

Capítulo III

Metodología multidisciplinar en la evaluación integral del riesgo de inundación: caso de estudio Ensenada B.C., México

*Ena Gámez Balmaceda*¹, *Alvaro López Lambraño*^{1,2}, *Carlos Villacís*³,
*Georges Seingier*¹, *Hiram Rivera Huerta*¹, *José Baró Suárez*⁴,
*Alvaro López Ramos*⁵, *Luisa Martínez Acosta*⁵

¹ Doctora en Medio Ambiente y Desarrollo. Universidad Autónoma de Baja California. Dirección electrónica: ena.gamez@uabc.edu.mx

² Hidrus

³ Pacific Disaster Center, PDC

⁴ Universidad Autónoma del Estado de México

⁵ Universidad Pontificia Bolivariana

Resumen

El impacto de las inundaciones afecta negativamente los procesos de desarrollo en muchas ciudades del mundo, incluyendo zonas tropicales y zonas semiáridas. Es importante, por lo tanto, la implementación de una adecuada gestión del riesgo, de acuerdo a las características de cada zona, que proteja la vida de los ciudadanos, los bienes públicos, privados y los avances logrados en el proceso de desarrollo. Como una contribución a la gestión del riesgo, basada en evidencia y entendimiento del mismo, se presenta la evaluación integral del riesgo, sobre el impacto directo de las inundaciones en la ciudad de Ensenada. El proceso implica el análisis de los datos de precipitación para la evaluación de la amenaza, el impacto directo de la vulnerabilidad en las viviendas, los daños en su estructura y las pérdidas económicas. Además, se integra el análisis del impacto humano, pérdidas físicas, impacto socio-económico y determinación de prioridades. Se tomaron como base las guías del CENAPRED adaptadas a las condiciones locales, y complementadas con el análisis de estudios sobre evaluación de daños, estudios fronterizos y demográficos para la caracterización social de la ciudad. Los resultados muestran que las viviendas con mayor vulnerabilidad estructural son aquellas de materiales ligeros y de madera, corresponden

a las viviendas autoconstruidas en asentamientos informales y casas móviles. En contraste, las viviendas de mampostería con cimentación rígida son resistentes a la amenaza. Finalmente, se proporciona información necesaria para la determinación de prioridades por parte de las autoridades de gobierno y del sector operativo.

Introducción

El impacto de eventos naturales extremos afecta negativamente los procesos de desarrollo. Esto sucede especialmente en las regiones menos desarrolladas del mundo, donde las áreas urbanas crecen a una tasa mayor que el promedio global y sin una planificación adecuada. La presencia y el aumento constante de asentamientos informales aumentan la vulnerabilidad física y socioeconómica de las áreas urbanas. Dentro de estos eventos extremos, las inundaciones son los eventos naturales más frecuentes en el mundo, constituyendo el 50% de todos los eventos catastróficos reportados globalmente (CRED, 2020). En México, el problema de los desastres relacionados con inundaciones es frecuente en muchos estados, incluyendo zonas semiáridas, como Baja California, principalmente en Tijuana y Ensenada (CENAPRED, 2014; Rodríguez Esteves, 2007).

Ensenada sufre periódicamente los efectos adversos de las inundaciones, desde corrientes que arrastran vehículos y detienen el tráfico vehicular, hasta daños en viviendas e infraestructuras. Derivado de este problema, se han hecho algunos estudios de riesgo de inundación en el municipio, incluyendo el atlas de riesgos de Ensenada, tesis y artículos científicos. Sin embargo, se ha encontrado que algunos estudios, aunque contribuyen a conocer la situación del riesgo, solo hacen un recuento de inundaciones históricas, o solo se enfocan en el análisis de la lluvia, o solo evalúan la vulnerabilidad, o no emplean bien los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo (Pedraza Díaz, 2014; Soares, Blanco, García, Inzunza, & Rousseau, 2011; Torres Navarrete *et al.*, 2012). En ese sentido, para tener un buen entendimiento del riesgo, es importante emplear la terminología global de la Estrategia Internacional para la Reducción del Desastres.

El riesgo a desastre se define como las pérdidas potenciales, en términos de vida o bienes, y su evaluación incluye una revisión de las características técnicas de las amenazas, tales como su ubicación, intensidad, frecuencia y probabilidad; el análisis del grado de exposición y de vulnerabilidad, incluidas las dimensiones físicas y sociales. Amenaza es el evento que desencadena estas pérdidas, exposición se refiere a los elementos que están presentes en las zonas donde existen amenazas, y vulnerabilidad es la susceptibilidad de los elementos expuestos a sufrir daños (UNISDR, 2009). De igual manera, el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) define al riesgo como $R = C \times V \times P$, que equivale a decir: el

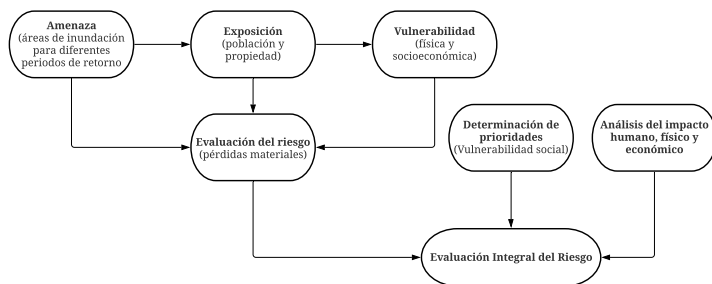
valor de los bienes expuestos (C) por la vulnerabilidad de la vivienda (V), por la probabilidad de la amenaza, en este contexto es peligro por inundación (P).

La herramienta principal para la gestión de riesgo, que todo municipio debe tener, son los atlas de riesgos. Los atlas de riesgos municipales se elaboran con base en los términos de referencia de la Secretaría de Desarrollo Agrario y Territorial Urbano (SEDATU), donde se indica el uso de las guías del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) para toda la República mexicana (CENAPRED, 2006; SEDATU, 2016). Sin embargo, considerando que estas guías están basadas en información física que es cambiante con el tiempo, deben tomarse como base, pero con una adaptación a las condiciones locales, ya que un estudio de riesgo es complejo y muy diferente en cada comunidad.

Dado lo anterior, el objetivo de este capítulo consiste en proporcionar una estrategia para una evaluación integral del riesgo, sobre el impacto directo de las inundaciones en la ciudad de Ensenada, tomando como base las guías del CENAPRED. La metodología de estas guías se complementa con la revisión de otros métodos y se implementa con los datos fisiográficos, socioeconómicos y culturales característicos de la zona. Las características más relevantes de la ciudad en este estudio son: el clima semiárido y su ubicación geográfica, en una zona fronteriza.

Para lograr este objetivo se evalúa la amenaza para diferentes periodos de retorno (Tr), posteriormente se elabora un modelo de exposición, para luego evaluar la vulnerabilidad física estructural en viviendas y las pérdidas económicas directas. Finalmente, se hace un análisis del impacto socioeconómico, la identificación de estructuras críticas y el análisis de prioridades para la gestión de riesgo. Este proceso metodológico se representa en la Figura 1. La metodología que se presenta también involucra conceptos de las ciencias físicas y sociales.

Figura 1. Diagrama general de la metodología propuesta para la evaluación integral del riesgo



Fuente: elaboración propia.

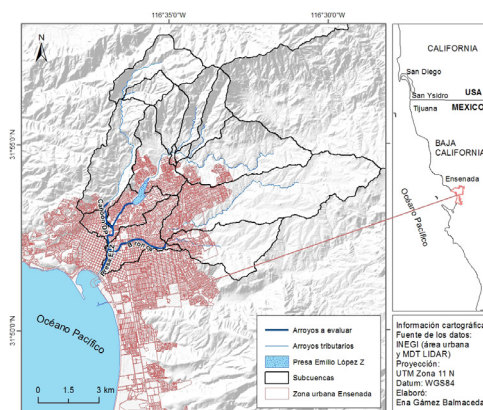
Amenaza

La amenaza por inundación, que es sinónimo de peligro, estará representada por mapas que contienen las áreas de inundación para los periodos de retorno de 25, 50 y 100 años. Se escogieron estos periodos de retorno, de acuerdo a un estudio de alerta temprana, en donde se concluye que a partir del periodo de retorno de 25 años se presentan inundaciones significativas en la ciudad de Ensenada (Gómez-Balmaceda, López-Lambrano, Seingier, & López-Ramos, 2019).

La ciudad de Ensenada está situada en el noroeste de México, en el estado de Baja California, se caracteriza por ser una zona semiárida, donde las precipitaciones máximas se presentan entre los meses de noviembre a marzo, con un promedio anual de 208.07 mm, siendo febrero el mes más lluvioso con 56.14 mm y julio el de menor pluviosidad con 8.72 mm y una temperatura promedio anual de 16 °C (López-Lambrano *et al.*, 2020). Pertenecen a la subcuenca B. Ensenada de la cuenca Río Tijuana – Arroyo de Maneadero (INEGI, 1995). Esta subcuenca desemboca en el Puerto de Ensenada, donde arriban barcos comerciales y turísticos.

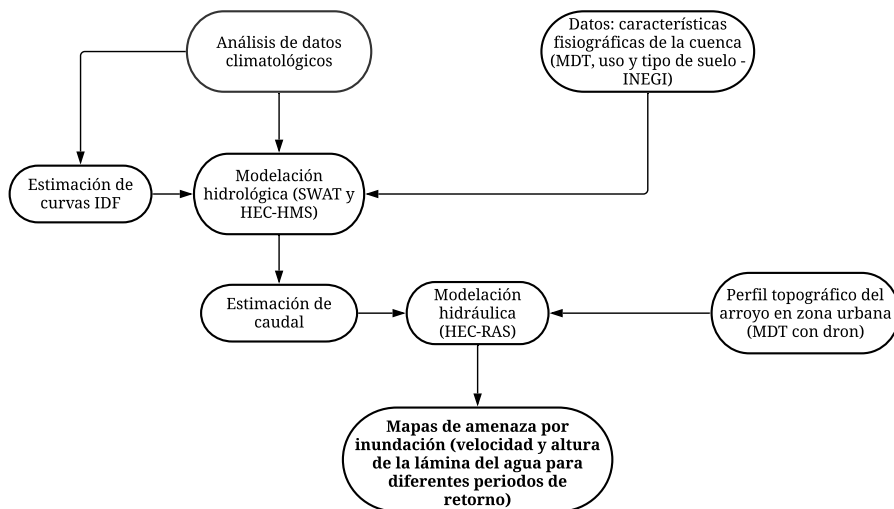
La ubicación geográfica, importancia comercial, industrial y económica de la ciudad ha ocasionado que tenga un crecimiento poblacional rápido en los últimos años (COPLADE, 2017). Dentro de este crecimiento, se encuentran viviendas en áreas aledañas a los arroyos, las cuales se considera que tienen la mayor exposición al riesgo de inundación en este estudio. La Figura 2 muestra el área de estudio, donde se observan los arroyos a evaluar: a la derecha el arroyo Bronce, a la izquierda el arroyo Cañón Doña Petra (DP) y al centro el arroyo Presa Emilio López Zamora (ELZ).

Figura 2. Área de estudio



Fuente: elaboración propia con base en datos de INEGI. A partir de las características del área de estudio, de los datos y métodos disponibles para la zona, se propone el proceso mostrado en la Figura 3, el cual contiene una serie de pasos para realizar la evaluación de la amenaza.

Figura 3. Proceso para la evaluación de la amenaza por inundación



Fuente: elaboración propia.

El primer paso para la evaluación de la amenaza, y dato principal, es el análisis de los datos de precipitación. En el caso de la ciudad de Ensenada se revisaron las curvas IDF con que cuenta la ciudad, y se encontró que fueron hechas hace más de veinte años y sin la descripción de cómo se elaboraron. Por lo tanto, se hizo una nueva estimación de estas curvas, con el análisis de las características de la lluvia de la zona y su variabilidad espacio temporal, con datos pluviográficos y pluviométricos para un periodo de 1940 a 2019. Esta información se obtuvo de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y de estaciones meteorológicas automáticas particulares, las cuales se detallan en Gámez-Balmaceda y colaboradores (2020).

De igual manera, se revisaron las herramientas necesarias para la realización de modelaciones hidrológicas y para poder estimar el caudal máximo; mientras que los datos de tipo de suelos y los límites de las cuencas se obtuvieron de Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Las herramientas hidrológicas revisadas fueron el *Soil Water Assessment Tool* (SWAT) y el *Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS), las cuales contemplan el método del número curva del (SCS) para la estimación de los escurrimientos superficiales (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, 2011; U.S. Army Corps of Engineers, 2017).

El SWAT proporcionó el parámetro asociado a los números de curva que posteriormente se utilizaron en el modelo HEC-HMS para el análisis de las sub-

cuencas de la Figura 2; del análisis se encontró que los mayores escurrimientos superficiales se generan cuando ocurren lluvias en las subcuencas de la zona urbana. Los caudales obtenidos con la modelación hidrológica para los tres arroyos en consideración, se muestran en el Cuadro 1. Posteriormente, basándose en las guías del CENAPRED, se realiza una modelación hidráulica, en este caso, empleando el modelo HEC-RAS. Adicional a la información referente al caudal máximo y el coeficiente de rugosidad de las paredes del canal, también se requiere la información topográfica de cada una de las secciones transversales del arroyo.

La topografía para el área de estudio se obtuvo a partir de un modelo digital del terreno (MDT) con una alta resolución correspondiente a un área de 5 por 5 metros, en este caso conocida como LIDAR por sus siglas en inglés *Light Detection and Ranging*, misma que se obtuvo del INEGI para la zona urbana de Ensenada.

La modelación hidráulica empleando la topografía, obtenida a partir del modelo digital LIDAR, mostró que el área evaluada no se inundaba con la intensidad de precipitación considerada, sin embargo, del conocimiento que se tiene registrado de las inundaciones ocurridas en la zona, se procedió a realizar otro análisis a partir de un MDT con mayor resolución (0.1 m x 0.1 m). Dicho modelo, fue elaborado por medio de fotogrametría digital, mediante el uso de drones y el empleo del *software* Agisoft en su versión del año 2018.

Como resultado, se representó de manera comparativa la modelación de las áreas de inundación obtenidas de los dos modelos de terreno (figura 4). De la comparación, se seleccionó el modelo de terreno construido empleando drones para la generación de los mapas con las áreas de inundación para periodos de retorno de 25, 50 y 100 años.

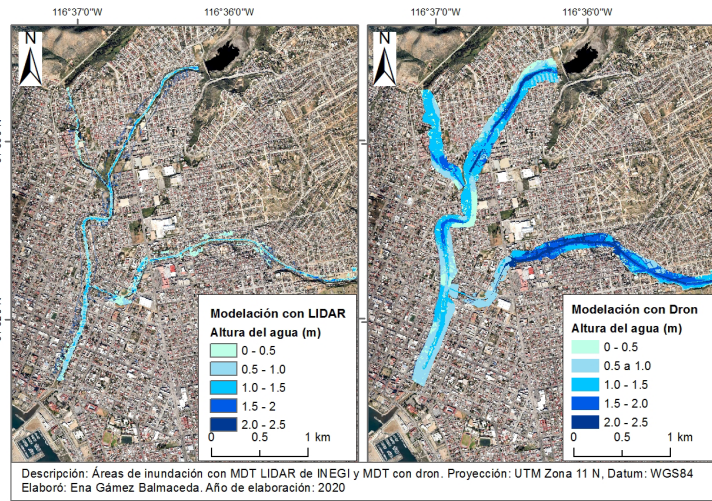
Como información adicional a las guías del CENAPRED, en la modelación hidráulica se incluyó el resultado de la velocidad del agua, el cual constituye un parámetro importante para la evaluación de la vulnerabilidad física en las viviendas. Un ejemplo de ello se presenta en la Figura 5, con los mapas de amenaza por inundación para un periodo de 100 años con el MDT seleccionado.

Cuadro 1. Caudales máximos para distintos periodos de retorno (Tr) en las subcuencas de los arroyos de estudio

Subcuenca de arroyos evaluados	Área (km ²)	Lluvia (mm) Tr = 25 años	Lluvia (mm) Tr = 25 años	Lluvia (mm) Tr = 25 años	Caudal (m ³ /s) Tr = 25 años	Caudal (m ³ /s) Tr = 50 años	Caudal (m ³ /s) Tr = 100 años
Bronce	5.98	29.06	32.43	35.79	15.2	18.1	21.0
Presa ELZ	6.81	29.79	33.24	36.69	20.8	24.2	27.7
Cañón DP	10.14	27.43	30.60	33.78	3.7	5.7	8.1

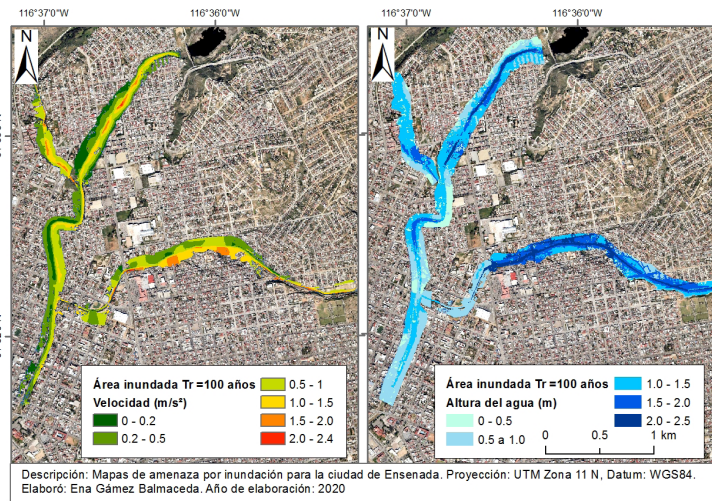
Fuente: elaboración propia con base en los resultados de la modelación hidrológica.

Figura 4. Comparación de áreas inundadas, obtenidas con el uso de dos modelos digitales del terreno para un periodo de 100 años



Fuente: elaboración propia.

Figura 5. Mapas de amenaza por inundación para un periodo de retorno de 100 años, generado con un modelo de terreno construido empleando drones



Fuente: elaboración propia.

Exposición

A partir de los mapas de amenaza se determinan los elementos expuestos en las áreas inundadas, que corresponden a la población y sus bienes (figura 6.a). La información de partida para esta evaluación está integrada por la información cartográfica tomada de las bases de datos del INEGI para los censos de 2010 y 2015.

Se observó que algunas manzanas y viviendas del censo del 2015 no aparecían en el censo del 2010, además, con ayuda de las imágenes satelitales de Google Earth, se observó que algunas manzanas y viviendas no aparecían en ninguno de los dos censos, por lo tanto, la información faltante se completó con imágenes de Google Earth del año 2020 y datos de campo (figura 6.b), esta misma plataforma se aprovechó para hacer un levantamiento de información acerca del material de techos, paredes y pisos de las viviendas respectivamente, tal como se indica en las guías de CENAPRED. El total de viviendas encontradas en el área de inundación de los tres arroyos estudiados fue de 1,609.

Figura 6. Viviendas en áreas de inundación. Figura 6.a) Ortofoto obtenida de Google Earth 2020. Figura 6.b) Fotografía levantada en campo



Fuente: elaboración propia.

Una vez que se ha completado el inventario de viviendas expuestas, se determina la severidad de la amenaza o nivel de peligro que experimentan, tomando en cuenta el dato de altura y velocidad del agua en el canal (Alcocer-Yamanaka, Rodríguez-Varela, Bourguett-Ortiz, Llaguno-Guilberto, & Albornoz-Góngora, 2016; FEMA, 2018). La clasificación de la severidad de la amenaza se muestra en el Cuadro 2, el cual se utiliza para asignar a cada vivienda el nivel de amenaza, desde baja hasta extrema, cuando se combinan estos datos en un sistema de información geográfica; donde las viviendas se representan por una capa vectorial de puntos que se traslapan sobre las capas ráster de altura y velocidad del agua, obtenidas de los mapas de amenaza para cada periodo de retorno. El Cuadro 3 muestra el resultado de las viviendas expuestas a diferentes niveles de amenaza clasificadas por colores, mismos que se asignaron a las viviendas para represen-

tarlas gráficamente, como se muestra en el ejemplo de la Figura 7. De acuerdo a FEMA (2018), los daños estructurales se esperan a partir de una severidad muy alta, dependiendo del tipo de estructura.

Cuadro 2. Criterios de severidad de la amenaza por inundación (FEMA, 2018)

Clasificación de severidad de la amenaza	Rango de altura x velocidad del agua (m²/s)
Baja	< 0.2
Media	0.2 – 0.5
Alta	0.5 – 1.5
Muy alta	1.5 – 2.5
Extrema	> 2.5

Cuadro 3. Total de viviendas expuestas a diferentes niveles de amenaza para cada periodo de retorno (Tr)

Severidad de la amenaza		Viviendas expuestas en los tres arroyos	
	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
Nula	628	464	0
Baja	671	730	957
Media	170	180	250
Alta	99	186	274
Muy alta	40	35	94
Extrema	1	14	34
Total de viviendas	1,609	1,609	1,609

Fuente: elaboración propia con base en los mapas de amenaza.

Figura 7. Ejemplo de viviendas expuestas en al arroyo Bronce para un periodo de retorno de 100 años, con base en el Cuadro 3. Los polígonos representan las manzanas y los puntos de colores representan las viviendas en cada nivel de amenaza, desde media en color verde hasta extrema en color rojo



Fuente: elaboración propia.

Esta parte del proceso constituye el modelo de exposición. Sin embargo, la severidad de la amenaza no es suficiente para asegurar si una vivienda es vulnerable, ya que su vulnerabilidad dependerá del tipo de construcción; por ejemplo, una vivienda de mampostería o concreto no responde igual a una vivienda de madera ante una misma velocidad y altura del agua, ya que no tienen la misma cimentación. La estructura de cualquier vivienda experimentará fuerzas hidrostáticas ante la altura del agua y fuerzas hidrodinámicas con la velocidad, si no tiene una cimentación rígida, esta se moverá considerablemente hasta un posible colapso (John P. Fisher, Antonios G. Mikos, 2012).

Por consiguiente, se procede a hacer una clasificación de las 1609 viviendas, con los datos levantados en campo, de acuerdo a las guías de CENAPRED, tanto para su estructura construida como nivel socioeconómico. Se encontraron cuatro tipos constructivos que representan las viviendas en las áreas de amenaza por inundación. Un ejemplo de cada tipo de vivienda se muestra en la Figura 8. De esta manera el modelo de exposición cuenta con los datos suficientes para evaluar la vulnerabilidad. El resultado fue:

- 168 viviendas de material ligero
- 302 viviendas de madera
- 847 viviendas de mampostería de un piso y
- 292 viviendas de mampostería de dos pisos

Figura 8. Tipo de construcción en viviendas aledañas a los arroyos del estudio

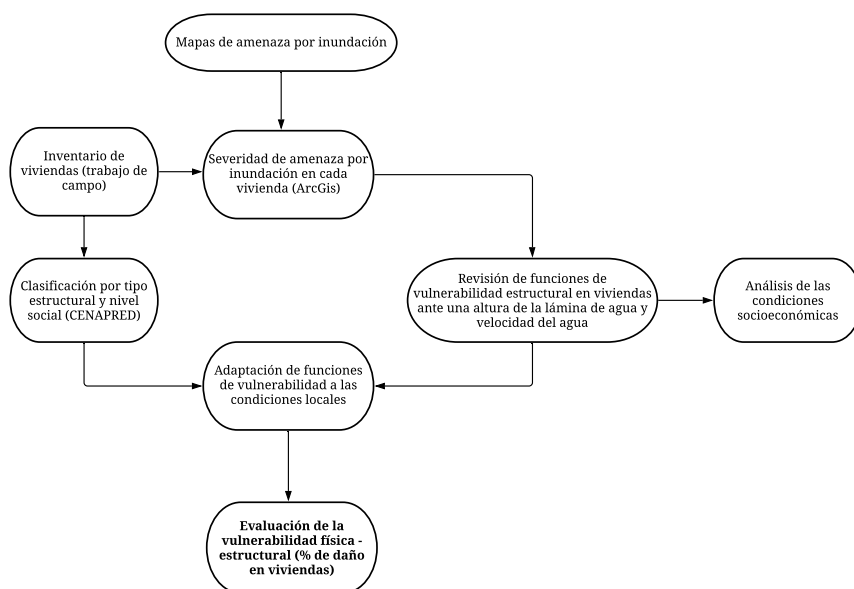
	
Vivienda de material ligero	Vivienda de madera
	
Vivienda de mampostería de un piso	Vivienda de mampostería dos pisos

Fuente: las fotos se tomaron en campo y la clasificación fue con base en las guías de CENAPRED.

Vulnerabilidad

Una vez que se tiene el modelo de exposición, el siguiente paso es la evaluación de la vulnerabilidad física de las viviendas, que incluye a la estructura y su contenido. El proceso para la evaluación de la vulnerabilidad con los datos de exposición se resume en la Figura 8.

Figura 9. Proceso para la evaluación de la vulnerabilidad física-estructural en viviendas



Fuente: elaboración propia.

La vulnerabilidad se evalúa para determinar el nivel de daño latente que experimentarán las viviendas. Uno de los métodos más confiables para la evaluación de la vulnerabilidad a nivel global son las funciones de vulnerabilidad, que son elaboradas por un grupo de expertos en evaluación de daños, mediante el análisis del parámetro físico de la amenaza y el daño producido en todos los eventos históricos (FEMA, 2017).

Las guías de CENAPRED proporcionan las funciones de vulnerabilidad para el menaje o contenido de la vivienda clasificada por su tipo de construcción y altura de agua, las cuales serán usadas para determinar el porcentaje de daño al menaje de las viviendas. En esas guías aún no se encuentran funciones de vulnerabilidad para evaluar el daño estructural de la vivienda; sin embargo, presentan un índice

de vulnerabilidad asociado a la tipificación de la vivienda. Por esa razón, se decidió investigar sobre las funciones de vulnerabilidad estructural.

Existen publicaciones de carácter internacional que han evaluado la vulnerabilidad de las estructuras civiles por medio de modelos matemáticos, se basan en las especificaciones de diseño, material de construcción y los parámetros de la amenaza (Escuder-Bueno *et al.*, 2012; FEMA, 2016; Marvi, 2020; Scawthorn *et al.*, 2006; United States Army Corps of Engineers, 2006). Las funciones de vulnerabilidad de la literatura se tomaron como referencia para seleccionar y adaptar las curvas de vulnerabilidad que fueran aplicables a la zona de estudio.

Para seleccionar las funciones de vulnerabilidad para la ciudad de Ensenada se hizo un análisis de las características socioeconómicas y culturales, con el fin de conocer el diseño y construcción que elige la población de acuerdo con sus necesidades, usos y costumbres. En este contexto, se encontró que por ser una zona fronteriza y su estrecha relación con Estados Unidos, desde hace un siglo ha sido el foco de atención para la migración hacia esta zona (González Gómez, 2008).

Sin embargo, hay mitos y realidades sobre la situación de la ciudad. A pesar de que existe un ingreso per cápita mayor al de algunas ciudades del resto del país, también existe situación de pobreza. Muchas familias han migrado a esta zona en busca de un mejor desarrollo, y han construido sus viviendas de diferentes maneras, o compran casas móviles procedentes de Estados Unidos, que son hechas de madera y de muy baja calidad (Jardón Hernández & Ordóñez Barba, 2009; Ortega Villa, 2000; Peña Muñoz, 2020).

Por otro lado, las personas que empezaron a poblar la ciudad, al igual que sus descendientes, procuran conservar el patrimonio histórico y el tipo de construcción en las viviendas, con un parecido californiano del país vecino tanto en edificios importantes y viviendas, las cuales corresponden a construcciones de madera y mampostería principalmente (Calderón, Robles, & Aguilar, 2015).

Con base en el análisis anterior se decidió usar las funciones de vulnerabilidad, que evalúan el colapso de la estructura ante una altura y velocidad del agua desarrolladas por el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos, mostradas en la Figura 10 (FEMA, 2001).

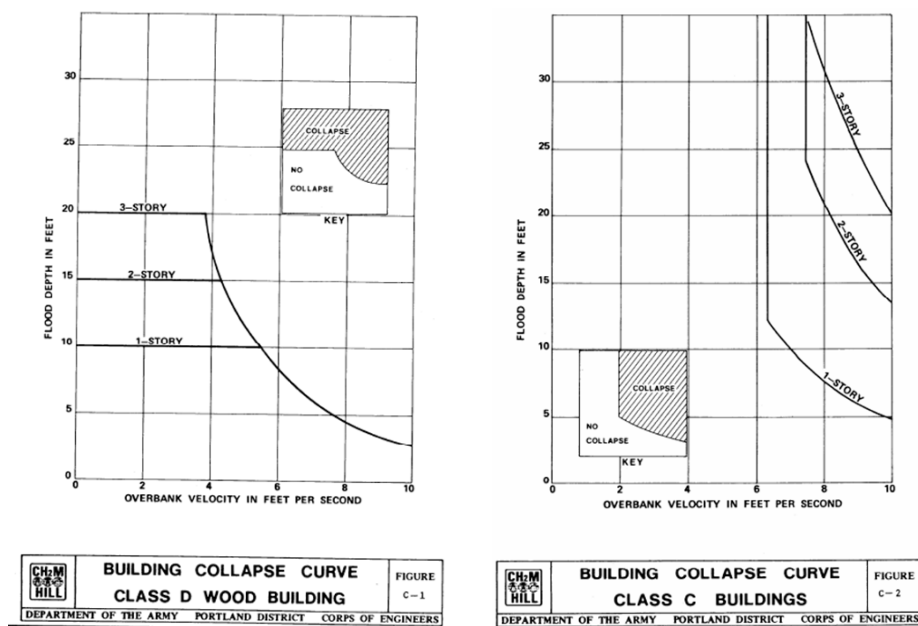
Para evaluar el daño en el exterior de las viviendas, se tomó en cuenta solo la altura del agua, se hizo una comparación de las funciones de vulnerabilidad desarrolladas en algunos países y condados de Estados Unidos (Balasbaneh, Abidin, Ramli, Khaleghi, & Marsono, 2020; De Risi *et al.*, 2020; Hasanzadeh Nafari, Ngo, & Lehman, 2016; Huizinga, de Moel, & Szewczyk, 2017; United States Army Corps of Engineers, 2006).

De la comparación se hizo un promedio de las funciones para viviendas similares con las construcciones de la ciudad de Ensenada (figura 11). Estas funciones

se aplicaron a las 1,609 viviendas que se encuentran en el área de inundación de los tres arroyos. Como resultado se encontró el porcentaje de daño que experimenta la estructura de la vivienda ante la severidad de la amenaza, al aplicar las funciones de la Figura 10, y el daño exterior de la vivienda ante una altura de la lámina del agua cuando se aplican las curvas de vulnerabilidad de la Figura 11. El porcentaje de daño está relacionado con el nivel de vulnerabilidad, que va desde baja si presenta daños de 0 a 25%, hasta muy alta o colapso si presenta el 100% de daños. Este criterio se tomó de USACE (2006), y se presenta como la relación de la vulnerabilidad y porcentaje de daño de las viviendas estudiadas en el Cuadro 4.

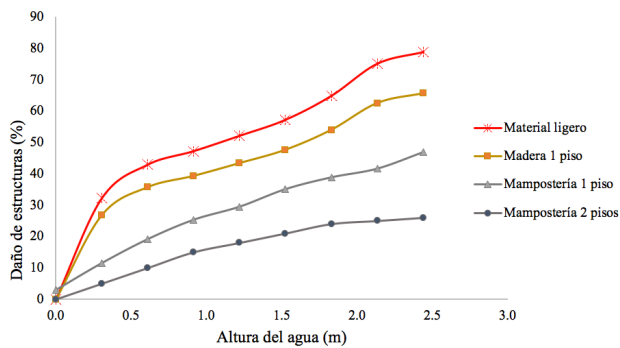
Los cuadros del 5 a 7 muestran el resultado de la cantidad de viviendas que resultan vulnerables ante la amenaza por inundación para cada periodo de retorno, cuando se aplican las funciones de vulnerabilidad de las figuras 10 y 11. Algunas estructuras de madera y de material ligero resultaron con vulnerabilidad alta y colapsos ante la amenaza de los periodos de retorno de 50 y 100 años, esto también indica pérdidas materiales al interior de la vivienda. Los resultados de los daños y los costos de la vulnerabilidad estructural, así como del menaje, se presentan en la evaluación del riesgo.

Figura 10. Funciones de colapso para estructuras de madera y mampostería



Fuente: FEMA (2001).

Figura 11. Funciones de vulnerabilidad propuesta para las viviendas de la ciudad de Ensenada, B. C.



Fuente: elaboración propia con base en el análisis de las funciones de USACE (2006).

Cuadro 4. Vulnerabilidad y porcentaje de daño estimado para cada tipo de estructura

Vulnerabilidad	Material ligero	Madera	Mampostería	Mampostería dos pisos
Baja	0 – 25 %	0 – 25 %	0 – 25 %	0 – 25 %
Media	25 – 50%	25 – 50%	25 – 41%	-
Alta	50 – 70%	50 – 59%	-	-
Muy alta (colapso)	100%	100%	-	-

Fuente: elaboración propia con base en las figuras 10 y 11, datos de amenaza y datos de exposición.

Cuadro 5. Resultado de viviendas vulnerables ante la amenaza por inundación para un periodo de retorno de 25 años

Vulnerabilidad	Material ligero	Madera	Mampostería	Mampostería dos pisos
Nula	53	120	334	121
Baja	58	99	367	171
Media	22	39	146	0
Alta	35	44	0	0
Colapso	0	0	0	0
Total	168	302	847	292

Fuente: elaboración propia.

**Cuadro 6. Resultado de viviendas vulnerables ante la amenaza por inundación
para un periodo de retorno de 50 años**

Vulnerabilidad	Material ligero	Madera	Mampostería	Mampostería dos pisos
Nula	54	113	305	100
Baja	27	33	373	192
Media	42	132	169	0
Alta	41	24	0	0
Colapso	4	0	0	0
Total	168	302	847	292

Fuente: elaboración propia.

**Cuadro 7. Resultado de viviendas vulnerables ante la amenaza por inundación
para un periodo de retorno de 100 años**

Vulnerabilidad	Material ligero	Madera	Mampostería	Mampostería dos pisos
Baja	22	65	433	292
Media	56	190	414	0
Alta	81	46	0	0
Colapso	9	1	0	0
Total	168	302	847	292

Fuente: elaboración propia.

Evaluación Integral del Riesgo

El riesgo se evalúa con la cuantificación de las pérdidas que resultan por los daños ocasionados por la amenaza. Para esta evaluación se tomaron como ejemplo los métodos que evalúan pérdidas en México, relacionados con la vulnerabilidad física de las viviendas, en términos ingenieriles y con base a las guías de CENAPRED (Alcocer-Yamanaka *et al.*, 2016; Fuentes Mariles, Franco, Luna Cruz, & Moralez Rodríguez, 2014).

Estos métodos se resumen en el cálculo del valor material de la estructura y su contenido por el porcentaje de daño obtenido a partir de las funciones de vulnerabilidad. Para el cálculo de los daños en el menaje de las viviendas (según la tipificación de las guías del CENAPRED), se hizo un ajuste en la cantidad de enseres que acostumbra la población.

Dentro de las características socioeconómicas y culturales en esta zona fronteriza, y de los datos levantados en campo, las viviendas de materiales ligeros y de madera se clasificaron como tipo II y III, que corresponden a las viviendas autoconstruidas con materiales de baja calidad. Adicionalmente, se encontró que la mayoría de estas viviendas poseen automóvil y un poco más de enseres de lo que se reporta para las viviendas de esta clasificación en las guías del CENAPRED.

Sin embargo, el costo de adquisición es mucho menor que en el resto del país, ya que existe la cultura de compras de todo tipo de objetos de segunda mano y bajo costo, provenientes de Estados Unidos, entre los que se incluye ropa, juguetes, electrodomésticos, muebles, automóviles, casas móviles, entre otros.

El 90% de la población del estado de Baja California compra bienes usados o nuevos de Estados Unidos (Ortega, 2000). Esta situación contribuye al aumento del riesgo respecto a las casas móviles traídas de allá, ya que corresponden a diseños antiguos e inseguros, que ya no se fabrican porque representan un riesgo ante terremotos (FEMA - ATC, 2019).

Las viviendas de mampostería se clasificaron como:

- Tipo III: corresponden a las de un piso, se observó que fueron autoconstruidas.
- Tipo IV: son viviendas de un piso bien construidas.
- Tipo V: corresponden a viviendas de dos o más pisos con cimentación rígida.

Los costos del menaje fueron consultados directamente por las tiendas físicas y virtuales de la ciudad de Ensenada, mientras que el estimado del menaje para cada tipo de vivienda se muestra en el Cuadro 8. Para el cálculo de los daños estructurales de la vivienda, se consultó el valor de la construcción aplicable en la ciudad, en fuentes diversas: inmobiliarias de Ensenada, aseguradoras del Ayuntamiento de Tijuana y Ensenada, departamento de Obras Públicas de Ensenada, Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores (INFONAVIT), Instituto para el Desarrollo Inmobiliario y de la Vivienda en Ensenada (INDIVI), Programa Sectorial de vivienda de Baja California y el reglamento de la ley de edificaciones para el municipio de Ensenada. De las fuentes consultadas se estimó un valor promedio para cada tipo de construcción, el cual se muestra en el Cuadro 9.

Una vez que se tiene el valor estimado del menaje de la vivienda se aplican las funciones de vulnerabilidad de las guías del CENAPRED, las cuales relacionan el porcentaje de pérdida de enseres para cada tipo de vivienda ante una altura del agua. Este porcentaje se multiplica por el valor estimado del menaje de la vivienda para obtener las pérdidas monetarias. De igual manera, se multiplica el valor estimado del costo estructural de la vivienda por el porcentaje de daño obtenido con

las funciones de las figuras 10 y 11 para obtener las pérdidas monetarias por daños estructurales, que equivale a decir el costo de reconstrucción. La suma de las pérdidas por daños estructurales y los daños en el menaje de la vivienda constituyen las pérdidas económicas directas de la vivienda ante la amenaza por inundación. A estas pérdidas se les considera el riesgo por inundación en las viviendas. El resultado de las pérdidas estimadas en las viviendas para cada periodo de retorno se muestra en el Cuadro 10.

Cuadro 8. Valor estimado del costo del menaje en viviendas de Ensenada

Vivienda	Costo del menaje
Tipo II	\$62,200.00
Tipo III	\$187,222.00
Tipo IV	\$373,200.00
Tipo V	\$559,800.00

Fuente: elaboración propia con base en la consulta de precios locales.

Cuadro 9. Valor estimado del costo de construcción en viviendas de Ensenada

Tipificación de vivienda	Costo de construcción
Material ligero (Tipo II)	\$100,000.00
Madera (Tipo III)	\$185,000.00
Mampostería (Tipo III)	\$208,512.00
Mampostería (Tipo IV)	\$328,774.40
Mampostería (Tipo V)	\$707,760.00

Fuente: elaboración propia con base al valor promedio del costo de construcción local.

Cuadro 10. Pérdidas económicas por daños esperados en viviendas para diferentes periodos de retorno

Daños en viviendas	Costo M.N (Tr = 25 años)	Costo M.N (Tr = 50 años)	Costo M.N (Tr = 100 años)
Daño estructural	\$16,561,532	\$48,807,549	\$98,735,633
Daño menaje	\$16,531,174	\$59,413,637	\$125,582,560
Daño total	\$33,092,706	\$108,221,185	\$224,318,192

Fuente: elaboración propia con base en las funciones de vulnerabilidad y los cuadros 8 y 9.

El cálculo de las pérdidas materiales es un dato importante para la toma de decisiones y la gestión de riesgo. Las autoridades municipales deben conocer esta información para analizar si se enfrentan a un desastre, y si tienen la capacidad para enfrentar el riesgo o necesitarán solicitar ayuda externa.

Adicionalmente, para la gestión de riesgo, además de la evaluación de las pérdidas materiales, es necesaria una evaluación integral del riesgo, que incluye la identificación de estructuras críticas o de servicios en las zonas inundables, el impacto humano, personas heridas o que necesiten refugio temporal, así como el impacto físico en la infraestructura, el impacto económico y la determinación de prioridades, donde se identifican las zonas que requieren mayor atención a la emergencia. Esta información es de suma importancia para el sector operativo (protección civil, bomberos, seguridad pública).

La identificación de las estructuras críticas y las calles inundadas se logró con ayuda de imágenes de Google Earth de 2020 y datos de INEGI. En el Cuadro 11 se muestra el ejemplo de las estructuras identificadas, las calles inundadas representan la severidad de arrastre vehicular por la velocidad del agua mostrada en los mapas de amenaza; este es un problema recurrente que atienden autoridades de Protección Civil municipal. El impacto económico se determinó con la información del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) de INEGI, en el cual se encontraron 249 viviendas con actividad económica y 7 predios de servicios en las áreas de inundación, con un total de 1,700 trabajadores. Por lo tanto, se estima la interrupción del ingreso diario de estos trabajadores.

La determinación de prioridades se analiza con la información de la vulnerabilidad social. Por ejemplo, en el caso hipotético de que se presentaran los daños esperados para un periodo de 25 años, donde el municipio no tuviera los 33 millones de pesos que se necesitan, y solo contara con 10 millones de pesos para ayudar a la población afectada, tendría que decidir a quienes priorizar. En ese caso, el mapa de vulnerabilidad social, que se está relacionado con los indicadores de pobreza y de desarrollo, puede indicar donde se encuentra la población más vulnerable socialmente hablando.

El mapa de vulnerabilidad social se elaboró con el método del Sistema Nacional para el Desarrollo Integral de la Familia (DIF, 2017) y con datos del censo de población y vivienda de INEGI, de 2010 y 2015. Las manzanas con viviendas que tienen todos los indicadores de rezago social se clasifican con vulnerabilidad alta, las que tienen 60% de los indicadores vulnerabilidad media y el 30% de los indicadores vulnerabilidad baja.

El mapa de la Figura 12 indica que en cada manzana hay viviendas vulnerables, pero no todas las viviendas de la manzana tienen el mismo grado de vulnerabilidad. Ahí mismo se muestra el ejemplo para la determinación de prioridades

con los resultados del impacto social, obtenido de las viviendas con vulnerabilidad estructural alta y extrema para el periodo de retorno de 100 años. A partir del mapa de la Figura 12, con la combinación de los datos de viviendas con los datos del censo de INEGI, por medio de un sistema de información geográfica, se obtienen los resultados del impacto social para la determinación de prioridades. El Cuadro 12 muestra el ejemplo del impacto social, obtenido de las viviendas con vulnerabilidad estructural alta y extrema para el periodo de retorno de 100 años.

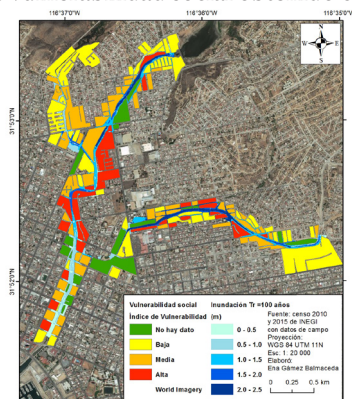
Cuadro 11. Identificación de estructuras críticas en zonas propensas a inundarse

	Estructuras críticas 1 Edificio de bomberos 2 Edificios de Seguridad pública 3 Escuelas 1 Edificio de la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada 7 Calles inundadas: a. Arroyo Bronce (11, Tamaulipas y Luis Calzada Ocampo) b. Arroyo Presa (7ma, 8va, y 12) c. Arroyo Cañón DP (12 y Ámbar
---	---

Fuente: foto obtenida de Google Earth.

En la foto se observa una estación de bomberos y una estación de policía junto al arroyo.

Figura 12. Mapa de vulnerabilidad social obtenido con datos de INEGI



Fuente: elaboración propia con base en la metodología del DIF.

Cuadro 12. Vulnerabilidad social e impacto humano para un periodo de retorno de 100 años

Grado de vulnerabilidad social por manzana	Total de viviendas inundadas	Personas en zonas de peligro	Personas socialmente vulnerables	Heridos en viviendas con daños mayores	Damnificados que necesitarán albergue
Alta	511	2 801	385	28	82
Media	619	3 550	394	0	34
Baja	381	4 129	262	8	21
No hay dato	98			0	15
Total	1 609	10 480	1 041	36	152

Fuente: elaboración propia con base en los resultados de daños y el censo de INEGI 2010 y 2015.

Los resultados de este trabajo son un ejemplo representativo de la evaluación integral del riesgo por el impacto de inundaciones, el escenario de lo que pasaría con la población vecina a dichos cauces temporales de la ciudad de Ensenada y sus bienes, si las condiciones del sistema no cambian.

Cabe mencionar que en esta evaluación solo se consideró el impacto directo, no se han considerado los daños indirectos. Sin embargo, se proporciona información útil para los actores que participan en la gestión de riesgo.

La gestión de riesgo requiere de la coordinación entre sector público, académico y de la comunidad. Es importante que se tome conciencia de lo que ocurriría si se presentan estas precipitaciones, si no se informa sobre la importancia de los requerimientos mínimos de construcción, o la seguridad estructural de las viviendas.

De igual manera, se debe contar con un sistema de alerta temprana, para que las autoridades puedan alertar con tiempo a la población de lo que sucedería cuando ocurran las lluvias consideradas en las modelaciones hidrológicas. Por otro lado, en el contexto de la Ley de Protección Civil de Baja California, el reglamento de edificaciones de Ensenada y el Plan de Desarrollo Urbano del municipio, se establece que no está permitido construir en zonas de riesgos, por lo tanto, se debe buscar que se ejecuten medidas óptimas de planeación de ordenamiento territorial para evitar que se construya en zonas de riesgo.

Conclusiones

La evaluación del riesgo es un proceso complejo, que requiere una evaluación detallada de cada uno de sus elementos y su integración con un análisis conjunto

para un mejor entendimiento y buena gestión. En esta evaluación se abordó la integración de la amenaza, la vulnerabilidad relacionada a posibles escenarios de daño para cada vivienda, el impacto humano, pérdidas materiales, impacto socio-económico y la determinación de prioridades.

La calidad de los datos proporciona una apropiada evaluación del riesgo, aunque se disponga de datos oficiales, se recomienda su revisión y actualización. Como ejemplo, para la zona de estudio se actualizaron los datos de precipitación y modelo de terreno en el arroyo, para la evaluación de la amenaza. Otro ejemplo son las bases de datos del INEGI, tienen gran cobertura y calidad, sus datos son muy útiles para hacer una estimación del riesgo; sin embargo, se encontró que algunas áreas no están cubiertas en su totalidad. Por lo tanto, se complementaron con datos de campo.

La evaluación de la vulnerabilidad proporciona el daño estimado para los distintos tipos de construcción, de tal manera que se espera concientizar a la población antes de decidir construir en zonas propensas a inundarse. Las viviendas de materiales ligeros y de madera son las más vulnerables, corresponden a las viviendas autoconstruidas en asentamientos informales y casas móviles; la compra de estas casas móviles resultó ser la compra de un riesgo latente. Las viviendas con mayor vulnerabilidad estructural se catalogan con vulnerabilidad social alta, por lo tanto, se encuentran en mayor desventaja al sufrir los daños por inundación. En contraste, las viviendas de mampostería con cimentación rígida son resistentes a la amenaza.

Las guías del CENAPRED son muy importantes para la elaboración de los atlas de riesgos, y fueron usadas para el desarrollo de este estudio con la actualización de los métodos y datos mencionados. Por lo tanto, se promueve su uso, con el complemento del aporte científico de los aspectos físicos, geográficos sociales y culturales que caracterizan a cada ciudad. Asimismo, se recomienda que se incorporen funciones de vulnerabilidad estructural en sus guías para cada tipificación de viviendas de México.

Referencias bibliográficas

- Alcocer-Yamanaka, V. H., Rodríguez-Varela, J. M., Bourguett-Ortiz, V. J., Llaguno-Guilberto, O. J., & Albornoz-Góngora, P. M. (2016). Metodología para la generación de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, VII(5), 33–55.
- Balasbaneh, A. T., Abidin, A. R. Z., Ramli, M. Z., Khaleghi, S. J., & Marsono, A. K. (2020). Vulnerability assessment of building material against river flood water: Case study in Malaysia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 476(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/476/1/012004>
- Calderon, C., Robles, C., & Aguilar, C. (2015). Patrimonio cultural en Ensenada, México. Itinerario y preservación. *Revista de Arquitectura, Urbanismo y Territorios*, V(I), 1–27.
- CENAPRED. (2006). *Guía Básica para la Elaboración de Atlas Municipales y Estatales de Peligros y Riesgos*.
- CENAPRED. (2014). *Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México. Atlas Nacional de Riesgos de la República Mexicana* (Vol. 1).
- COPLADE, (Comité de Planeación para el Desarrollo del Estado). (2017). Enero 2017. *Publicaciones Sociodemográficas/Baja California*, (55), 1–8. Recuperado de: <http://www.copladebc.gob.mx/publicaciones/2017/Mensual/Ensenada2017.pdf>
- CRED, C. para el R. en el E. de D. (2020). Disaster* Year in Review 2019. *Cred*, (58), 1–2. Retrieved from https://www.emdat.be/publications?field_publication_type_tid=All
- De Risi, R., Jalayer, F., De Paola, F., Carozza, S., Yonas, N., Giugni, M., & Gasparini, P. (2020). From flood risk mapping toward reducing vulnerability: the case of Addis Ababa. *Natural Hazards*, 100(1), 387–415. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03817-8>
- DIF, S. N. para el D. I. de la F. (2017). *Índice de Vulnerabilidad Social. Dirección General de Alimentación y Desarrollo Comunitario*.
- Escuder-Bueno, I., Castillo-Rodríguez, J. T., Zechner, S., Jöbstl, C., Perales-Momparler, S., & Petaccia, G. (2012). A quantitative flood risk analysis methodology for urban areas with integration of social research data. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12(9), 2843–2863. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-2843-2012>
- FEMA. (2001). *Multi-hazard Loss Estimation Methodology Flood Model – Hazus-MH*. Recuperado de: https://www.fema.gov/media-library-data/20130726-1820-25045-8292/hzmmh2_1_fl_tm.pdf
- FEMA. (2016). *Guidance for Flood Risk Analysis and Mapping*, 1 (Mayo) 1–29.

- FEMA. (2017). Substantial Damage Estimator (SDE) Manual del usuario.
- FEMA. (2018). Guidance for Flood Risk Analysis and Mapping Flood Risk Map, (February). Retrieved from https://www.fema.gov/media-library-data/1520966727438-8c05ecc18e141449aa79665641bd9fe3/Flood_Risk_Map_Guidance_Feb_2018.pdf
- FEMA - ATC, N. (2019). *Improving Earthquake Performance of Manufactured Homes*. (A. T. Council, Ed.) (Applied Te). California. Recuperado de: <https://cloud.atcouncil.org/s/6KNtXC3H8xz3yg6#pdfviewer>
- Fuentes Mariles, O., Franco, V., Luna Cruz, L., & Moralez Rodríguez, H. (2014). *CARACTERIZACIÓN FLUVIAL E HIDRÁULICA DE LAS INUNDACIONES EN MÉXICO*. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/153086/CARACTERIZACION_FLUVIAL_E_HIDRULICA_DE_LAS_INUNDACIONES_EN_MEXICO_VERACRUZ_INFORME_FINAL1de2.pdf
- Gámez-Balmaceda, E., López-Lambrano, A. A., Seingier, G., & López-Ramos, A. (2019). Determinación de Áreas de Inundación en la Ciudad de Ensenada B.C y Su importancia en la Planeación de un Sistema de Alerta Temprana Ante Eventos Hidrometeorológicos y Climáticos. *Quehacer Científico En Chiapas*, 14(2), 81–91.
- Gámez-Balmaceda, E., López-Ramos, A., Martínez-Acosta, L., Medrano-Barboza, J. P., López, J. F. R., Seingier, G., ... López-Lambrano, A. A. (2020). Rainfall intensity-duration-frequency relationship. Case study: Depth-duration ratio in a semi-arid zone in Mexico. *Hydrology*, 7(4), 1–22. <https://doi.org/10.3390/hydrology7040078>
- González Gómez, O. (2008). *Territorio de la producción mundial*.
- Hasanzadeh Nafari, R., Ngo, T., & Lehman, W. (2016). Calibration and validation of FLFars-A new flood loss function for Australian residential structures. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(1), 15–27. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-15-2016>
- Huizinga, J., de Moel, H., & Szewczyk, W. (2017). *Global flood depth-damage functions : Methodology and the Database with Guidelines*. Joint Research Centre (JRC). <https://doi.org/10.2760/16510>
- INEGI. (1995). Estudio Hidrológico del Estado de Baja California, 79. Recuperado de: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825221560/702825221560_1.pdf
- Jardón Hernández, A. E., & Ordóñez Barba, G. (2009). Vivienda para los pobres: instrumentación e impactos del programa Tu Casa en la ciudad de Tijuana. *Estudios Fronterizos*, 10(19), 157–181. Recuperado de: http://scielo.unam.mx/scielo.php?pid=S0187-69612009000100005&script=sci_arttext

- John P. Fisher, Antonios G. Mikos, J. D. B. and D. R. P. (2012). Engineering: Principles and Practices for Retrofitting Flood-Prone Residential Structures, (January), 771. Recuperado de: <http://books.google.com/books?id=KxNJ1vn2gzcC&pgis=1>
- López-Lambrano, A. A., Martínez-Acosta, L., Gámez-Balmaceda, E., Medrano-Barboza, J. P., Remolina López, J. F., & López-Ramos, A. (2020). Supply and Demand Analysis of Water Resources. Case Study: Irrigation Water Demand in a Semi-Arid Zone in Mexico. *Agriculture*, 10(8), 333. <https://doi.org/10.3390/agriculture10080333>
- Marvi, M. T. (2020). A review of flood damage analysis for a building structure and contents. *Natural Hazards*, 102(3), 967–995. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03941-w>
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., & Williams, J. (2011). Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. *Texas Water Resources Institute*, 1–647. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.063>
- Ortega Villa, G. (2000). Satisfacción de necesidades básicas en Baja California: mitos y realidades. *Estudios Fronterizos*, 1(1), 9–45. <https://doi.org/10.21670/ref.2000.01.a01>
- Pedraza Díaz, A. (2014). *Evaluación De La Vulnerabilidad Urbana Y Resiliencia Ante Lluvias Intensas En La Ciudad De Ensenada, B.C.* El Colegio de la Frontera Norte. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Peña Muñoz, J. J. (2020). Migrantes En Baja California Vulnerabilidad y Riesgos. *Migrants In Countries In Crisis Initiative (MICIC)*. Recuperado de: https://micicinitiative.iom.int/sites/default/files/resource_pub/docs/estudiobjweb.pdf
- Rodríguez Esteves, J. (2007). Construcción social del riesgo y variabilidad climática. *Frontera Norte*, 19(37), 83–112.
- Scawthorn, C., Flores, P., Blais, N., Seligson, H., Tate, E., Chang, S., ... Lawrence, M. (2006). HAZUS-MH Flood Loss Estimation Methodology. II. Damage and Loss Assessment. *Natural Hazards Review ASCE*, 7(2), 72–81. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1527-6988\(2006\)7](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2006)7)
- SEDATU. (2016). Términos de Referencia para la Elaboración de Atlas de Peligros y/o Riesgos 2016. Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano.
- Soares, J., Blanco, R., García, C., Inzunza, E., & Rousseau, P. (2011). Flooding tendencies for the city of Ensenada, Baja, California, Mexico, 1948–2004. *Interventions for Academic and Behavior Problems II: Preventive and Remedial Approaches*, 52, 129–137. <https://doi.org/doi:10.2495/978-1-84564-6-1/46212>
- Torres Navarrete, C. R., García Toscano, J., Larios Castillo, S. I., Pacheco Ruíz, I., Correa Sandoval, F., & Gálvez Télles, A. (2012). Atlas de riesgos naturales del municipio de Ensenada 2012, (646), 174. Recuperado de: http://www.anr.gob.mx/Docs/2011/vr_02001_AR_ENSENADA.pdf

- U.S. Army Corps of Engineers. (2017). Hydrologic Modeling System; Application Guide, (June), 158.
- UNISDR. (2009). 2009 UNISDR Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastres. *Estrategia Internacional Para La Reducción de Desastres de Las Naciones Unidas (UNISDR)*, 43.
- United States Army Corps of Engineers. (2006). US Army Corps of Engineers New Orleans District. FINAL REPORT DEPTH-DAMAGE RELATIONSHIPS FOR STRUCTURES, CONTENTS, AND VEHICLES AND CONTENT-TO-STRUCTURE VALUE RATIOS (CSV) IN SUPPORT OF THE DONALDSONVILLE TO THE GULF, LOUISIANA, FEASIBILITY STUDY, (Marzo), 84. Recuperado de: <http://www.mvn.usace.army.mil/Portals/56/docs/PD/Donaldsv-Gulf.pdf>