulación.

Los mayores cambios de uso de suelo y cobertura vegetal se presentan en la parte norte de la subcuenca, donde la actividad agrícola ha desplazado pastizales cultivados, y vegetación natural de selva alta y mediana perennifolia. En el caso de la microcuenca 4, los tirantes de

inundación se han incrementado de manera considerable, lo que implica malos manejos de la situación, como lo expresa la población de la zona. La velocidad de flujo aumenta de modo considerable en zonas a lo largo de toda la subcuenca, originada por cambios espaciales en el uso de suelo y cobertura vegetal.

La subcuenca Santa Cruz de Aquismón presenta inundaciones constantes de gran magnitud, originadas por los cambios en el uso de suelo y cobertura vegetal, que en conjunto con el cambio climático pueden ocasionar un incremento en la magnitud de la velocidad y altura de los tirantes, además de inducir a condiciones desfavorables de control que afecten la cotidianidad de la población o modificación de ecosistemas. La metodología presentada puede replicarse en distintas cuencas del mundo sin ningún inconveniente. Además, el uso de validaciones que no dependan de una base de datos puede generar nuevas oportunidades para aquellos investigadores que deseen modelar cuencas no aforadas.

Agradecimientos

El primer autor contó con una beca doctoral del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) y realizó su investigación en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Los autores agradecen a la población de Aquismón por su apoyo para la realización de esta investigación, en especial a Glenda Lizeth Iglesias Castro y su familia, quienes facilitaron enormemente las visitas de campo.

Referencias

- Acharya, S., Hori, T., & Karki, S. (2023). Assessing the spatio-temporal impact of landuse landcover change on water yield dynamics of rapidly urbanizing Kathmandu valley watershed of Nepal. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 50, 101562. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101562>
- Alarcón-Neva, A., Chavez-Morales, J., Palacios-Vélez, O. L., & Ibañez-Castillo, L. A. (2020). Estimación de áreas vulnerables a inundaciones en zonas urbanas: Morelia, Michoacán, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 11(3), 1-26. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-03-01>
- Alcántara-Ayala, I., Garza-Salinas, M., López-García, A., Magaña-Rueda, V., Oropeza-Orozco, O., Puente-Aguilar, S., Rodríguez-Velázquez, D., Lucatello, S., Ruiz-Rivera, N., Tena-Núñez, R. A., Urzúa-Venegas, M., & Vázquez-Rangel, G. (2019). Gestión integral de riesgo de desastres en México: reflexiones, retos y propuestas de transformación de la política pública desde la academia. *Investigaciones Geográficas*, (98). <https://doi.org/10.14350/rig.59784>
- Alberto-Velazquez, J., & Talledos-Sánchez, E. (2019). La medición de variables hidrometeorológicas en la Huasteca potosina: entre lo institucional y lo local. En: Francisco, P. (ed). *Aguas turbulentas y prácticas locales y comunitarias en la Huasteca. Riesgos hídricos y organización social* (pp. 65-89). San Luis Potosí, México: El Colegio de San Luis.

- Algara-Siller, M., Galindo-Mendoza, G., Contreras-Servin, C., & Mejia, J. (2009). Implicaciones territoriales del fenómeno de la sequía en la Huasteca Potosina. *Espaciotiempo*, 4, 56-67.
- Arantes, L. T., Carvalho, A. C. P., Carvalho, A. P. P., Lorandi, R., Moschini, L. E., & Di Lollo, J. A. (2021). Surface runoff associated with climate change and land use and land cover in southeast region of Brazil. *Environmental Challenges*, 3, 100054. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100054>
- Arreguín-Cortés, F. I., López-Pérez, M., & Marengo-Mogollón, H. (2016). Las inundaciones en un marco de incertidumbre climática. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(5), 5-13. Recuperado de <https://revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/1267>
- Avand, M., Moradi, H., & Ramazanzadeh-lasboyee, M. (2022). Predicting temporal and spatial variability in flood vulnerability and risk of rural communities at the watershed scale. *Journal of Environmental Management*, 323, 11626. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116261>
- Burgos, A. L., & Bocco, G. (2015). La cuenca hidrográfica como espacio geográfico. En: Burgos, A. L., Bocco, G., & Sosa-Ramirez, J. (eds.). *Dimensiones sociales en el manejo de cuencas* (pp. 11-30). Morelia, México: Centro de investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA-UNAM)
- BOE, Boletín Oficial del Estado. (2008). Artículo único. En: *Real Decreto 9/2008, Reglamento del Dominio Público Hidráulico*. Madrid, España: Boletín Oficial del Estado.

- Chang, S. E., Yip, J. Z. K., van Zijll-de-Jong, S. L., Chaster, R., & Lowcock, A. (2015). Using vulnerability indicators to develop resilience networks: A similarity approach. *Natural Hazards*, 78(3), 1827-1841. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1803-x>
- Cenapred, Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2001). *Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México*. Recuperado de <http://www.cenapred.unam.mx>
- Coespo, Consejo Estatal de Población. (2018). *Perfil sociodemográfico de la población indígena en el estado de San Luis Potosí* (informe s/n). San Luis Potosí, México: Consejo Estatal de Población.
- Coneval, Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. (2020). *Informe de pobreza y evaluación 2020, San Luis Potosí* (informe s/n). San Luis Potosí, México: Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social y Poder Ejecutivo del Estado de San Luis Potosí.
- Coplade, Comité de Planeación del Desarrollo Estatal. (2021). *Plan Estatal de Desarrollo 2021-2027* (informe s/n). San Luis Potosí, México: Poder Ejecutivo del Estado de San Luis Potosí.
- El-Mahdy, M. E. S. (2022). A Unified index of water resources systems vulnerability assessment – Translating the theoretical approach into a simple tool to assess climate change Impact: Case study in Limpopo River Basin, Africa. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(5), 101687. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.101687>

- Espinoza, J. C., Marengo, J. A., Schongart, J., & Jimenez, J. C. (2022). The new historical flood of 2021 in the Amazon River compared to major floods of the 21st century: Atmospheric features in the context of the intensification of floods. *Weather and Climate Extremes*, 35. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100406>
- FAO, Food and Agriculture organization. (2007). *Base referencial mundial del recurso suelo* (informe sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103). Roma, Italia: Food and Agriculture Organization.
- Fernández-Eguiarte, A., Zavala-Hidalgo, J., Romero-Centeno, R., Conde-Álvarez, A. C., & Trejo-Vázquez, R. I. (2015). *Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación en México y Centroamérica*. México, DF, México: Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de <http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas/>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen* (5ª ed.). México, DF, México: Instituto de Geografía, Universidad Autónoma de México.
- Gobierno de México, Diario Oficial de la Federación. (2 de octubre, 2013). *Declaratoria de desastre natural por la ocurrencia de lluvia severa e inundación del 12 al 18 de septiembre de 2013 en 22 municipios del estado de San Luis Potosí*. Recuperado de https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5316146&fecha=02/10/2013#gsc.tab=0

- Guédet-Guédé, K., Yu, Z., Simonovic, S. P., Gu, H., Franck-Emani, G., Badji, O., Chen, X., Sika, B., & Adiaffi, B. (2025). Combined effect of landuse/landcover and climate change projection on the spatiotemporal streamflow response in cryosphere catchment in the Tibetan Plateau. *Journal of Environmental Management*, 376, 124353. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124353>
- Guo, A., Chang, J., Wang, Y., Huang, Q., Guo, Z., & Li, Y. (2019). Uncertainty analysis of water availability assessment through the Budyko framework. *Journal of Hydrology*, 576, 396-407. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.033>
- INEGI & Conabio, Instituto Nacional de Estadística y Geografía & Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2017). *Catálogo de localidades indígenas en México, INEGI, 2010*. Ciudad de México, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía, y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Recuperado de <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/urbrloc10gw.html>
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). *Climate Change 2007, Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511546013>

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. (2012). *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A special report of working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Intergovernmental Panel on Climate Change.

Itsukushima, R. (2018). Countermeasures against floods that exceed design levels based on topographical and historical analyses of the September 2015 Kinu River flooding. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 19 (May), 211-223.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.10.001>

Janizadeh, S., Chandra-Pal, S., Saha, A., Chowdhuri, I., Ahmadi, K., Mirzaei, S., Hossein-Mosavi, A. P., & Tiefenbacher, J. (2021). Mapping the spatial and temporal variability of flood hazard affected by climate and land-use changes in the future. *Journal of Environmental Management*, 298(2021) 113551.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113551>

Jia, H., Chen, F., Pan, D., Du, E., Wang, L., Wang, N., & Yang, A. (2022). Flood risk management in the Yangtze River basin —Comparison of 1998 and 2020 events. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 68(October 2021), 102724.
<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102724>

Kumar, S., Radhakrishnan, N., & Mathew, S. (2014). Land use change modelling using a Markov model and remote sensing. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 5(2), 145-156.
<https://doi.org/10.1080/19475705.2013.795502>

- Le Coz, J., Patalano, A., Collins, D., Guillén, F. N., García, M., Smart, G., Bind, J., Chiaverini, A., Le Boursicaud, R., Dramais, G., & Braud, I. (2016). Crowdsourced data for flood hydrology: Feedback from recent citizen science projects in Argentina, France and New Zealand. *Journal of Hydrology*, 541, Part B, 766-777. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.07.036>
- Lerner, A. M., Eakin, H. C., Tellman, E., Bausch, J. C., & Hernández-Aguilar, B. (2018). Governing the gaps in water governance and land-use planning in a megacity: The example of hydrological risk in Mexico City. *Cities*, 83, 61-70. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.06.009>
- Liu, J., Chen, D., Mao, G., Irannezhad, M., & Pokhrel, Y. (2022). Past and future changes in climate and water resources in the Lancang-Mekong River Basin: Current understanding and future research directions. *Engineering*, 13, 144-152. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.06.026>
- Lugo-Hubp, J. (1990). El relieve de la república mexicana. *Revista del Instituto de Geología*, 9, 82-111.
- Lundgren, M., & Strandh, V. (2022). Navigating a double burden – Floods and social vulnerability in local communities in rural Mozambique. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 77, 103023. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.103023>
- Luo, P., He, B., Takara, K., Xiong, Y. E., Nover, D., Duan, W., & Fukushima, K. (2015). Historical assessment of Chinese and Japanese flood management policies and implications for managing future floods. *Environmental Science and Policy*, 48, 265-277. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2014.12.015>

- Martínez-Carrillo, D. A., Flórez-Yepes, G. Y., Bermúdez-Piedrahita, J. M., Alzate-Alvarez, A. M., Aldana-Arcila, E. J., & Vásquez-Cardona, P. A. (2025). Identifying aquifer recharge areas based on secondary information in the Chinchiná river basin and reviewing its current status. *Water Cycle*, 7, 139-150. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2025.05.006>
- Magaña, V., & Caetano, E. (2007). *Informe final del proyecto: 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 INE/A1-006/2007). Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Noszczyk, T. (2019). A review of approaches to land use changes modeling. *Human and Ecological Risk Assessment*, 25(6), 1377-1405. <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1468994>
- Oropeza, J. L. (1999). Modelos matemáticos y su aplicación al manejo de cuencas hidrográficas y paradigmas. En: *IX Congreso Nacional de Irrigación: simposio 4. Manejo integral de cuencas hidrológicas* (pp. 21-28). Sinaloa, México: Asociación Nacional de especialistas en Irrigación A.C. (ANEI A.C.).
- Palacio-Aponte, G., & Julio-Miranda, P. (2018). Procesos territoriales, económicos y socioculturales de San Luis Potosí. En: *Procesos territoriales, económicos y socioculturales de San Luis Potosí*. <https://doi.org/10.22201/ciga.9786073019620e.2018>

- Pimentel-Equihua, J. L., & Velázquez-Machuca, M. A. (2015). Modelo organizativo para la gestión integral de la cuenca del río Duero, Michoacán. En: Burgos, A. L., Bocco, G., Sosa-Ramirez, J. (eds.). *Dimensiones sociales en el manejo de cuencas* (pp. 277-293). Michoacán, México: Centro de investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA-UNAM).
- PNUD, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2019). *Informe de desarrollo humano municipal 2010-2015. Transformando México desde lo local* (informe s/n). Ciudad de México, México: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
- Ramadan, E. M., Shalash, O. S., Fahmy, M. R., & Abdel-Aal, G. M. (2019). Integrated water resource management in Sharkia Governorate, East Nile Delta using numerical evaluation of water management strategies. *Alexandria Engineering Journal*, 58(2), 757-771. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.06.006>
- Reyes-Hernández, H., Aguilar-Robledo, M., Aguirre-Ribera, J. R., & Trejo-Vázquez, I. (2006). Cambios en la cubierta vegetal y uso del suelo en el área land cover and land use change in the Pujal-Coy project area, San Luis Potosí, México, 1973-2000. *Investigaciones Geográficas*, 59, 26-42.
- Roblero-Hidalgo, R., Chávez-Morales, J., Ibáñez-Castillo, L. A., & Palacios-Vélez, O. L. (2022). Peligro por inundación durante el huracán Stan en la cuenca del río Vicente Guerrero, Siltepec, Chiapas, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 13(2), <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2022-02-02>

- Rodríguez-Flores, S., Muñoz-Robles, C., Ortiz-Rodríguez, A. J., Quevedo-Tiznado, J. A., & Julio-Miranda, P. (2022). Historical and projected changes in hydrological and sediment connectivity under climate change in a tropical catchment of Mexico. *Science of the Total Environment*, 848. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157731>
- Rodríguez-Flores, S., Muñoz-Robles, C., Quevedo-Tiznado, J. A., & Julio-Miranda, P. (2024). Conectividad hidrológica y estructura del paisaje en la subcuenca Santa Cruz de Aquismón. En: Leija-Loredo, E. G., Mendoza-Cantú, M. E., & Pérez-Hernández, M. J. (eds.). *La conectividad del paisaje como enfoque integrador en el manejo y conservación del territorio* (pp. 89-107). Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA-UNAM). <https://doi.org/10.22201/ciga.9786073087629e.2024>
- Rodríguez-Flores, S., Muñoz-Robles, C., Quevedo-Tiznado, J. A., & Julio-Miranda, P. (2025). Assessment of watershed health, integrating environmental, social, and climate change criteria into a fuzzy logic framework. *Science of the Total Environment*, 960, 178316. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.178316>
- Salazar-Briones, C., Hallack-Alegría, M., Mungaray-Moctezuma, A., Lomelí, M. A., Lopez-Lambraño, A., & Salcedo-Peredia, A. (2018). Hydrological and hydraulic modeling of an intra-urban river in a transboundary basin using a regional frequency analysis. *Tecnología y ciencias del agua*, 9(4), 48-74. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-04-03>

- Santillán-Fernández, A., Santoyo-Cortés, V. H., García-Chávez, L. R., Covarrubias-Gutiérrez, I., & Merino, A. (2016). Influence of drought and irrigation on sugarcane yields in different agroecoregions in Mexico. *Agricultural Systems*, 143, 126-135. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2015.12.013>
- Sevillano-Rodriguez, M. E., Bravo-Peña, L. C., Alatorre-Cejudo, L. C., & Salcedo-Hurtado, E. J. (2020). Identificación de zonas de inundación a partir de imágenes (SAR) y de eventos históricos de inundación: caso de estudio Santiago de Cali, Colombia. *Cuadernos Geográficos*, 59(2), 308-329. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v59i2.9641>
- Shadmehri-Toosi, A., Doulabian, S., Ghasemi-Tousi, E., Humberto-Calbimonte, G., & Sina-Alaghmand, S. (2020). Large-scale flood hazard assessment under climate change: A case study. *Ecological Engineering*, 147, 105765. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105765>
- Shah, M. A. R., Renaud, F. G., Anderson, C. C., Wild, A., Domeneghetti, A., Polderman, A., Votsis, A., Pulvirenti, B., Basu, B., Thomson, C., Panga, D., Pouta, E., Toth, E., Pilla, F., Sahani, J., Ommer, J., El Zohbi, J., Munro, K., Stefanopoulou, M., Loupis, M., Pangas, N., Kumar, P., Debele, S., Preuschmann, S., & Zixuan, W. (2020). A review of hydro-meteorological hazard, vulnerability, and risk assessment frameworks and indicators in the context of nature-based solutions. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 50(February), 101728. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101728>

- Soto-Galera, E., Alcántara-Soria, L., & Paulo-Maya, J., (2018). *Estado actual, identificación de riesgos y propuestas para el manejo de las especies invasoras presentes en las regiones hidrológicas prioritarias, confluencia de las Huastecas, Media Luna y Cabecera del río de La Laja*. Recuperado de <http://ipttest.conabio.gob.mx/iptconabiotest/resource?r=SNIB-LI038#anchor-description>
- Suástegui-Cruz, S. (2021). Estrategias para la seguridad hídrica ante los cambios de precipitación por efectos del cambio climático. *RIDE. Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, 12(23), e02912. <https://doi.org/10.23913/ride.v12i23.1039>
- Tate, E., Rahman, M. A., Emrich, C. T., & Sampson, C. C. (2021). Flood exposure and social vulnerability in the United States. *Natural Hazards*, 106(1), 435-457. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04470-2>
- Therneau, T., Atkinson, B., & Ripley, B. (2019). *Rpart: recursive partitioning for classification, regression and survival trees*. Recuperado de <https://cran.r-project.org/package=rpart>
- Turnbull, L., & Wainwright, J. (2019). From structure to function: Understanding shrub encroachment in drylands using hydrological and sediment connectivity. *Ecological Indicators*, 98, 608-618. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.11.039>
- UASLP, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. (2018). *Programa estatal de acción ante el cambio climático del estado de San Luis Potosí* (informe s/n). San Luis Potosí, México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

- UNDRR, UN Sustainable Development Cooperation Framework (2020). *Integrating disaster risk reduction and climate change adaptation in the UN Sustainable Development Cooperation Framework (informe: Guidance Note on Using Climate and Disaster Risk Management to Help Build Resilient Societies)*. Geneva, Switzerland: UN Sustainable Development Cooperation Framework (UNDRR).
- Wang, Y. J., Gao, C., Zhai, J. Q., Li, X. C., Su, B. D., & Hartmann, H. (2014). Spatio-temporal changes of exposure and vulnerability to floods in China. *Advances in Climate Change Research*, 5(4), 197-205.
- Wang, M., Zhao, J., Xiong, Z., Zhang, M., Wang, L., & Tan, S. K. (2025). Strategic deployment of nature-based solutions for urban flood management in high-density urban landscapes. *Ecological Indicators*, 176, 113681. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113681>
- Ward, P. J., De Ruiter, M. C., Mård, J., Schröter, K., Van Loon, A., Veldkamp, T., von Uexkull, N., Wanders, N., AghaKouchak, A., Arnbjerg-Nielsen, K., Capewell, L., Carmen-Llasat, M., Day, R., Dewals, B., Di Baldassarre, G., Huning, L. S., Kreibich, H., Mazzoleni, M., Savelli, E., Teutschbein, C., van den Berg, H., van der Heijden, A., Vincken, J. M. R., Waterloo, M. J., & Wens, M. (2020). The need to integrate flood and drought disaster risk reduction strategies. *Water Security*, 11. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2020.100070>

- Yifru, B. A., Chung, I.-M., Kim, M.-G., & Chang, S. W. (2021). Augmenting freshwater availability in mountain headwater streams: Assessing the sustainability under baseline and future climate change scenarios. *International Soil and Water Conservation Research*, 10, 293-307. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.08.002>
- You, Q., Fang, N., Jian, M., Hu, Q., Yao, B., Liu, D., & Yang, W. (2022). A reliability-resilience-vulnerability framework for measuring the influence of changes in water level fluctuations on lake conditions. *Ecological Indicators*, 134, 108468. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108468>
- Yuan-Fu, Z., Ming-Jui, C., & Gwo-Fong, L. (2024). A novel AI-based model for real-time flooding image recognition using super-resolution generative adversarial network. *Journal of Hydrology*, 638, 131475. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131475>
- Zhao, Y., Weng, Z., Chen, H., & Yang, J. (2020). Analysis of the evolution of drought, flood, and drought-flood abrupt alternation events under climate change using the daily SWAP index. *Water (Switzerland)*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/w12071969>