

► Regional and global databases for flood exposure analysis

BASES DE DATOS REGIONALES Y GLOBALES



para el análisis
de la exposición ante
inundaciones

44

UDLAP®

Por:  Edith Bonilla López · Carlos Patiño Gómez

Bonilla López, E. y Patiño Gómez, C. Bases de datos regionales y globales para el análisis de la exposición ante inundaciones *Entorno UDLAP*, 20.

 **Recibido:** 13 de febrero de 2023  **Aceptado:** 6 de junio de 2023

► Regional and global databases for flood exposure analysis

BASES DE DATOS REGIONALES Y GLOBALES



para el análisis
de la exposición ante
inundaciones

44

UDLAP®

Por:  Edith Bonilla López · Carlos Patiño Gómez

Bonilla López, E. y Patiño Gómez, C. Bases de datos regionales y globales para el análisis de la exposición ante inundaciones *Entorno UDLAP*, 20.

 **Recibido:** 13 de febrero de 2023  **Aceptado:** 6 de junio de 2023

RESUMEN

Dentro de los estudios preliminares necesarios para el manejo de inundaciones a nivel de cuenca, la definición de la exposición ante este fenómeno es primordial, ya que corresponde a la base técnica de las acciones de la gestión integral del riesgo por inundación. Para estar en posibilidades de realizar el análisis de exposición, uno de los retos principales es contar con información sobre los factores que propician la ocurrencia de inundaciones, como cambios en la presencia de agua superficial, cambio de uso de suelo, precipitación normal y afectada por cambio climático, vulnerabilidad de asentamientos humanos y exposición económica. En particular, a nivel regional la información existente tiene ciertas limitaciones y una alternativa viable es hacer uso de fuentes de información a escala global para el establecimiento de aquellas cuencas que presenten mayor exposición ante este fenómeno y que requieren atención prioritaria para la reducción del riesgo por inundación.

PALABRAS CLAVE:

Inundaciones · Análisis de exposición · Base de datos

ABSTRACT

Within the preliminary analyses necessary for flood management at the basin level, the definition of exposure to this phenomenon is essential since it corresponds to the technical basis of the actions of flood risk management. In order to conduct a flood exposure analysis, one of the main challenges is to have information on the various factors that trigger the occurrence of floods, such as the change on the presence of surface water, variations in land use, normal precipitation and affected by climate change, vulnerability of human settlements and economic exposure. At the regional level, the information available has certain limitations and a viable alternative is to make use of global scale databases to establish those basins that present the greatest exposure to this phenomenon and that require priority attention for flood risk reduction.

KEYWORDS:

Flood · Exposure analysis · Database



INTRODUCCIÓN

Los desastres hídricos son el resultado de interacciones muy complejas entre el océano, la atmósfera y la tierra, pero también de la exposición y vulnerabilidad de los sistemas humanos y naturales. De acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2014 en Jiménez-Cisneros, 2015), si bien la información disponible sobre la magnitud y frecuencia de eventos de inundación es escasa para relacionar la variación del fenómeno por el cambio climático antropogénico, las pérdidas económicas y afectaciones a la población se incrementaron después de la segunda mitad del siglo xx, debido a una mayor exposición y vulnerabilidad de la población. La creciente urbanización agrava los impactos socioeconómicos negativos derivados de desastres climáticos, como las sequías e inundaciones, tal como lo señala Naciones Unidas (2009, 2011) y Jha *et al.* (2012), lo cual se refleja en el aumento del área impermeable y la disminución de la infiltración, pudiendo convertirse en inundaciones frecuentes y severas.

Entre las pérdidas económicas debidas a daños por fenómenos naturales a nivel mundial, aquellas que son resultado de inundaciones se estiman en alrededor del 34 % (Munich Re, 2017). Específicamente en México, como lo determinó el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2022), en el periodo de 2000 a 2020, la mayor cantidad de daños y pérdidas correspondieron a desastres de origen hidrometeorológico, principalmente inundaciones. Las afectaciones por inundaciones no sólo implican la pérdida de vidas humanas o de bienes materiales, sino que también van acompañadas de la interrupción de servicios de comunicación,



LAS AFECTACIONES POR INUNDACIONES NO SÓLO IMPLICAN LA PÉRDIDA DE VIDAS HUMANAS O DE BIENES MATERIALES, SINO QUE TAMBIÉN VAN ACOMPAÑADAS DE LA INTERRUPCIÓN DE SERVICIOS DE COMUNICACIÓN, ELECTRICIDAD, AGUA POTABLE, PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS, TRANSPORTE, ENTRE OTROS.

electricidad, agua potable, producción de alimentos, transporte, entre otros.

Por ello, es necesario contemplar estos eventos dentro de los análisis de exposición para la correcta gestión de riesgo por inundación de cada región o cuenca de interés. Algunos factores que se pueden revisar son la variación en la presencia de agua superficial, el cambio de uso de suelo, la climatología, la precipitación ante cambio climático, la presencia de ciclones tropicales, las inundaciones históricas, la vulnerabilidad de asentamientos humanos ante inundaciones, así como la exposición económica.

Sin embargo, existen retos al llevar a cabo lo anterior, como el estado de los instrumentos de medición y la falta de información detallada, con buena resolución espacial, temporal y continua, y una ubicación adecuada. Se debe

resaltar la importancia de estos instrumentos de medición para el conocimiento del ciclo hidrológico y la planeación del recurso hídrico. Asimismo, la disponibilidad de información generada por instituciones gubernamentales, educativas y privadas también es vista como un reto, lo cual supondría un riesgo para el desarrollo y alcances de nuevos proyectos de investigación que pudieran resolver de mejor manera las problemáticas en torno al agua.

Ante esta situación, con la finalidad de contar con información, bajo ciertas consideraciones se puede hacer uso de las ventajas que proporcionan las bases de datos a escalas regionales o globales. Diversas instituciones a nivel mundial, que se han encargado de analizar diferentes variables y condiciones de resolución espacial y temporal, han puesto a disposición del público en general dichas bases de datos.

Al contar con información respecto a los factores que determinan la exposición ante inundaciones, será posible priorizar acciones sobre aquellas cuencas o regiones que presenten una mayor tendencia a la ocurrencia de eventos de inundación, aportando a la mejora del manejo de este fenómeno, buscando reducir y mitigar el riesgo por inundación, protegiendo a la población y sus bienes y garantizando su derecho humano a una vivienda que no se encuentre expuesta a peligro de inundación y a un ambiente sano.

Desarrollo


Para el caso del análisis de la exposición a las inundaciones y siguiendo el enfoque de la Gestión Integrada del Recurso Hídrico, que sostiene que la unidad básica es la cuenca hidrológica

Entre las pérdidas económicas debidas a daños por fenómenos naturales a nivel mundial, aquellas que son resultado de **inundaciones**



se estiman en alrededor del

34 %.



**SE PRESENTA UN PRIMER
ACERCAMIENTO A ALGUNAS DE
LAS BASES DE DATOS DISPONIBLES
A ESCALA REGIONAL Y GLOBAL,
RELACIONADAS CON LOS FACTORES
QUE INCIDEN EN LA EXPOSICIÓN
ANTE INUNDACIONES.**

(Astorga, 2013; Valencia *et al.*, s. f.), es recomendable verificar los diferentes factores que desencadenan la ocurrencia de inundaciones a nivel cuenca. Dependiendo de la escala espacial a la que se requiera realizar el estudio, una fuente de información digital para México es la capa de las 757 cuencas hidrológicas en las que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) divide al país con la finalidad de calcular la disponibilidad de agua superficial (CONAGUA, 2022c). No obstante, se deberá tener en cuenta en los análisis la totalidad del área de drenaje con influencia hacia el sitio de interés, por lo que, en algunos casos, la cuenca total de aportación podrá contemplar una mayor área de la determinada por las cuencas predefinidas.

A continuación, se presenta un primer acercamiento a algunas de las bases de datos disponibles a escala regional y global, relacionadas con los factores que inciden en la exposición ante inundaciones.

Cambio en la presencia de agua superficial

A través de un análisis de imágenes satelitales obtenidas entre 1984 y 2015, con resolución de 30 metros, se determinaron zonas donde se han observado incrementos o disminución de la presencia de agua superficial en este periodo, la intensidad determina el grado de cambio ocurrido, expresado como porcentaje, en el que una mayor intensidad positiva, se referirá a un mayor incremento en la presencia de agua superficial. Esta base de datos denominada *Global Surface Water* (Pekel *et al.*, 2016) puede ser consultada y descargada desde Google Earth Engine para la zona de estudio de interés. Cabe mencionar que las zonas donde existe presencia de agua superficial son cuerpos de agua o corrientes, naturales o artificiales, por lo que las variaciones pueden ser consecuencia de cambios en el comportamiento hidrológico e hidráulico de la cuenca. La figura 1 muestra la situación del porcentaje de intensidad de cambio de presencia de agua superficial para México.

Cambio de uso de suelo

Un reflejo del impacto de las actividades humanas es la variación temporal y espacial del uso de suelo. A nivel global, se analizaron imágenes satelitales tomadas entre 1984 y 2015 para definir el número de cambios en el uso de suelo utilizando percepción remota (Winkler *et al.*, 2021). Así, fue posible identificar aquellas regiones donde se han presentado mayores cam-

bios entre los diferentes tipos de uso de suelo. Estos cambios tienen impactos en la respuesta hidrológica e hidráulica de sus cuencas, y pueden incrementar la intensidad y frecuencia de las inundaciones. De manera particular, en lo que respecta a la expansión urbana, un estudio adicional basado también en imágenes satelitales con resolución de 30 metros, para el periodo comprendido entre 2000 y 2020, aplicando técnicas de *machine learning*, determinó los cambios en la extensión y altura de bosques, cultivos, zonas urbanas, agua superficial y perene (Potapov *et al.*, 2022). Un aspecto resaltable de estas bases de datos es que procesaron información reciente, a diferencia de la temporalidad disponible a nivel regional.

Adicionalmente, en México se cuenta con información digital disponible sobre el uso de suelo para diferentes escenarios temporales a nivel nacional, publicada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2016), la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2022) y la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2021). De acuerdo con el *Informe de la situación del medio ambiente en México* (SEMARNAT, 2018), la mayor parte de las transformaciones de la vegetación primaria del país ocurrieron antes de la década de los setenta y aún se observan pérdidas de más de 50,000 hectáreas anuales en selvas y matorrales, aproximadamente. Cabe mencionar que entre la información disponible para diferentes fechas existen casos en los que los datos cuentan con distintas características de



CAMBIOS EN EL USO DE SUELO TIENEN IMPACTOS EN LA RESPUESTA HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE SUS CUENCAS, Y PUEDEN INCREMENTAR LA INTENSIDAD Y FRECUENCIA DE LAS INUNDACIONES.

escala, resolución y clasificación, lo que deriva en complicaciones al momento de utilizarlas o realizar comparativas.

A escala del territorio nacional se han llevado a cabo esfuerzos para desarrollar análisis de los cambios del uso de suelo, en específico, en los periodos de 1970 a 2002 (Sánchez *et al.*, 2009) y de 2005 a 2011 (CONABIO, 2023), donde se muestran las áreas con uno o más cambios acumulados por año sobre el uso de suelo, como se puede observar en la figura 2, y recientemente a través del Sistema Satelital de Monitoreo Forestal que ha avanzado en el proceso de mapas de cobertura de suelo con año base 2016 y de cambio de cobertura para los periodos 2000-2003, 2003-2011, 2011-2014 y 2014-2016, sin embargo, al momento únicamente se cuenta con mapas para los estados de Campeche, Chiapas, Jalisco, Quintana Roo y Yucatán (CONAFOR, 2021).

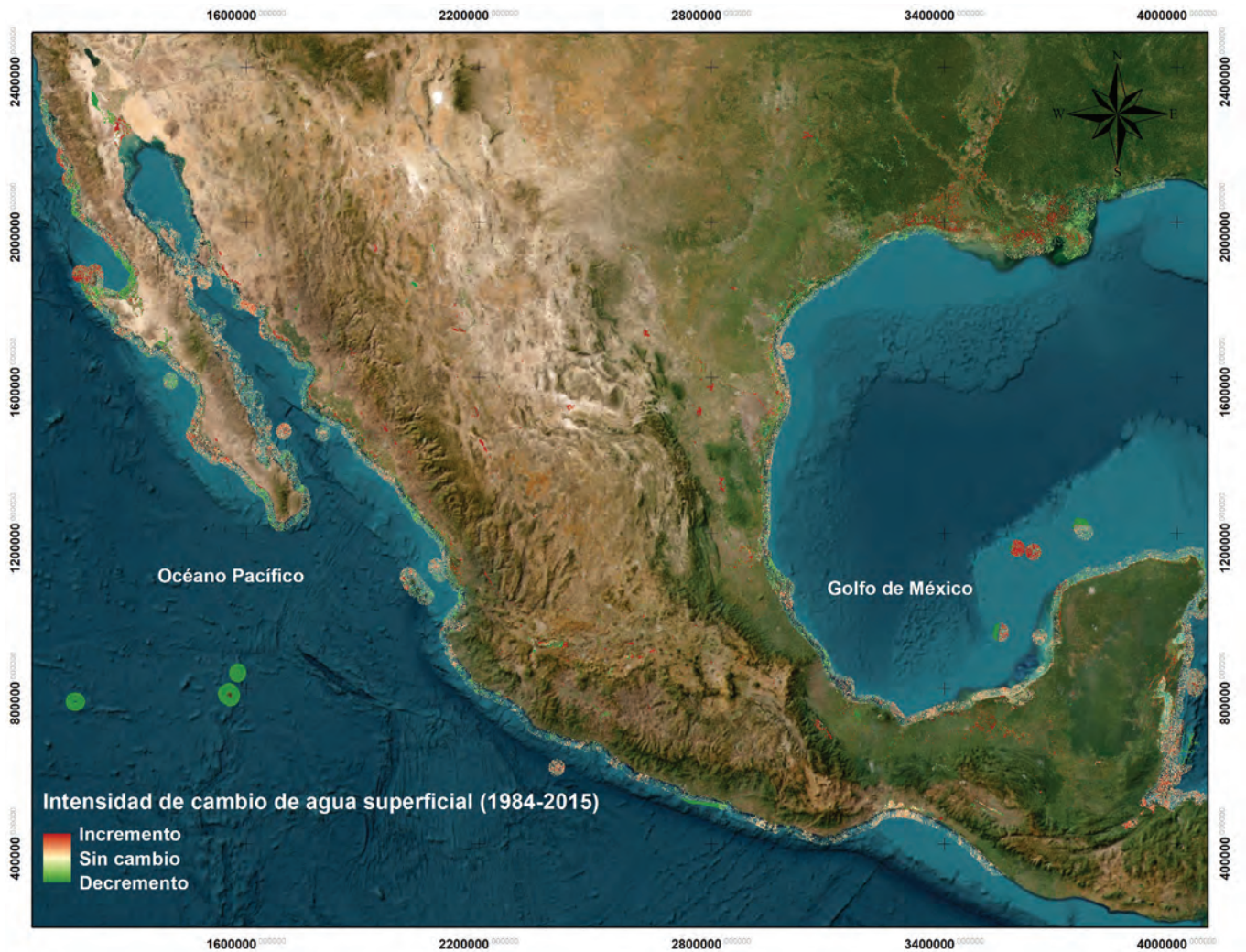


Figura 1. Porcentaje de intensidad de cambio en la presencia de agua superficial en México.

- Mediante el análisis de imágenes satelitales obtenidas entre 1984 y 2015 (resolución 30 m) se determinaron zonas donde se observó un incremento o disminución de la presencia de agua superficial.
- La intensidad determina el grado de cambio ocurrido: mayor intensidad positiva refleja un incremento mayor en la presencia de agua superficial.
- La base de datos Global Surface Water se puede consultar y descargar desde Google Earth Engine para la zona de estudio de interés.

Fuente: elaboración propia con información de Pekel *et al.*, 2016.



Figura 2. Áreas con cambio en uso de suelo entre 2005 y 2011 para México.

- Se identificaron aquellas regiones donde se han presentado mayores cambios entre los tipos de uso de suelo, a partir del análisis de imágenes satelitales tomadas entre 1984 y 2015.
- Los cambios en el uso de suelo afectan la respuesta hidrológica e hidráulica de las cuencas y pueden incrementar la intensidad y frecuencia de las inundaciones.
- En México, la mayor parte de las transformaciones de la vegetación primaria del país ocurrieron antes de la década de los setenta, pero aún se observan pérdidas de más de 50,000 hectáreas anuales en selvas y matorrales (SEMARNAT, 2018).

Fuente: elaboración propia con información de CONABIO (2023).

México cuenta con registros históricos de estaciones climatológicas a cargo de instituciones gubernamentales, educativas o particulares, los cuales son recopilados por el Sistema Meteorológico Nacional y se encuentran disponibles a través de diversas bases de datos.

Precipitación normal anual

Para México, según la climatología del periodo 1991-2020 analizada por la CONAGUA y el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) con los datos de 1,665 estaciones climatológicas, se cuenta actualmente con información de la precipitación normal anual y mensual (CONAGUA, 2022b). Al conocer el comportamiento de esta variable climatológica, es posible caracterizar a las regiones de interés en cuanto al volumen de agua que podría considerarse como disponible para transformarse en escurrimiento o infiltrarse (figura 3).

De analizarse los datos de manera mensual, de igual forma se presenta la oportunidad de describir el comportamiento de la precipitación para las temporadas principales de estiaje y lluvias. Para los casos de estudios relacionados con eventos de inundación, el análisis de la ocurrencia de precipitación en la temporada de lluvias es relevante.

Respecto a los datos de precipitación diaria, a nivel nacional se cuenta con registros históricos de diversas estaciones climatológicas a cargo de varias instituciones gubernamentales, educativas o particulares, los cuales son recopilados por el SMN y se encuentran disponibles en bases de datos como el Sistema de Información Hidrológica (CONAGUA, 2019) y la plataforma del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE, 2022). Si bien el número de estaciones existentes, operando o no, se podría considerar vasto, las series de datos cuentan con periodos discontinuos de información, tanto para una misma estación como entre ellas, lo cual resulta en dificultades para su empleo al momento de analizar el comportamiento de la precipitación ponderada para una cuenca hidrológica.

Como alternativa para llevar a cabo análisis climatológicos, existe la base de datos denominada Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data (CHIRPS), que consiste en datos diarios, mensuales y quinquenales de precipitación, con extensión cuasi global y alta resolución, creada por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional del Sistema de Alerta Temprana de Hambruna (Funk *et al.*, 2015). El periodo de registro es superior a los 35 años, desde 1981 a la fecha. Esta información compila datos satelitales y de estaciones en campo, creando series de tiempo de lluvia que se encuentran disponibles en formato de malla o tabular. Para la región de México, el SMN proporciona la información de las estaciones climatológicas para la corroboración de los datos satelitales empleados. Para acceder a esta información existen diferentes plataformas, como ClimateServ de Servir Global, donde los datos de precipitación históricos pueden ser descargados para el área de interés a partir de un archivo vectorial tipo *shapefile* comprimido o GeoJSON.

Precipitación ante el cambio climático

Respecto al estudio de los efectos del cambio climático sobre la variable de precipitación, se han analizado los modelos de circulación global que muestran una mejor representación para las condiciones particulares de ciertas regiones. Para el caso de México, entre los que se ajustan mejor se encuentra el modelo francés denominado CNRM CM5 (Centre National de Recherches Météorologiques), de acuerdo con Cavazos *et al.* (2013) citado en INECC (2022). El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) tiene disponible para descarga los archivos digitales de las anomalías de temperatura y pre-

cipitación por mes, para los diferentes modelos y trayectorias representativas de emisiones de CO_2 y horizontes temporales. De manera similar a la precipitación normal, al verificar la respuesta de esta variable ante las anomalías mensuales definidas por algún escenario, trayectorias de concentración representativas y horizontes temporales, para la temporada de lluvias permitiría ver el impacto del cambio climático y prever la tendencia de los volúmenes de escorrentía que pudieran generar inundaciones.

Peligro y presencia de ciclones tropicales

Especialmente para nuestro país, se ha identificado el grado de peligro por ciclones tropicales al que se encuentran expuestos los municipios de México, incluyendo la tasa de excedencia y su intensidad (Jiménez *et al.*, 2012). Esta capa se encuentra disponible en el *Atlas nacional de riesgos* del CENAPRED y es posible descargarla en formato vectorial.

Asimismo, la CONAGUA ha recopilado la localización de aquellos sitios donde han tocado tierra los ciclones tropicales entre 1971 y 2021 (ver figura 4), tanto en el Golfo como en el Pacífico, capa que se encuentra disponible en el portal del Sistema Nacional de Información del Agua (CONAGUA, 2022a). Aunado a esta información, también se debe corroborar el efecto de aquellos ciclones que, si bien no tocaron tierra en el país, tuvieron un impacto negativo.

Inundaciones históricas

Tras la ocurrencia de eventos de inundación, es importante realizar un análisis posevento, en el cual se dimensionen las afectaciones, desde el área de la inundación hasta las pérdidas, tanto de vidas humanas como económi-

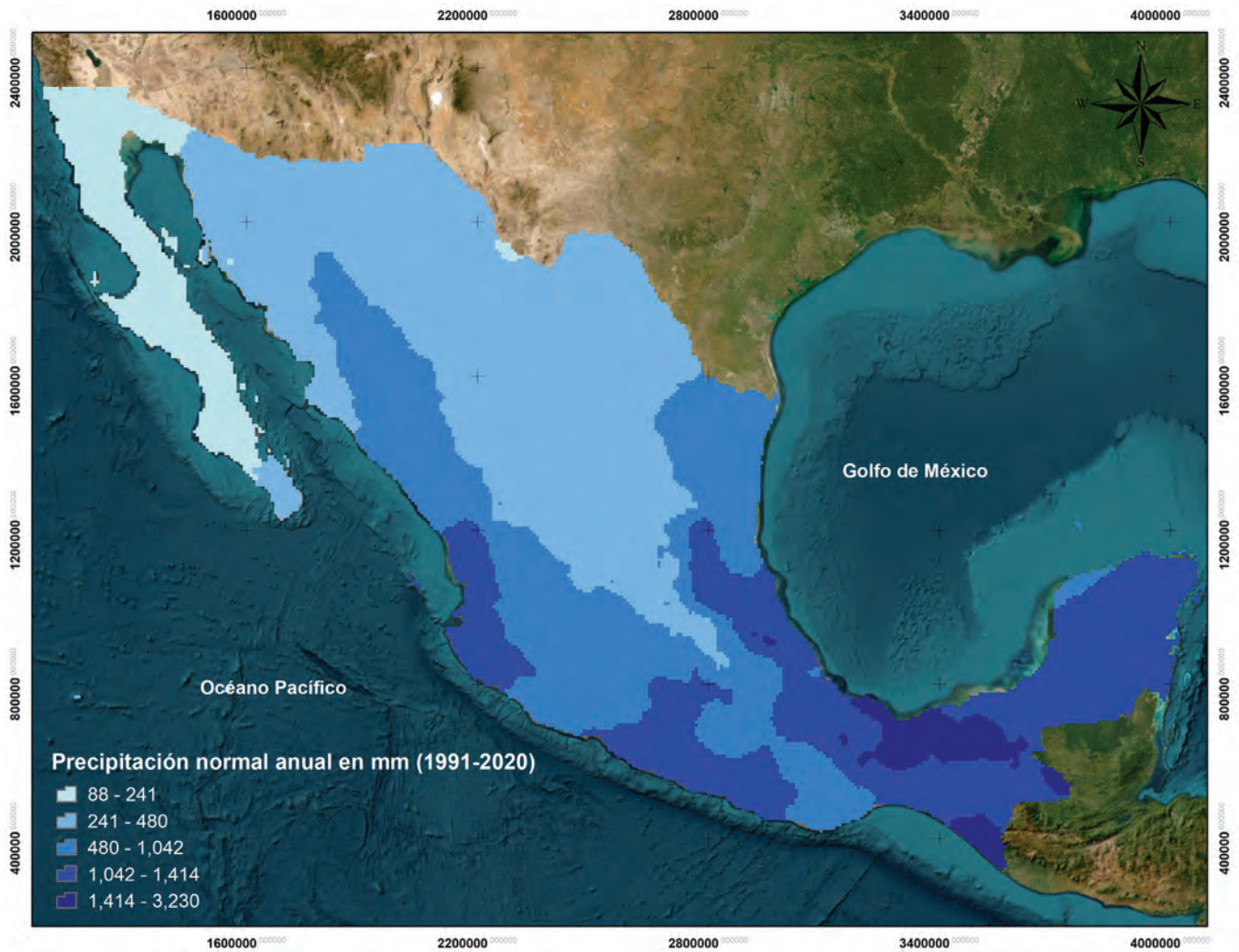


Figura 3. Precipitación normal anual 1991-2020 para México.

- En México, se cuenta con información de la precipitación normal anual y mensual, obtenida por la CONAGUA y el SMN a partir del análisis de la climatología del periodo 1991-2020 con los datos de 1,665 estaciones climatológicas.
- Conocer el comportamiento de esta variable climatológica permite caracterizar las regiones de interés en cuanto al volumen de agua que se podría transformar en escurrimientos o infiltrarse.
- Los datos de precipitación diaria se encuentran disponibles en bases de datos como el Sistema de Información Hidrológica (CONAGUA, 2019) y la plataforma del CICESE.

Fuente: elaboración propia con información de la CONAGUA (2022b).



Figura 4. Presencia de ciclones tropicales entre 1970 y 2021.

- Se ha identificado el grado de peligro por ciclones tropicales al que están expuestos los municipios de México, incluyendo la tasa de excedencia y su intensidad.
- La información está disponible en el Atlas Nacional de Riesgos del CENAPRED y es posible descargarla en formato vectorial.
- La CONAGUA ha recopilado la localización de aquellos sitios donde han tocado tierra los ciclones tropicales entre 1971 y 2021, tanto en el Golfo como en el Pacífico. La información se encuentra disponible en el portal del Sistema Nacional de Información del Agua.

Fuente: elaboración propia con información de la CONAGUA (2022a).

cas. El CENAPRED tiene disponible en su *Atlas nacional de riesgos para México* (CENAPRED, s. f.), una relación de la extensión de inundaciones históricas recopiladas para todo el país, desde 2009 hasta 2021. En la base de datos se presentan las manchas de inundación o polígonos reconocidos tanto en campo como desde imágenes satelitales de cada evento.

A escala global, se dispone de diversas bases de datos que conjuntan información de inundaciones históricas con base satelital del sensor denominado Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) y de asentamientos humanos, como The Global Flood Database, que maneja datos para un periodo de 15 años, incorporando las fechas de ocurrencia, origen, área afectada y pérdidas humanas (Tellman *et al.*, 2021). Desde su plataforma web se permite la descarga en archivo tipo ráster del área inundada y duración para el evento seleccionado.

La utilidad de contar con esta información es servir de base para las acciones de preparación, recuperación, prevención y mitigación del riesgo, para las zonas propensas a inundaciones.

Exposición económica ante inundaciones

Una manera de expresar las afectaciones ocasionadas por los eventos de inundación es en términos económicos. En 2011, la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la

Ciencia y la Cultura (UNESCO) realizó un análisis global utilizando datos geofísicos y meteorológicos para la simulación de inundaciones, incluyendo información de exposición humana, así como la distribución del PIB (Peduzzi *et al.*, 2010). En dicha base de datos, México se encuentra dentro de las principales regiones con bienes expuestos a inundaciones, expresados en función del producto interno bruto (PIB) en dólares a valor del año 2011 (figura 5). Por su parte, el CENAPRED presenta periódicamente el informe escrito *Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México*, donde se valoran los daños a bienes del sector público, privado y social (CENAPRED, 2022).

Vulnerabilidad de asentamientos humanos ante inundaciones

Retomando la tendencia general de expansión de asentamientos humanos, otra herramienta para la toma de decisiones y planteamiento de políticas públicas es conocer la situación actual y futura de la vulnerabilidad ante inundaciones de las zonas urbanas. De ahí que, a nivel regional, el INECC desarrolló el *Atlas nacional de vulnerabilidad ante el cambio climático México*, empleando para su conformación la frecuencia potencial de inundaciones y el índice de estacionalidad de la precipitación, además de la respuesta hidrológica de la cuenca, la



ES IMPORTANTE REALIZAR LOS ANÁLISIS POSEVENTO, EN LOS CUALES SE DIMENSIONAN LAS AFECTACIONES, DESDE EL ÁREA DE LA INUNDACIÓN HASTA LAS PÉRDIDAS, TANTO DE VIDAS HUMANAS COMO ECONÓMICAS.

población susceptible a inundaciones y el porcentaje del municipio con zonas de inundación. Para verificar la capacidad adaptativa, se consideró la existencia de instrumentos para la gestión del riesgo, sistemas de regulación de avenidas, protección y restauración de ecosistemas para prevenir inundaciones, y de protección civil (González *et al.*, 2019). De acuerdo con estos autores, el rango de vulnerabilidad se expresa como «bajo», «medio», «alto» y «muy alto», como se ilustra en la figura 6. Al mismo tiempo, presentan dicha vulnerabilidad asociada a los escenarios de cambio climático derivados de los modelos globales CNRMC-M5, GFDL-CM3, HADGEM2-ES y MPI-ESM-LR, para trayectorias de concentración representativas y horizontes temporales, a nivel municipal y estatal.

Conclusiones

Para estar en posibilidades de llevar a cabo una correcta gestión de los recursos hídricos, incluyendo el manejo de inundaciones como estrategia, es necesario conocer los diferentes factores que determinan la exposición ante inundaciones para cierta región. El conocimiento de estos factores facilita orientar las acciones de manejo, planeación e inversión para la prevención, atención y mitigación de los desastres.

En nuestro país existen oportunidades de mejora en cuanto a la medición y disponibilidad de información de las variables del ciclo hidrológico. A pesar de esta situación, es posible acceder a la información global, con la incertidumbre que conlleva por la resolución de la información base, metodologías y consideraciones aplicadas para su desarrollo.

En lo que se refiere a información disponible de los factores que pueden propiciar un evento de inundación, ésta posibilita, por ejemplo, definir las zonas en las que ha disminuido o aumentado la presencia de agua superficial, así como verificar el notorio crecimiento de la urbanización en las márgenes de las corrientes y en planicies de inundación. Por otra parte, el estudio de los datos de precipitación para temas de inundación, durante la temporada de lluvias, reflejará el comportamiento que ha mostrado esta variable y será posible observar su tendencia considerando escenarios de cambio climático disponibles. Un análisis con mayor detalle incluiría revisar el comportamiento de las intensidades, ya que en el caso en que la precipitación se redujera en magnitud, se podría presentar en duraciones más cortas, provocando, por ejemplo, inundaciones repentinas.

Conocer los diferentes factores que determinan la exposición ante inundaciones

para cierta región permite gestionar correctamente los recursos hídricos, incluyendo el manejo de inundaciones como estrategia. Esto ayuda a orientar las acciones de manejo, planeación e inversión para la

prevención, atención y mitigación de los desastres.

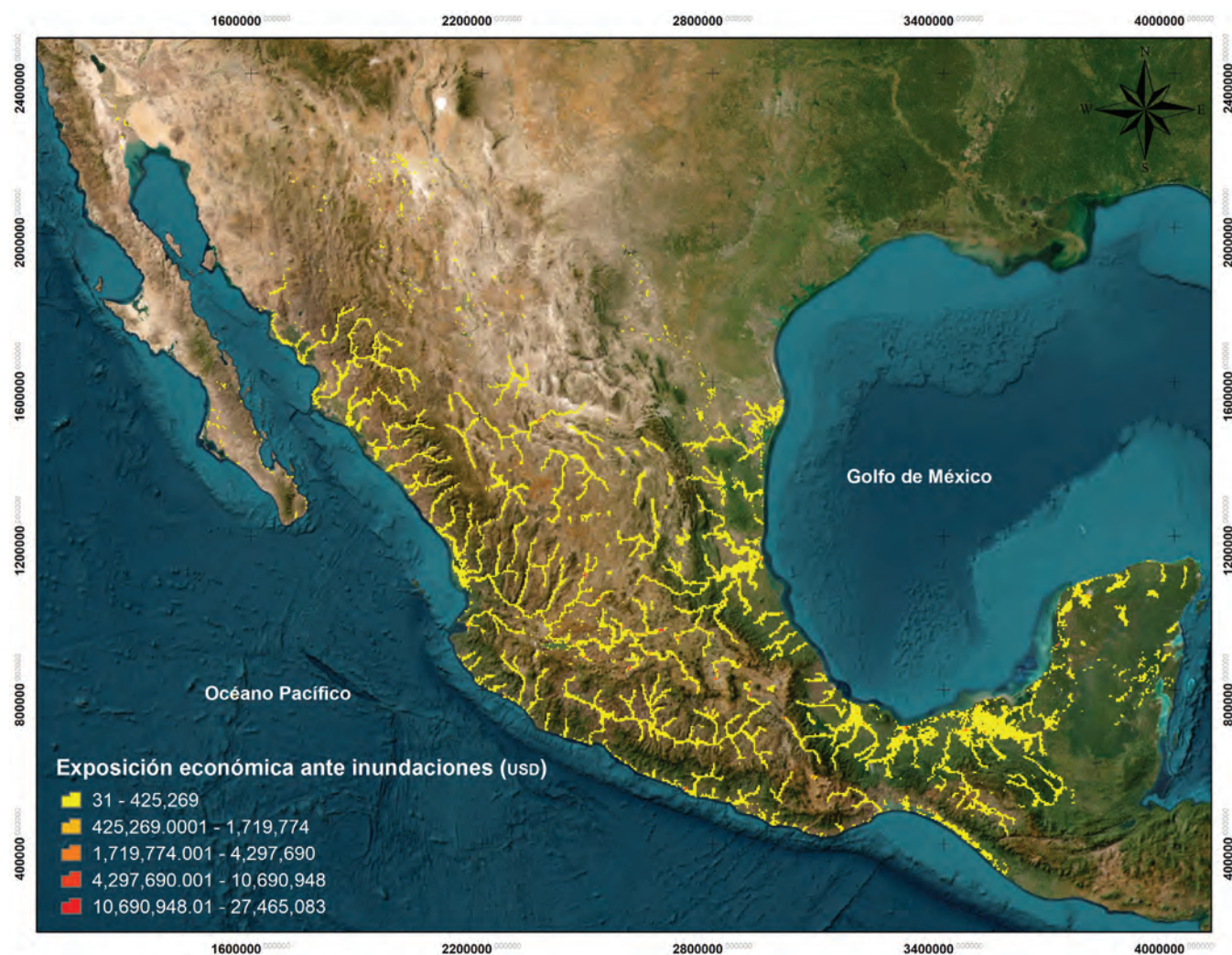


Figura 5. Exposición económica ante inundaciones para México expresada en dólares americanos respecto al PIB de 2011.

- En 2011, la UNESCO realizó un análisis global utilizando datos geofísicos y meteorológicos para la simulación de inundaciones, incluyendo información de exposición humana, así como la distribución del PIB.
- México se encuentra dentro de las principales regiones con bienes expuestos a inundaciones, expresados en función del PIB en dólares a valor del año 2011.
- El CENAPRED presenta periódicamente el informe Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México, donde se valoran los daños a bienes del sector público, privado y social.

Fuente: elaboración propia con información de Peduzzi *et al.* (2010)

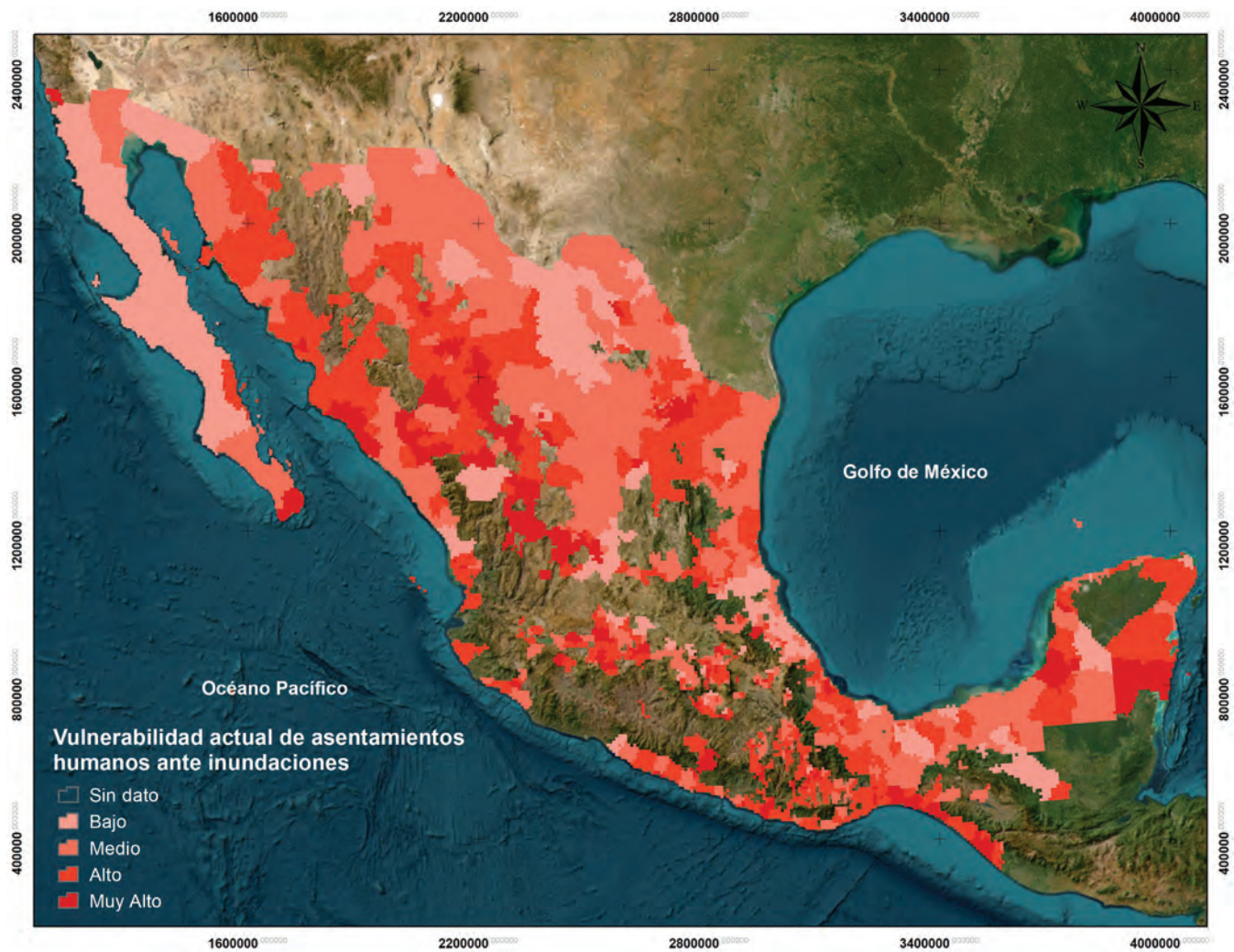


Figura 6. Vulnerabilidad actual de asentamientos humanos ante inundaciones.

- Otra herramienta para la toma de decisiones y el planteamiento de políticas públicas es conocer la situación actual y futura de la vulnerabilidad ante inundaciones de las zonas urbanas del país.
- El INECC desarrolló el *Atlas nacional de vulnerabilidad ante el cambio climático México* a partir de la frecuencia potencial de inundaciones y el índice de estacionalidad de la precipitación, la respuesta hidrológica de la cuenca, la población susceptible a inundaciones y el porcentaje del municipio con zonas de inundación.
- El rango de vulnerabilidad se expresa como «bajo», «medio», «alto» y «muy alto».

Fuente: elaboración propia con información de González *et al.* (2019).

Actualmente existen asentamientos humanos que se encuentran bajo alta y muy alta vulnerabilidad ante inundaciones y continuarán o empeorarán su estado bajo ciertas condiciones de cambio climático, en caso de realizar acciones de mitigación. Además, al contar con información de potenciales daños económicos, se puede evaluar la viabilidad de medidas estructurales y no estructurales.

Algunas de las capas de información presentadas, como la del cambio en el incremento de la urbanización y por ende el uso de suelo, la presencia de agua superficial, así como el conocimiento sobre la variación de las condiciones climatológicas, y las respuestas hidrológicas e hidráulicas, nos recuerdan la necesidad de considerar en el manejo de inundaciones la variabilidad espacial y temporal de este fenómeno.

Vale la pena señalar que el desarrollo y publicación de este tipo de bases de datos se encuentra en constante actualización, por lo que las aquí mostradas no son las únicas disponibles alrededor de las condiciones generadoras de eventos de inundación. Así pues, la necesidad de consultar bases de datos adicionales para el análisis de la exposición ante inundaciones podrá estar sujeta a las características de la zona de interés y de los factores que pueden desencadenar este fenómeno en cada caso particular.



Edith Bonilla-López

Licenciada en Ingeniería Civil por la Universidad Veracruzana y maestra en Ingeniería Civil por la Universidad Nacional Autónoma de México.

Trabajó para la Comisión Nacional del Agua como consultora externa y jefa de proyecto, para atender principalmente temas relacionados con estudios hidrológicos de obras de protección y control, proyectos de delimitación de zonas federales, elaboración de atlas de peligro de inundación y seguimiento del Programa Nacional contra Contingencias Hidráulicas. Actualmente es miembro de la Cátedra UNESCO en Riesgos Hidrometeorológicos y candidata a doctora en Ciencias del Agua por la Universidad de las Américas Puebla, desarrollando su proyecto de investigación sobre el análisis de la variabilidad de las inundaciones y sus repercusiones en criterios técnicos para el manejo de inundaciones.
edith.bonillalz@udlap.mx



Carlos Patiño-Gómez

Es Ingeniero Civil de profesión y maestro en Ciencias en Hidráulica egresado del Instituto Politécnico Nacional. Tiene el título de doctor en

Ingeniería Civil y un posdoctorado con especialidad en recursos hídricos y medioambiente, por parte de la Universidad de Texas en Austin, EE. UU. Miembro del SNI, nivel 1. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de las Américas Puebla, director de la Cátedra UNESCO-UDLAP en Riesgos Hidrometeorológicos y miembro del Consejo Técnico de Cambio Climático del estado de Puebla.

carlos.patino@udlap.mx

REFERENCIAS

- Astorga, Y. (2013). *Guía para la aplicación de la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) a nivel municipal*. Global Water Partnership. https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-cam_files/guia-girh-a-escala-municipal.pdf
- Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. (2022). Base de datos climatología nacional (sistema CLICOM). CICESE. <http://clicom-mex.cicese.mx/>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2022). *Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México*. Resumen ejecutivo 2021. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Coordinación Nacional de Protección Civil. Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana. <https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/487-RESUMENEJECUTIVOIMPACTO2021.PDF>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres. (s. f.). *Atlas Nacional de Riesgo*. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Coordinación Nacional de Protección Civil. Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana. <http://www.atlasmunicipalderiesgos.gob.mx/archivo/visor-capas.html>
- Comisión Nacional del Agua. (2019). Sistema de Información Hidrológica. CONAGUA. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://sih.conagua.gob.mx/>
- Comisión Nacional del Agua. (2022a). Ciclones tropicales 1970-2021. CONAGUA. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/SINA/>
- Comisión Nacional del Agua. (2022b). *Distribución de la precipitación normal 1991-2020*. CONAGUA. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/SINA/>
- Comisión Nacional del Agua. (2022c). *Archivo vectorial de las 757 cuencas hidrológicas de México*. CONAGUA. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/SINA/>
- Comisión Nacional Forestal. (2021). Mapas de cobertura del suelo. CONAFOR. <https://www.gob.mx/conafor/documentos/mapas-de-cobertura-del-suelo-al-ano-base-2016-y-mapas-de-cambios-de-cobertura-del-suelo-del-sistema-satelital-de-monitoreo-forestal>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2023). Cobertura del suelo de México. Portal de Geoinformación 2023. CONABIO <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A. y Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- González, D. I., Vermonden, A., López, F., Gress, F., Rojas, M., Linares, M. A., Machorro, J. y Enríquez, C. (2019). *Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático* (1a ed.). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://atlasvulnerabilidad.inecc.gob.mx/page/fichas/ANVCC_LibroDigital.pdf
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2022). *Guía de escenarios de cambio climático para tomadores de decisiones*. INECC. https://atlasvulnerabilidad.inecc.gob.mx/conten_intro/Guia_de_Escenarios_CC_mar2022.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2016). Uso de suelo y vegetación. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/#-Descargas>
- Jha, A. K., Bloch, R. y Lamond, J. (2012). *Cities and Flooding. A Guide to Integrated Urban Flood Risk Management for the 21st Century*. <https://doi.org/10.1596/978-0-8213-8866-2>
- Jiménez-Cisneros, B. (2015). Seguridad hídrica: retos y respuestas, la fase VIII del programa hidrológico internacional de la UNESCO (2014-2021). *Aqua-LAC*, 7(1), 20-27. <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2015-v7-1-03>
- Jiménez, M., Baeza, C., Matías, L. G. y Eslava, H. (2012). Mapas de índices de riesgo a escala municipal por fenómenos hidrometeorológicos. <http://www.atlasmunicipalderiesgos.gob.mx/descargas/ Metodologias/Hidrometeorologico.pdf>
- Munich, R. E. (2017). *Natural catastrophe losses at their highest for four years*. Munich RE, January. <https://www.munichre.com/en/company/media-relations/media-information-and-corporate-news/media-information/2017/2017-01-04-natural-catastrophe-losses-at-their-highest-for-four-years.html>
- Peduzzi, P., Chatenoux, B., Dao, H., de Bono, A., Deichmann, U., Giuliani, G., Herold, C., Kalsnes, B., Kluser, S., Løvholt, F., Lyon, B., Maskrey, A., Mouton, F., Nadim, F. y Smebye, H. (2010). *The Global Risk Analysis for the 2009 Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction.
- Pekel, J. F., Cottam, A., Gorelick, N. y Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633), 418-422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>
- Potapov, P., Hansen, M. C., Pickens, A., Hernandez-Serna, A., Tyukavina, A., Turubanova, S., Zalles, V., Li, X., Khan, A., Stolle, F., Harris, N., Song, X.-P., Baggett, A., Kommareddy, I. y Kommareddy, A. (2022). The Global 2000-2020 Land Cover and Land Use Change Dataset Derived from the Landsat Archive: First Results. *Frontiers in Remote Sensing*, 3, 1-22. <https://doi.org/10.3389/frsen.2022.856903>
- Sánchez, S., Flores, A., Cruz-Leyva, I. A. y Velázquez, A. (2009). Estado y transformación de los ecosistemas terrestres por causas humanas. En *Capital natural de México: Estado de conservación y tendencias de cambio* (vol. 2, pp. 75-129). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018). *Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave, de desempeño ambiental y de crecimiento verde*. <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/index.html>
- Tellman, B., Sullivan, J. A., Kuhn, C., Kettner, A. J., Doyle, C. S., Brakenridge, G. R., Erickson, T. A. y Slayback, D. A. (2021). Satellite imaging reveals increased proportion of population exposed to floods. *Nature*, 596, 80-86. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03695-w>
- United Nations. (2011). *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction: Revealing Risk, Redefining Development*. United Nations International Strategy for Disaster Reduction.
- United Nations. (2009). *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction. Risk and poverty in a changing climate*. UN-HABITAT.
- Valencia, J. C., Díaz, J. J. y Vargas, L. (s. f.). *La gestión integrada de los recursos hídricos en México*. https://vortice.conagua.gob.mx/storage/files.conagua/upload/05022021_1612548107.pdf
- Winkler, K., Fuchs, R., Rounsevell, M. y Herold, M. (2021). Global land use changes are four times greater than previously estimated. *Nature Communications*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22702-2>