

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
FACULTAD DE CIENCIAS



PROGRAMA DE DOCTORADO EN MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO
EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO POR INUNDACIÓN EN ENSENADA

Tesis que Presenta

ENA DEL CARMEN GAMEZ BALMACEDA

Para obtener el grado en

DOCTOR EN CIENCIAS EN MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO

Dirigida por

Dr. ALVARO ALBERTO LÓPEZ LAMBRAÑO

Dr. GEORGES SEINGIER

Ensenada, Baja California, Octubre de 2020

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Instituto de Investigaciones Oceanológicas

DOCTORADO EN MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO

“EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO POR INUNDACIÓN EN ENSENADA”
TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTORA EN CIENCIAS EN MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO

PRESENTA

ENA DEL CARMEN GAMEZ BALMACEDA

APROBADO POR



Dr. Alvaro Alberto López Lambraño

Codirector de tesis



Dr. Georges Seingier

Codirector de tesis



Dr. Carlos Villacís Villafuerte

Sinodal



Dr. José Emilio Baró Suárez

Sinodal



Dr. Hiram Rivera Huerta

Sinodal

Resumen

Las inundaciones constituyen uno de los eventos más catastróficos a nivel global, la base internacional de desastres EM-DAT reportó que en 2019 constituyó que cerca del 50% de los desastres naturales fueron inundaciones. Ensenada sufre periódicamente los efectos adversos de las inundaciones que ponen en riesgo la seguridad de la población y sus bienes. Este trabajo presenta la evaluación integral del riesgo de inundación en Ensenada, a través de una metodología multidisciplinaria que incluye: un análisis de la amenaza para determinar la severidad del evento y su probabilidad, la preparación de un modelo de exposición que incluye un inventario de viviendas clasificadas por su tipo de construcción y nivel social, la identificación y caracterización de infraestructura importante y, finalmente, la preparación de un modelo de vulnerabilidad tanto física como socio-económica, donde se incluyen las pérdidas por daños estructurales y de contenido. Se tomaron como base las guías del CENAPRED adaptándolas a las condiciones locales y complementándolas con metodologías desarrolladas a nivel global. Los datos necesarios para el análisis se integraron con datos de INEGI, CONAGUA, de instituciones académicas y datos levantados en campo, de tal manera que todos los datos fueron actualizados dentro del proceso de la tesis, constituyendo las principales contribuciones de esta investigación que pueden ser utilizados en otras áreas de trabajo. Las zonas más vulnerables encontradas se caracterizan por tener viviendas de construcción informal con materiales de construcción menos adecuados para enfrentar la amenaza de la inundación modelada ante una altura y velocidad del agua. Esta evaluación del riesgo es integral porque evalúa el impacto humano, físico, económico y determinación de prioridades para la gestión del riesgo. Se provee información detallada del impacto en la ciudad y la determinación de áreas prioritarias donde se espera el mayor impacto y se requiere la mayor atención del gobierno y Protección Civil, contribuyendo de esta manera a la gestión de riesgo.

Palabras claves: Curvas IDF, alerta temprana, periodos de retorno, amenaza por inundación, funciones de vulnerabilidad, pérdidas económicas, riesgo integral.

Dedicatoria

Con todo mi amor a:

Mi madre Ena,

Mis hijas Eva y América,

Mi esposo Ariel,

A mi familia en Nicaragua: mi padre, mis hermanos(as) y mis sobrinos(as). A mi segunda familia en México: mi suegra, mis cuñados(as) y sobrinos(as).

Agradecimientos,

A Dios, a mi madre Ena y a mi esposo Ariel, quienes han sido mi apoyo incondicional, por su amor, tiempo, consejos, paciencia y dedicación a mis hijas para que yo pudiera realizar esta investigación, sin ellos no hubiera sido posible este trabajo. ¡Los amo!

A mis hijas Eva y América por su amor, paciencia y alegría en todo momento. ¡Las amo!

A la Universidad Autónoma de Baja California y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la oportunidad que me han dado para alcanzar este logro.

Al Dr. Alvaro López-Lambraño, por creer en mí, por invitarme a ser parte de su grupo de trabajo, por su enseñanza académica, por el espacio en su laboratorio y el equipo adecuado para trabajar, por el apoyo de sus estudiantes en el trabajo de campo, por su dedicación, motivación y ayuda a culminar con éxito esta tesis, gracias por ser tan buen director.

Al Dr. Georges Seingier, por darme la oportunidad de realizar mi tema de investigación por su apoyo en la obtención de datos, sus valiosas sugerencias y el seguimiento como tutor.

Al Dr. Carlos Villacís, por su enseñanza académica, por asesorarme en cada uno de los aspectos del desarrollo de esta tesis, desde su experiencia profesional en evaluación del riesgo, por su amistad invaluable y apoyo todos estos años.

Al Dr. Hiram Rivera, por su tiempo y valiosa ayuda en el trabajo de campo para volar el dron y construir los modelos de elevación, uno de los principales datos en mi tesis.

Al Dr. José Emilio Baró, por su tiempo y valiosas aportaciones en cada avance de tesis.

Al laboratorio de meteorología del CICESE por brindarme los datos de precipitación para mi tesis, especialmente a Santiago Higareda, por su valioso tiempo y disposición.

Al Dr. Walter Daesslé por su amabilidad y buena disposición, como coordinador de posgrado, por el apoyo en cada uno de los eventos académicos que participé, cursos y congresos y por su ayuda en la escritura de uno de mis artículos.

A Yolanda Navarrete por su apoyo en todos mis trámites, y a todos mis profesores.

A mis compañeros(as) de posgrado del grupo de hidrocencias Luisa Martínez Acosta y Juan Pablo Medrano Barboza; por su amistad, conocimientos brindados y todo su apoyo en la realización de esta investigación, sobre todo en las publicaciones.

Al maestro Luis Mendoza por su apoyo todos estos años, por su amistad, sus consejos, su aporte académico, su apoyo todo estos años, especialmente en este tiempo de pandemia.

A toda mi familia y amigos(as) de Nicaragua y México, que han estado al pendiente de mí.

Contenido

Capítulo I. Introducción	4
I.1 Antecedentes	5
I.2 Justificación	7
I.3 Objetivo general.....	8
I.4 Metodología general	8
I.5 Referencias.....	10
Capítulo II. Relación Intensidad – Duración – Frecuencia. Caso de estudio: relación profundidad de la lámina de agua - duración en una zona semiárida en México.	12
II.1 Introducción.....	12
II.2 Materiales y métodos.....	15
II.3 Resultados y discusiones	26
II.4 Conclusiones.....	40
II.5 Referencias	41
Capítulo III. 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	45
III. 1 Introducción	47
III.2 Materiales y Métodos	49
III.3 Resultados y Discusión	54
III.4 Conclusiones	63
III.5 Referencias	65
Capítulo IV. Metodología Multidisciplina en la Evaluación Integral del Riesgo de Inundación: Caso de Estudio Ensenada	69
IV.1 Introducción	70
VI.2 Amenaza	72
IV.3 Exposición.....	77
IV.4 Vulnerabilidad.....	80
IV.5 Evaluación Integral del Riesgo	85
IV.6 Conclusiones	90
IV.7 Referencias bibliográficas	92
IV.8 Anexos	96

Capítulo V: Conclusiones generales	102
--	-----

Capítulo I. Introducción

El impacto de eventos naturales extremos afecta negativamente los procesos de desarrollo. Esto es especialmente cierto 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 creciente de asentamientos informales aumenta aún más 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 prácticamente el 50% de todos los eventos catastróficos reportados globalmente (CRED, 2020).

Históricamente, las lluvias intensas en Baja California han producido inundaciones que han impactado negativamente a la sociedad, desde pérdidas económicas, damnificados y muertos, principalmente en Tijuana y Ensenada (Rodríguez Esteves, 2007). Ensenada sufre periódicamente los efectos adversos de las inundaciones, desde el encharcamiento en las calles que arrastran vehículos y detienen el tráfico vehicular, hasta daños en viviendas e infraestructuras. Algunas de las inundaciones de mayor impacto ocurrieron en 1978 donde el tirante del agua alcanzó 2 metros, en 1980 se colapsó el puente San Miguel, impidiendo el tránsito de varios días, en 2010 se colapsó el puente Colonet (Torres, Larios, Correa, García, & Gálvez, 2012). En suma de estos impactos directos de las inundaciones, con las intensidades de lluvia de estos eventos, se asocian las amenazas colaterales, como deslizamientos que afectan las carreteras ocasionando pérdidas de vidas, por ejemplo el colapso de la carretera escénica Ensenada – Tijuana en 2013 (Andrade, 2016).

Derivado del problema recurrente de inundaciones en Ensenada, el objetivo principal de esta tesis es hacer una evaluación integral del riesgo, sobre el impacto directo de las inundaciones en la ciudad de Ensenada, como una contribución a la ciudad, para que se tomen medidas y acciones encaminadas a la mitigación y gestión de riesgo. En este tema es importante tener bien presente los conceptos del riesgo y sus elementos, utilizar una misma terminología a nivel global, para poder evaluarlo de manera eficiente; en ese sentido se toma la terminología de estos elementos, tomada de la Estrategia Internacional para la Reducción del Desastres (UNISDR, 2009). El riesgo está definido como las pérdidas potenciales, de todo lo que se puede perder cuando ocurre un evento, 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.

Para lograr nuestro objetivo se hizo la evaluación de cada uno de estos tres elementos. La amenaza estará representada por mapas que contienen las áreas de inundación para diferentes periodos de retorno, los elementos expuestos seleccionados son la población y sus bienes, donde se determina que tan susceptibles son a sufrir daños por las inundaciones, a través de la evaluación de la vulnerabilidad física y social. La meta fue implementar una evaluación integral del riesgo de inundación que promueva el desarrollo sostenible e identifique las áreas prioritarias de mayor atención para la gestión de riesgo. La propuesta de esta tesis se deriva de la revisión bibliográfica sobre los antecedentes de la situación del riesgo en Ensenada, los estudios con que cuenta la ciudad, la disponibilidad y calidad de los datos para mejorar la información, y la revisión de métodos a nivel global sobre la evaluación del riesgo y sus elementos, que sean aplicables a las condiciones locales de Ensenada.

El presente documento se encuentra dividido en cinco capítulos. El capítulo I corresponde a la introducción general. Los capítulos II al IV muestran el proceso sobre la evaluación integral del riesgo, los cuales son manuscritos resultados de esta investigación y han sido publicados en revistas científicas y un capítulo de libro. El capítulo V contiene las conclusiones generales.

I.1 Antecedentes

En Ensenada, siendo una zona semiárida, donde las lluvias son escasas, pero con la característica de ser intensas y de corta duración, se generan escurrimientos siempre que llueve e inundan la ciudad. Sin embargo, la ciudad cuenta con muy poca información sobre la evaluación de riesgos para enfrentar este problema. Algunos estudios no son publicados en revistas académicas, pero fungen como documentos oficiales ante el gobierno, como son los atlas de riesgos para el Estado y para el municipio (B.C, 2014; Torres *et al.*, 2012). El atlas del Estado solo contiene información de la amenaza con datos limitados sobre precipitación y terreno. El atlas de Ensenada solo cuenta con un análisis del riesgo basado con el recuento de las inundaciones históricas y la evaluación de la vulnerabilidad social de la ciudad respecto al equipamiento de la ciudad; aún no se incluye la evaluación de la

amenaza ante cualquier probabilidad ni la vulnerabilidad física en viviendas e infraestructura. Estos estudios deben ser actualizados con la información necesaria para la toma de decisiones. En este sentido se hizo una revisión de los estudios y trabajos encaminados a la evaluación y gestión de riesgo en Ensenada, para detectar y complementar la información faltante.

Para evaluar la amenaza de inundación se necesita como dato principal el análisis de los datos de precipitación, específicamente los datos de intensidad de lluvia para diferentes duraciones y frecuencia, conocidos como curvas IDF. En Ensenada solo hay dos documentos oficiales con este dato. Las Normas para diseñar infraestructura hidráulica en el Estado, elaborado para la Secretaría de Infraestructura de Desarrollo Urbano, con datos solo hasta 2011 y las isoyetas de la Secretaría de Comunicación y Transporte con información publicada en 2015, pero sin ninguna variación desde su primera publicación en 1990 (POBC, 2013; SCT, 2014). Sin embargo, Ensenada cuenta con estaciones climatológicas con datos pluviográficos y pluviométricos los cuales pueden ser utilizados para calcular y actualizar las curvas IDF para la ciudad.

En el contexto de político sobre la gestión de riesgos, la Ley General de Protección Civil señala que los atlas de riesgo constituyen el marco de referencia para la elaboración de políticas y programas en todas las etapas de la Gestión Integral del Riesgo; asimismo, establece que el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) es la institución técnica-científica de la Coordinación Nacional de Protección Civil que tiene entre sus atribuciones la integración del Atlas Nacional de Riesgos (ANR) (Diario de la federación diciembre de 2016).

Los atlas de riesgos municipales se elaboran con base a los términos de referencia de Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU), donde se indica el uso de las guías del CENAPRED para toda la república mexicana (CENAPRED, 2006; SEDATU, 2016). Tomando en cuenta lo establecido por ley, el punto de partida de este estudio fue la revisión y adaptación de las guías del CENAPRED a las condiciones locales. De la revisión de las guías se encontró que para que sea aplicable a la zona de estudio hace falta incorporar un estudio hidrológico para la determinación del caudal pico, la incorporación de la vulnerabilidad física estructural en las viviendas y un método para cuantificar las pérdidas materiales. De esta necesidad, se hizo una revisión bibliográfica

sobre los métodos para evaluar cada uno de estos elementos faltantes para la evaluación del riesgo.

En el tema de la amenaza se revisaron las herramientas de modelación hidrológica y su fundamentación teórica sobre la evaluación del balance hídrico, para evaluar la distribución de la lluvia y obtener el caudal máximo. Los datos de suelo y de terreno para la delimitación de las cuencas se obtuvieron de Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Los modelos revisados fueron el *Soil Water Assessment Tool* (SWAT) y el *Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS) que se basan en el método de número curva (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, 2011; U.S. Army Corps of Engineers, 2017). Ningún estudio en Ensenada ha incluido este análisis para determinar la amenaza de inundación.

En el tema de evaluación de vulnerabilidad y riesgos, los estudios que se encontraron no incluyen la cuantificación de daños y pérdidas (Pedraza Díaz, 2014; Soares, Blanco, García, Inzunza, & Rousseau, 2011; Torres Navarrete *et al.*, 2012). Por lo tanto se revisaron los métodos existentes para evaluar la vulnerabilidad física que ayuda a cuantificar el daño y a partir de este dato se pueden calcular las pérdidas (Escuder-Bueno *et al.*, 2012; FEMA, 2016; Scawthorn *et al.*, 2006; United States Army Corps of Engineers, 2006).

Sobre la evaluación de pérdidas materiales también se hizo una revisión bibliográfica, donde se encontró que en México hay varios estudios que contienen métodos sobre evaluación de pérdidas que deben incluirse en la evaluación de riesgos, estos métodos fueron probados en este estudio (Alcocer-yamanaka, 2016; Baró Suárez *et al.*, 2012; Fuentes Mariles, Franco, Luna Cruz, & Morales Rodríguez, 2014).

I.2 Justificación

El problema de las inundaciones y su impacto se presentan por causas de la naturaleza y humanas, estas causas pueden ser estudiadas y analizadas desde un enfoque multidisciplinario que incluya a las ciencias físicas y sociales. Ensenada sufre periódicamente los efectos de inundaciones importantes, la ciudad queda fuera de servicio, no se puede transitar, hay problemas de drenaje peligrosos para la salud, y muchas veces se detienen las actividades laborales. A pesar de que las inundaciones son un problema recurrente en Ensenada y en algunas ciudades de Baja California, no existen estudios que evalúen de manera integral el riesgo de inundación y su gestión. Es importante, por lo tanto, la implementación de una adecuada gestión del riesgo que proteja no sólo la vida de los

ciudadanos sino también los bienes públicos y privados y los avances logrados en el proceso de desarrollo. Esto implica una adecuada evaluación del riesgo, la preparación de una estrategia de gestión del riesgo basada en evidencia y entendimiento del riesgo, y la implementación de acciones, medidas y políticas efectivas para reducir el riesgo a niveles aceptables.

I.3 Objetivo general

Evaluar el riesgo por inundación en Ensenada, a través de una metodología multidisciplinaria y su difusión como contribución para la gestión integral del riesgo.

Objetivos específicos

1. Evaluar la amenaza por inundación y sus características físicas que incluyen severidad, probabilidad y frecuencia
2. Preparar un modelo de exposición ante la amenaza por inundación que incluye a la población y sus bienes
3. Preparar el modelo de vulnerabilidad física, estructural, social y económica de los elementos expuestos
4. Preparar una guía para la evaluación integral del riesgo por inundación.

I.4 Metodología general

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. Primeramente, se empieza con la evaluación apropiada de la amenaza, la cual se desarrolló en los capítulos II y III. El capítulo II contiene la estimación de las intensidades de precipitación para diferentes periodos de retorno, como dato principal para la estimación de la amenaza. El capítulo III contiene la evaluación de la amenaza y su importancia para un sistema de alerta temprana, para determinar los periodos de retorno a evaluar, los mapas de amenaza para todos los periodos de retorno se muestran en la sección de anexos del capítulo IV. Una vez que se han determinado los datos de la amenaza, el siguiente paso es evaluar la vulnerabilidad y el riesgo, con la integración del impacto físico, social y económico, y la determinación de prioridades. Este proceso se compiló en una guía para la evaluación integral del riesgo, el cual se detalla en el capítulo

V. El diagrama general de la metodología que se propone en esta tesis se muestra en la figura 1.

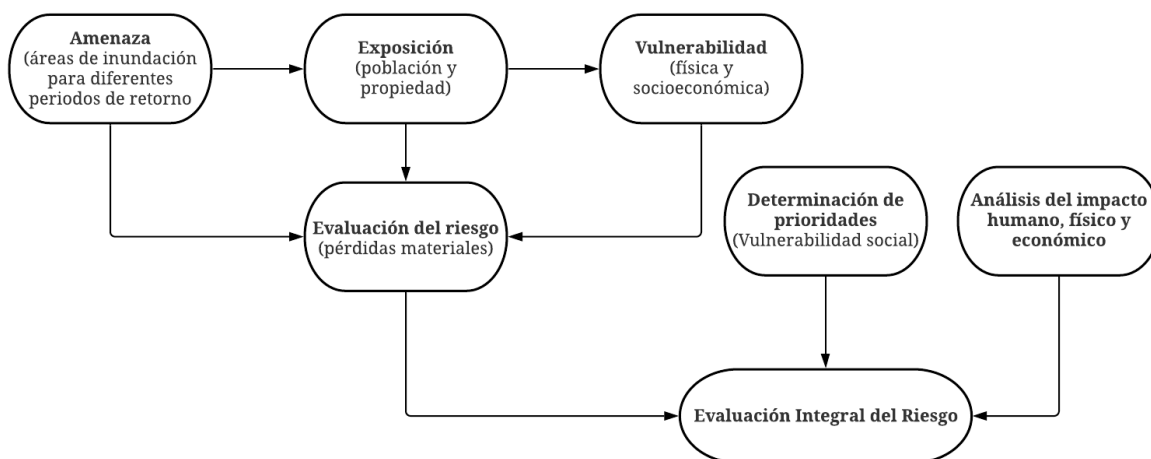


Figura 1. Diagrama general de la metodología para la evaluación integral del riesgo.

I.5 Referencias

- Alcocer-yamanaka, V. H. (2016). Metodología para la generación de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas, *VII*, 33–55.
- Andrade, P. (2016). *Análisis del deslizamiento en la carretera Tijuana-Ensenada (km 93 +50) a partir modelos de relieve de alta resolución espacial*. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Retrieved from https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/669/1/tesis_Andrade_García_Patricia_09_dic_2016.pdf
- B.C, C. E. de P. C. (2014). *Atlas de Riesgos de Baja California*. Retrieved from <http://www.proteccioncivilbc.gob.mx/Atras/BajaCalifornia.html>
- Baró Suárez, J. E., Días Delgado, C., Calderón Aragón, G., Esteller, M., Cadena, E., & Franco, R. (2012). *Metodología para la valoración económica de daños potenciales tangibles directos por inundación*.
- CENAPRED. (2014). *Metodología para la elaboración de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas*.
- CRED, C. for R. on the E. of D.-. (2020). Disaster* Year in Review 2019. *Cred*, (58), 1–2.
- Escuder-Bueno, I., Castillo-Rodriguez, 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. (2016). Guidance for Flood Risk Analysis and Mapping, 1(May), 1–29.
- Fuentes Mariles, O., Franco, V., Luna Cruz, L., & Morales Rodríguez, H. (2014). *CARACTERIZACIÓN FLUVIAL E HIDRÁULICA DE LAS INUNDACIONES EN MÉXICO*. Retrieved from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/153086/CARACTERIZACION_FLUVIAL_E_HIDRULICA_DE_LAS_INUNDACIONES_EN_MEXICO_VERACRUZ_INFORME_FINAL1de2.pdf
- 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>

- POBC. (2013). Normas técnicas para proyectos de obras de alcantarillado pluvial para el Estado de Baja California. Baja California: Periodico Oficial del Estado de Baja California. Retrieved from <https://periodicooficial.ebajacalifornia.gob.mx/oficial/mostrarDocto.jsp?nombreArchivo=Periodico-31-CXX-2013712-SECCIÓN II.pdf&sistemaSolicitante=PeriodicoOficial/2013/Julio>
- 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)
- SCT. (2014). Isoyetas de intensidad-duración-periodo de retorno para la República Mexicana - Baja California. *SCT (Secretaria de Comunicacion y Transporte)*, 41. Retrieved from <http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Isoyetas/bajacalifornianorte.pdf>
- Torres, C., Larios, S., Correa, F., García, J., & Gálvez, A. (2012). Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Ensenada 2012. *Universidad Autónoma Del Estado de Baja California*, ISBN: 978-607-607-091-8, ((607-607)). <https://doi.org/DOI10.13140/2.1.4426.3206>
- 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, (March), 84. Retrieved from <http://www.mvn.usace.army.mil/Portals/56/docs/PD/Donaldsv-Gulf.pdf>

Capítulo II. Relación Intensidad – Duración – Frecuencia. Caso de estudio: relación profundidad de la lámina de agua - duración en una zona semiárida en México.

Artículo enviado y aceptado

Gámez-Balmaceda E., López-Ramos A., Martínez-Acosta L., Medrano-Barboza J.P., Remolina López J.F., Seingier G., Daessle L.W., López-Lambraños A.A. (2020). Rainfall Intensity-Duration-Frequency Relationship. Case Study: Depth-Duration Ratio in a Semi-Arid Zone in Mexico. *Hydrology* (ISSN 2306-5338).

II.1 Introducción

La relación Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), o curvas IDF, es una representación de la intensidad de los eventos de precipitación para calcular el caudal pico necesario para diseñar estructuras hidráulicas (por ejemplo, diseño de alcantarillados pluviales, alcantarillados sanitarios, sistemas de drenaje), para evaluar y predecir el peligro de inundación, y por lo tanto, diseñar estructuras de protección (de Paola *et al.*, 2014; Raghunath, 2006; Sherif *et al.*, 2014). La mayoría de estas estas estructuras fueron construidas en países desarrollados hace tiempo sin una actualización de las IDF, a pesar de que la lluvia es variable en el tiempo y en el espacio. En consecuencia, la actualización de la relación IDF en cuencas urbanas necesariamente implicará una revisión y modificación de los diseños estructurales locales (Gericke & Du Plessis, 2012). La actualización del diseño de las IDF también ayudaría a predecir la ocurrencia de riesgo de inundación y mapear los peligros de inundación del flujo máximo esperado. Esto es especialmente relevante en las zonas áridas y semiáridas donde las características de la lluvia indican que la variación anual de las tormentas es muy grande y las intensidades son muy altas y de corta duración, y, por lo tanto, las inundaciones son de ocurrencia repentina y aumento rápido (Lin, 1999). El noroeste de México es una región semiárida con un promedio de precipitación anual bajo, pero con presencia de lluvias intensas, asociadas a la variabilidad climática, que causan inundaciones (Cruz Aguirre, 2018; Pacheco, 2015; Rodríguez Esteves, 2007).

El diseño de la relación Intensidad-Duración-Frecuencia se basa con la medida de eventos máximos de precipitación relacionada a una duración y desarrollada para un

determinado periodo de recurrencia o de retorno (Arnell, 1978), donde la precisión depende de las características de la precipitación, como la magnitud, frecuencia y duración (Campos-Aranda, 2012; López-lambrano, Fuente, Gonzalez-Sosa, Lopez-Ramos, 2017). Los datos que se analizan son las series de tiempo de precipitación, modeladas para proyecciones futuras a escala regional, donde generalmente los periodos de retorno indican que las precipitaciones tienden a aumentar si las condiciones climáticas no cambian (DeGaetano & Castellano, 2017; Groisman *et al.*, 2012). Sin embargo, debido al cambio climático, existen incertidumbres sobre la ocurrencia de lluvias intensas que afectan el período de retorno del diseño de las IDF, que a su vez tiende a disminuir en algunas regiones del mundo (WHO and UNEP, 2012). Lo anterior hace necesario que se desarrolle un análisis de tendencias de los eventos de lluvia extrema para diseñar o actualizar la relación IDF.

La mejor estimación de la intensidad de la precipitación (unidad / tiempo) se obtiene directamente de una estación meteorológica automática (pluviógrafo) que mide la lluvia sub-horaria, y para la cual los registros se transmiten automáticamente cada cinco o diez minutos (Jaklič *et al.*, 2016; Llasat, 2001). Sin embargo, existe una baja densidad de este tipo de estaciones meteorológicas en el territorio mexicano. Según el Manual del Sistema Global propuesto por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), la distancia entre estaciones debe ser entre 5 y 30 km (Organización meteorológica mundial, 2010; Plummer *et al.*, 2003). Sin embargo, en México la distancia entre las estaciones es de 70 km en promedio; por lo tanto, existe una ausencia de datos entre estaciones a lo largo del espacio y el tiempo. En el país, desde 1999 los registros de lluvia sub-horaria disponibles se registran a través de estaciones meteorológicas automáticas (EMA's), operado por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

La ciudad de Ensenada cuenta con dos diseños oficiales de las IDF: uno publicado como Norma Oficial por el Estado de Baja California, con registros diarios de precipitaciones de 1948 a 2008 (Secretaría de Infraestructura y Desarrollo Urbano, 2013); y otra, de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes de la Federación (SCT) publicada en 2000, analizó series temporales (Secretaría Comunicaciones y Transporte, 2014). Debido a la ausencia de estaciones automáticas, estos estudios no utilizaron los registros

pluviógrafos de las últimas dos décadas (2000-2020), para evaluar eventos de lluvia extrema, necesarios para desarrollar las curvas IDF. Este problema de falta de datos y estaciones meteorológicas es evidente en varias ciudades de México; sin embargo, para minimizar el inconveniente de la periodicidad de las mediciones y la distancia entre las estaciones meteorológicas, la mayoría de los estudios en México han utilizado diferentes métodos empíricos para estimar la relación IDF con base en la precipitación diaria de pluviómetros estándar (Campos-Aranda, 2010; Lorente *et al.*, 2013; Ramírez Cruz *et al.*, 2015).

Considerando la presencia de lluvias intensas con ocurrencias de inundaciones, los datos limitados utilizados para desarrollar curvas IDF y la importancia de mejorar el diseño IDF para la ciudad de Ensenada, Baja California, el presente estudio tiene como objetivo investigar el uso y combinaciones de registros pluviográficos y registros diarios para evaluar el comportamiento de la lluvia en la ciudad, y seleccionar un método adecuado que proporcione los mejores resultados de la relación IDF, y en consecuencia actualizar la relación IDF para la ciudad para períodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años.

La selección de datos de precipitación actualizados fue el punto de partida del estudio, como registros de lluvia de corta duración, con incrementos cada 5 o 10 minutos, en cuatro estaciones automáticas, y registros de precipitación diaria de once estaciones de pluviométricas estándar en la ciudad y sus alrededores (Figura 1). Se identificaron los eventos máximos anuales de precipitación, y se caracterizaron por la intensidad y duración para desarrollar la IDF en todas las estaciones. Los métodos incluyen el análisis de la distribución estadística de Valores Extremos de Gumbel (VEG) que se ajusta satisfactoriamente a los datos (López-lambraño *et al.*, 2017), en combinación con el ajuste de las ecuaciones de Chen (Chen, 1983), recomendado para diseño hidrológico urbano en la República Mexicana (Campos-Aranda, 2010). El método de Chen se evaluó con base en la relación lluvia-duración (R) de la zona. El desarrollo de la relación IDF para las estaciones de pluviómetros se centró en estimar la relación (R) más adecuada; elegido entre probar varios métodos y analizar la lluvia en la región, incluidas California y Baja California.

El resultado principal de este estudio es una relación IDF actualizada para la ciudad de Ensenada, que permitirá a los ingenieros civiles la toma de decisiones en cuento a los

diseños de estructuras hidráulicas y evaluaciones de peligros de inundaciones. Otro resultado importante es proporcionar un método y datos alternativos para desarrollar las curvas IDF en ausencia de registros pluviógrafos para zonas semiáridas con las mismas características de lluvia encontradas en Ensenada, donde la lluvia de una hora y el período de retorno de 2 años se encuentran en un rango entre 10 y 16,61 mm.

II.2 Materiales y métodos

La zona urbana de Ensenada y sus alrededores ha sido determinada como el área de estudio, ubicada en la costa Pacífica de Baja California en las coordenadas 31°30'-31°60'N; 116°50'-116°10' W (Figura 1). Esta zona, en el noroeste de México, tiene un clima semiárido, con lluvias de tipo convectivas que se caracterizan por ser intensas y de corta duración. La precipitación media multianual es de 273 mm, donde la temporada de lluvias suele darse entre noviembre y abril. El paisaje topográfico es variable, con pendientes pronunciadas, valles aluviales y una llanura costera aluvial (Smith *et al.*, 2007). Esta área se divide en cuatro subcuencas urbanas y siete rurales que drenan hacia la costa del Pacífico. Existen 11 estaciones meteorológicas dentro de las cuencas ubicadas a diferentes alturas, que contienen los datos principales para lograr el propósito de este estudio (Figura 1).

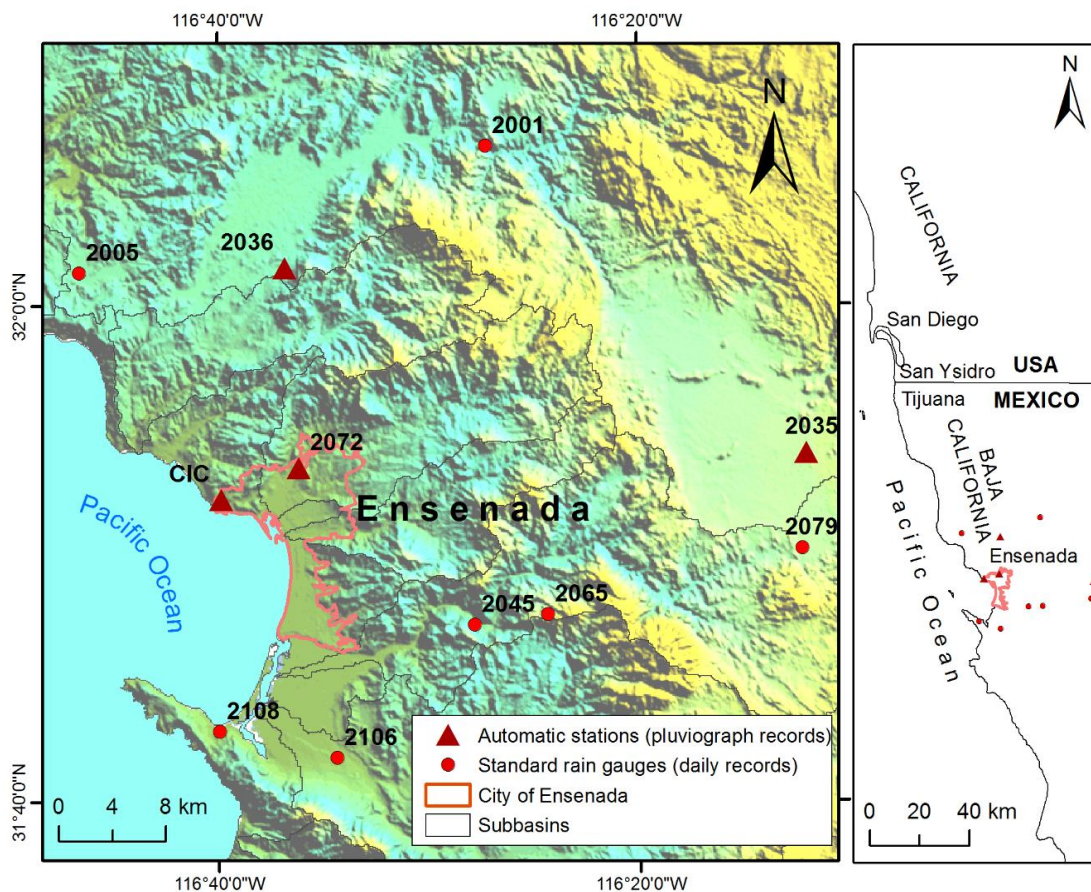


Figura 1. Localización del área de estudio mostrando las subcuencas y la distribución de las estaciones meteorológicas.

Los datos requeridos para desarrollar la relación IDF en la zona de estudio fueron los eventos máximos de precipitación, registrados anualmente en diferentes duraciones; extraído de cuatro estaciones automáticas (registros pluviográficos). Por otro lado, se recopilaron e incluyeron en los cálculos datos históricos de precipitación de diez estaciones pluviométricas, que solo tienen registros de precipitación cada 24 horas (Tabla 1).

La estación Emilio López Zamora es la estación automática con mayor cantidad de datos registrados. Tiene 20 años de registros, con mediciones cada diez minutos. Esta estación es administrada por una agencia gubernamental, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Las otras tres estaciones automáticas sólo tienen 10 años de registro, con mediciones cada cinco minutos: CICESE (CIC), Guadalupe (2036) y Ojos Negros (2035);

las tres administradas por la institución académica: Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE).

Tabla 1. Red de estaciones pluviométricas y pluviográficas en la zona de estudio.

Nombre estación	ID	Elevación (m)	Tipo de registros	Lat	Long	Period de registro	Fuente de datos
Emilio Lopez Zamora	2072	43	10 minutes 24 hours	31.89	-116.60	1999 - 2019 1940 - 2019	CONAGUA CONAGUA /CICESE
CICESE	CIC	60	5 - minutes	31.86	-116.66	2007 - 2019	CICESE
Guadalupe	2036	361	5 - minutes 24 hours	32.02	-116.61	2009 - 2019 1954 - 2019	CICESE CONAGUA
Ojos Negros	2035	680	5 - minutes 24 hours	31.91	-116.23	2009 - 2019 1948 - 2019	CICESE CONAGUA
Agua Caliente	2001	400	24 hours	32.10	-116.45	1969 - 2011	CONAGUA
Boquilla de Santa Rosa	2005	250	24 hours	32.02	-116.77	1969 - 2011	CONAGUA
San Carlos	2045	164	24 hours	31.78	-116.46	1969 - 2011	CONAGUA
Santo Tomas	2065	180	24 hours	31.79	-116.40	1969 - 2011	CONAGUA
El Alamar	2079	710	24 hours	31.83	-116.20	1969 - 2011	CONAGUA
Maneadero	2106	50	24 hours	31.69	-116.57	1969 - 2011	CONAGUA
Punta Banda	2108	15	24 hours	31.71	-116.66	1969 - 2010	CONAGUA

Nota: 5-minutos: estaciones automáticas, 24 hours (diariamente): estaciones pluviométricas. Lat: latitud, Long: longitud

En el caso de las estaciones pluviométricas se cuenta con diez estaciones con registros cada 24 horas, de 1969 a 2011, cubriendo toda la ciudad de Ensenada. Además, tres de las estaciones automáticas (2072, 2036 y 2035) tienen registros diarios de 1940 a 2011; completándose así la serie temporal de registros diarios para estas diez estaciones a partir de la acumulación de precipitación diaria de registros pluviógrafos hasta 2019. De esta manera, se tienen tres estaciones con una combinación de registros pluviógrafos y lluvias diarias de 1940 a 2019; considerado para el análisis de prueba para determinar un método eficiente para el desarrollo de relaciones de las IDF, comenzando con 2072 y seguido por 2036 y 2035.

La identificación de cada evento se basó en los registros pluviógrafos continuos, desde el inicio de la lluvia, hasta que se detuvo por más de una hora; por ejemplo, si la lluvia terminó en determinado momento, pero comenzó repentinamente antes de que pasara una hora, este registro se consideró como parte del evento anterior. No obstante, también se consideró como un evento separado durante el día sí, después de ocurrido un evento, hubo dos horas sin lluvia y comenzó a llover nuevamente. Una vez identificados todos los

eventos, se clasificaron por duración y magnitud para seleccionar el más intenso de cada año. La intensidad se define por la magnitud de la lluvia en mm, registrada durante un tiempo determinado; por ejemplo, hay eventos con la misma magnitud y diferente duración en horas, donde el más intenso es siempre el de menor duración. Las medidas de los eventos registrados por las cuatro estaciones automáticas tuvieron diferentes duraciones. En algunas estaciones automáticas, el evento más grande registrado (no el más intenso), fue de 180 minutos. Otros eventos intensos tuvieron un período solamente de 10 minutos. Sin embargo, la mayoría de los eventos intensos tuvieron un período de 120 minutos; por lo tanto, esta duración fue seleccionada para identificar los eventos intensos de cada año. López-Lambraño desarrolló este método para identificar y clasificar los eventos intensos (Lopez-Lambraño, 2001), y ha sido aplicado satisfactoriamente por Maldonado M. y Martínez G. (Maldonado M. & Martínez G., 2007).

Se analizaron las series de tiempo pluviográfica y registros de precipitación diaria para conocer la tendencia del evento máximo de lluvia y la precipitación máxima diaria. El análisis de tendencia se aplicó a los tres pluviómetros automáticos y estándar que comparten la misma ubicación (2072, 2036 y 2035). En todos los casos, se trazaron líneas de tendencia para determinar si la lluvia ha ido aumentando o disminuyendo a lo largo de los años.

El desarrollo de la relación IDF es un procedimiento que comienza con la disponibilidad de datos, tipo de registros, años de registros, calidad y cobertura, con el fin de elegir un método eficiente y reclamar los mejores resultados. En este caso, se aplicaron dos métodos, para diferentes condiciones, y así estimar la relación de las IDF para períodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años. Estos períodos, propuestos por la Prevención Nacional de Desastres, son adecuados para el diseño de estructuras hidráulicas urbanas menores y evaluaciones de riesgo de inundaciones (SEDATU, 2016). El primer método para estimar la relación IDF es aplicada a los datos del pluviógrafo (de estaciones automáticas). Estos datos proporcionan la intensidad real que ocurrió para cada evento de lluvia a lo largo de los años y pueden extrapolarse aplicando una distribución de probabilidad. La distribución generalizada de valores extremos (DGVE) es aplicada generalmente para estimar las curvas IDF, como la extrapolación de los datos disponibles para estimar el valor extremo de la

muestra. El método de Gumbel, basado en la teoría de valores extremos, es el primer método que se aplica aquí; donde la probabilidad de que un evento de determinada magnitud no sea igualada o superada, puede ser adoptada con seguridad y ha sido ampliamente utilizada (Courty *et al.*, 2019; Lopez-Lambraño, 2001), expresada por la ecuación (1).

$$F(X) = e^{\left[-e^{\left(\frac{X-\mu}{\alpha} \right)} \right]} \quad (-\infty < X \leq \infty) \quad (1)$$

Donde, $0 < \alpha < \infty$ es el parámetro de escala, $-\infty < \mu < \infty$ es el parámetro de localización o valor central, e es la base de los logaritmos neperianos, α , X , y μ ; corresponden a los parámetros de los momentos estadísticos de la distribución. La derivada de la distribución proporciona la función de densidad de probabilidad donde los valores de X , para diferentes periodos de retorno (T), son estimados usando:

$$X_T = \mu + \alpha Y_T \quad (2)$$

$$Y_T = -\ln \left[\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right] \quad (3)$$

Los intervalos de confianza son importantes para estimar el período de retorno y la precisión de los datos. Generalmente, los datos para calcular las curvas IDF tienen un error estándar del 10% para períodos de retorno cortos y del 20% para períodos de 50 y 100 años (Bell, 1969). Por el método de Gumbel, aplicado a los datos automáticos, las curvas IDF se pueden estimar con un valor de confianza para un período de retorno de 20 años, considerando los registros de 10 y 20 años de las tres estaciones automáticas. Las curvas IDF para un período de retorno de 20 años son útiles para el diseño de estructuras urbanas menores. Sin embargo, para desarrollar las curvas IDF para periodos de retorno grandes, como 50 o 100 años, existiría incertidumbre al aplicar el método Gumbel. Por lo tanto, el requisito para aplicar los métodos de Gumbel con un grado de confianza adecuado consistiría en tener una larga serie de datos de precipitación.

Los registros pluviógrafos fueron útiles para tener datos reales de los eventos para estimar la IDF para períodos de retorno cortos, pero no fueron suficientes para extrapolar

las intensidades de lluvia para los períodos de retorno más grandes. Por lo tanto, fue necesario el uso de la lámina de agua lluvia diaria, a partir de los pluviómetros estándar, y con esta información realizar el cálculo de la intensidad de lluvia para todos los períodos de retorno propuestos. Esto nos permite contrarrestar los cálculos con los datos automáticos y difundir mejores resultados.

En consecuencia, se aplica un segundo método para desarrollar las curvas IDF recomendadas para el diseño hidrológico urbano en la República Mexicana (Campos-Aranda, 2010) a los registros de precipitación diaria (de los 10 pluviómetros estándar). Este método fue desarrollado por Chen, como una alternativa de los registros pluviógrafos ausentes (Chen, 1983), mediante la siguiente ecuación:

$$P_t^{Tr} = \frac{aP_1^{10} \log(10^{2-X} Tr^{X-1})t}{60(t+b)^c} \quad (4)$$

Donde, P_t^{Tr} es la intensidad de precipitación en mm/h, $P_1^{10} = R(P_{24}^{10})$, P_1^{10} es la lluvia en mm, generada en una hora para un periodo de retorno de 10 años, (X) es la relación del

periodo de retorno de la lluvia $X = \frac{P_t^{100}}{P_t^{10}}$, P_t^{100} y P_t^{10} es la lluvia de 24 horas y periodo de retorno de 100 y 10 años, respectivamente. (Tr) es el periodo de retorno en años, (t) es la duración en minutos, (a), (b), y (c) son parámetros de la caracterización regional de la lluvia definida por la relación (R).

La relación lluvia-duración (R) es el parámetro más importante para estimar la relación IDF, a partir de registros diarios, utilizando la ecuación de Chen para una ubicación geográfica específica, porque esta relación se encuentra relacionada con las características de lluvia de la zona (Hersfield & Wilson, 1957). Como se mostró anteriormente, la ecuación (4) se basa en la relación (R) para determinar la lluvia de una hora y un periodo de retorno de diez años P_1^{10} , y, por lo tanto, la lluvia para un período de retorno dado. Chen también ha propuesto la relación (R) para cualquier condición promedio de lluvia en cualquier área geográfica (Chen, 1983), mediante la siguiente ecuación:

$$R = \frac{P_1^2}{P_{24}^2} \quad (5)$$

Donde, (P_1^2) es la lluvia en mm, generada en una hora para un periodo de retorno de 2 años. (P_{24}^2) es la Lluvia en mm, generada en 24 horas para un periodo de retorno de 2 años. Este valor es calculado fácilmente aplicando la distribución de Gumbel para cada estación pluviométrica. (P_1^2) pueden ser calculado de las pluviográficas aplicando la distribución de para cada estación. Sin embargo, el problema para aplicar la fórmula 5 es encontrar el valor de la lluvia de una hora y un período de retorno de dos años, cuando solo hay registros diarios, no registros pluviógrafos. Por lo tanto, para validar el método de Chen en esta región, se consideró realizar una adecuada estimación de la razón (R) a través del valor de (P_1^2) .

Hershfield y Wilson han dado varias alternativas para aplicar la ecuación (5) para cualquier área geográfica, basadas sólo en registros diarios, mediante un diagrama que relaciona la media de las observaciones anuales máximas de precipitación diaria con el número medio anual de días de tormenta; Reich, a través de un mapa isopluvial mundial ha propuesto la precipitación máxima de 1 hora para un periodo de retorno de 2 años; y Bell, basado en el método de Hershfield propuso la siguiente ecuación:

$$P_1^2 = 0.17MN^{0.33} \quad (6)$$

La ecuación (6) se podría aplicar si $0 < M \leq 2.0$, $1 < N \leq 80$, en la cual $(P_1^2) = 2$ años, 1 h de lluvia en pulgadas: M = media de la máxima observacional anual – precipitación diaria en pulgadas: y N = número medio anual de días de tormenta.

El propósito fue estimar el valor R para 10 estaciones pluviométricas aplicando la ecuación (5), donde (P_{24}^2) se evaluó fácilmente usando registros diarios, aplicando la distribución de Gumbel (ecuaciones 2 y 3). En el caso de (P_1^2) donde hay tres estaciones con registros pluviógrafos y siete estaciones con registros diarios, el problema fue encontrar los registros diarios para las 7 estaciones. En consecuencia, se decidió evaluar los métodos

disponibles para estimar el valor de (P_1^2) y elegir la mejor forma de encontrar (P_1^2) para calcular con precisión la relación (R) .

El proceso inicia conociendo el valor aproximado de (P_1^2) a lo largo del área regional para compararlos con los valores estimados a través de los métodos mencionados. Los valores aproximados de (P_1^2) en el área regional se examinaron mediante una revisión de la literatura. Esta revisión de los estudios regionales, con las mismas características de precipitación, incluye a California en los Estados Unidos (CA), cerca de la frontera internacional, y Baja California en México, como se muestra en la figura 1.

El primer método evaluado para calcular (P_1^2) fue la distribución de Gumbel utilizando registros pluviógrafos de las estaciones: CIC, 2072, 2036 y 2035. Luego, se estimó un promedio ponderado entre las cuatro estaciones automáticas, a través de los polígonos de Thiessen. El valor promedio se asignó a las siete estaciones pluviométricas, para reemplazarlo en la ecuación (5) y tener el primer valor (R) en la zona, como (R_1) .

El siguiente paso fue calcular (P_1^2) para las 10 estaciones de pluviómetros mediante los métodos descritos anteriormente (Bell, 1969; Hershfield & Wilson, 1958; Reich, 1963). Cada valor fue reemplazado en la ecuación (5) para tener diferentes valores de (R) como (R_2) y (R_3) . Se estimaron tres valores (R) diferentes. Sin embargo, a partir de los diferentes valores de (P_1^2) , se consideró buscar una relación para proporcionar valores de (P_1^2) para las estaciones de pluviómetros cercanos a los valores de estimados a partir de registros pluviógrafos. Los métodos de Hershfield y Bell proporcionan los mismos resultados. De esta manera, se derivó un nuevo método para encontrar (P_1^2) a partir de la fórmula de Bell (ecuación 6). Después de varias pruebas de variación de parámetros, la nueva relación resultó de modificar la ecuación (6) en la siguiente ecuación:

$$P_1^2 = 0.12MN^{0.33} \quad (7)$$

Los valores estimados de la ecuación (7) fueron reemplazados en la ecuación (5) para tener nuevos valores de (R) , como (R_4) . Por lo tanto, los métodos evaluados

proporcionaron cuatro resultados diferentes de ($R_{1...4}$). El desafío fue elegir el mejor método de búsqueda (R); así, para enfrentar este desafío, se realizó un promedio de todos los (R) calculados, y este promedio se propuso como la mejor opción para determinar la razón (R) para la ciudad de Ensenada (ecuación 8). En la figura 2 se representa un resumen del proceso para encontrar la relación (R) para cada estación de la zona.

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^n R}{n} \quad (8)$$

Una vez que se determinó la relación (R) para cada estación pluviométrica, la distribución espacial de la relación (R) se trazó en un mapa por interpolación, utilizando el método de ponderación de distancia inversa (IDW). En consecuencia, la distribución de la relación (R) para el área de estudio se puede utilizar con éxito para calcular las curvas IDF en la zona.

El procedimiento para desarrollar la relación IDF para los períodos de retorno propuestos, incluye la combinación de registros pluviógrafos y de precipitación diaria, a través de diferentes métodos y comparaciones de sus resultados, para elegir el más adecuado, según las características de la lluvia.

El primer paso fue el cálculo de la relación IDF en tres estaciones automáticas (2072, 2036 y 2035), utilizando los eventos de precipitación máxima para cada año, aplicando el método de Gumbel (ecuación 1).

El segundo paso fue el cálculo de la relación IDF para las 10 estaciones pluviométricas, con registros diarios de más de 40 años, aplicando el método Chen (ecuación 4), donde tres de ellas comparten las mismas ubicaciones con estaciones automáticas (2072, 2036 y 2035).

Los cálculos que utilizaron la ecuación de Chen incluyeron el uso de las razones (R) encontradas con los diferentes métodos ya mencionados, para todas las estaciones, seguido de la comparación de los diferentes resultados de los desarrollados con los valores de IDF desarrollados en 1990 por la (SCT), y la comparación con la relación IDF desarrollada en 2011 por la Normativa del Estado de Baja California.

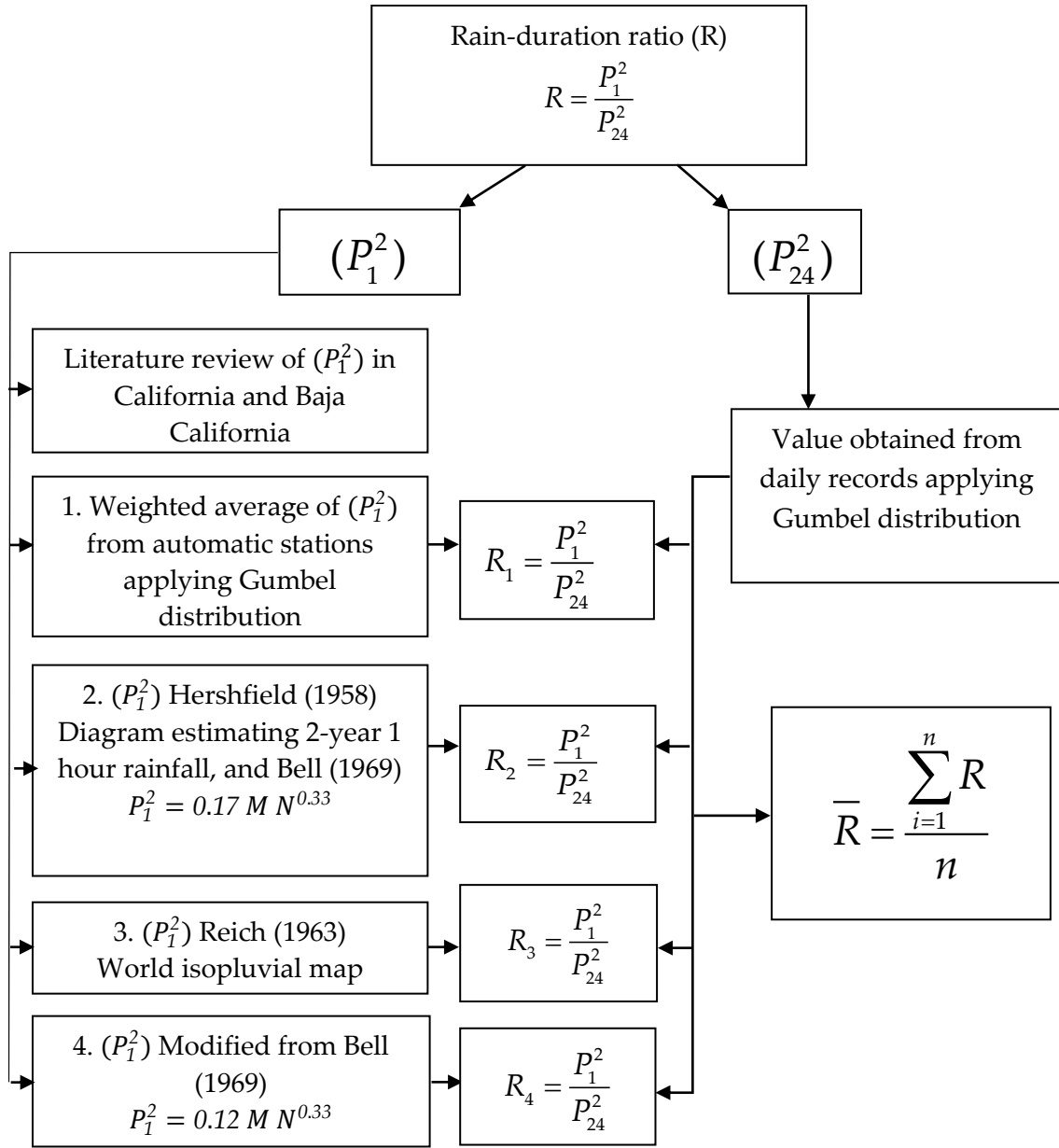


Figura 2. Diagrama de flujo para determinar la relación (R). Donde $\bar{R}$ es la relación promedio y n es el número de (R) calculado para cada (P_1^2) .

Por lo tanto, para cada estación pluviométrica, con registros diarios de 60 años, existen varios cálculos relación IDF para mejorar la comparación entre sí, y tener más opciones para elegir los mejores resultados, desarrollados a través de los siguientes métodos:

- A. Relación IDF calculada a partir de registros pluviógrafos utilizando la distribución de Gumbel (ecuación 1); esto incluyó solo tres estaciones (2072, 2036 y 2035).

- B. Relación IDF calculado a partir de registros diarios de diez estaciones, utilizando la ecuación de Chen, donde (R) se calculó a través del promedio ponderado (P_1^2) de las estaciones automáticas, aplicando la distribución de Gumbel.
- C. Relación IDF obtenido por el mapa de isoyetas de la (SCT) solo para las estaciones 2072, 2036, 2035, 2001, 2005 y 2045.
- D. Relación IDF calculada a partir de registros diarios de diez estaciones, utilizando la ecuación de Chen, donde (R) se calculó a través de (P_1^2) usando la modificación de la ecuación de Bell (Bell, 1969).
- E. Relación IDF calculada a partir de registros diarios de diez estaciones, utilizando la ecuación de Chen, donde (R) se calculó mediante (P_1^2) usando el mapa isopluvial mundial de Reich (Reich, 1963).
- F. Relación IDF calculada a partir de registros diarios de diez estaciones, utilizando la ecuación de Chen, donde (R) se calculó a través de (P_1^2) usando Hershfield y Bell (Bell, 1969; Hershfield & Wilson, 1958). En ambos métodos se obtienen los mismos resultados de (P_1^2).
- G. Relación IDF obtenida por Norma del Estado de Baja California solo para la estación 2072.
- H. Relación IDF calculada por el promedio de IDF calculadas en las opciones A, B, C, D, E, F y G.
- I. Relación IDF calculada a partir de registros diarios de diez estaciones utilizando la ecuación de Chen, donde (R) es la relación propuesta calculada por la ecuación 8

Dados estos cálculos, se realizaron dos comparaciones. La primera comparación incluyó los métodos A, B, C, E, F y G. Aunque hay una (R) propuesta, a partir de la ecuación 8, se evaluó la relación IDF con todas las relaciones (R), calculadas a través de los diferentes métodos, para identificar los mejores resultados. Los resultados de la relación IDF varían de los métodos A a G; así, se hizo un promedio para tener la opción (H).

La segunda comparación incluyó los métodos A, C, H e I. La comparación se apoya utilizando datos pluviográficos, las IDF reportadas por el (SCT), las IDF con la relación R propuesta y el promedio de la relación IDF probada con los diferentes métodos. En

adelante, esta es la comparación que define la selección del mejor método de la relación IDF para cada estación. A partir de esta comparación, se decidió seleccionar aquellos métodos que proporcionen resultados equivalentes del cálculo IDF entre sí. El método seleccionado y los resultados de la relación de la IDF en la ciudad de Ensenada se discuten en la parte de resultados y discusión.

II.3 Resultados y discusiones

Los eventos de máxima precipitación de cada año se identificaron a partir de los registros de las cuatro estaciones automáticas, siguiendo el método descrito anteriormente. La Tabla 2 presenta los eventos extraídos de la estación Emilio López Zamora (2072): un ejemplo representativo para determinar las curvas IDF debido a la mayor cantidad de datos pluviográficos (20 años) y su ubicación en la zona urbana de Ensenada. Se ve claramente que la mayor profundidad de precipitación de cada evento ocurre durante los primeros 10 y 20 minutos. Estas observaciones confirman los cortos períodos de eventos de lluvia, como una característica de la lluvia local. Además, para analizar el aumento o disminución de eventos extremos a lo largo de los años, se ha trazado una tendencia de lluvias. La tendencia lineal de las series de tiempo se analizó a partir de datos de la estación que tienen registro pluviógrafo y precipitación diaria. La Figura 3 muestra la línea de tendencia para los datos de la estación (2072). La Figura 3 (a) muestra la tendencia de la lámina de agua diaria de lluvia de cada año, y la Figura 3 (b) presenta la tendencia de los eventos extremos de lluvia de los años en diferentes duraciones o períodos, no necesariamente los más intensos (registro de pluviógrafos). La serie presenta una tendencia positiva. En ambos casos, la tendencia indica que la profundidad máxima de lluvia diaria y los eventos de precipitación pico han aumentado con los años y continuarán ocurriendo en el futuro. Estos resultados también se pueden complementar con un análisis detallado de la serie de precipitaciones para el Estado de Baja California (López-Lambrano *et al.*, 2018).

Tabla 2. Eventos de precipitación extrema para la estación ELZ (2072).

Peak rainfall events (mm) at different durations (ELZ -2072)						
Years	10 min	20 min	30 min	60 min	120 min	180 min
1999	3.30	5.08	5.58	5.58	7.35	9.12
2000	6.35	8.13	8.12	10.40	14.23	20.60
2001	5.59	6.85	8.12	9.14	10.90	13.40
2002	3.05	4.32	4.57	7.11	10.16	11.70
2003	2.54	3.55	5.09	6.60	11.18	12.40
2004	4.83	7.11	9.14	10.90	18.79	24.60
2005	3.56	5.34	6.61	11.70	13.72	13.70
2006	4.32	7.37	9.14	12.40	18.29	18.30
2007	4.32	8.13	12.19	18.03	24.37	35.30
2008	3.56	6.35	6.60	11.40	18.27	21.60
2009	4.83	6.86	9.14	11.40	17.00	18.80
2010	6.86	8.89	9.65	12.20	19.56	23.40
2011	3.56	5.33	7.11	11.40	16.00	20.10
2012	4.83	5.34	6.86	9.15	16.52	16.50
2013	3.05	6.10	6.61	7.61	12.95	19.60
2014	6.60	10.92	12.19	12.70	13.19	13.40
2015	6.80	9.91	12.45	13.20	21.34	22.90
2016	4.32	7.62	8.38	9.90	14.21	17.80
2017	5.84	8.89	9.14	13.00	20.07	22.40
2018	3.00	4.57	6.00	7.40	9.89	13.20
2019	4.40	5.60	7.40	14.60	17.40	27.60

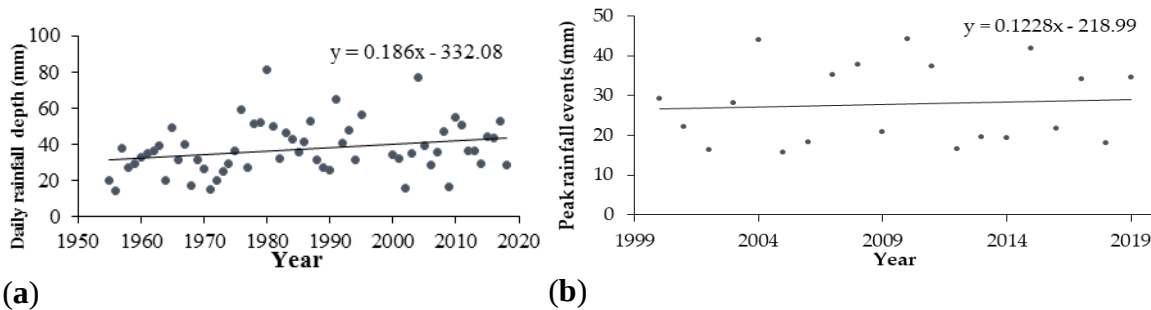


Figura 3. Análisis de tendencia para la estación 2072 usando datos automaticos y diarios.
a) Precipitación máxima diaria anual. b) Eventos de precipitación anuales extremos.

La relación (R) fue estimada basada en (P_1^2) y siguiendo el proceso mostrado en la figura 2. El resultado de la revision regional de (P_1^2) se muestra en la tabla 3. La revision regional revela que los valores de (P_1^2) para el sur de California al norte de Baja California

se encuentran entre los rangos de 10 y 16.61 mm, indicando que los valores de (P_1^2) para el área de estudio deberían encontrarse en este rango. Por esta razón, la evaluación de diferentes métodos para calcular (P_1^2) y estimar (R) seguido de la comparación de los resultados fue cuidadosamente analizado para determinar la exactitud de la relación (R) . Los resultados de (P_1^2) están en el rango de la revision regional, cuando $(P_1^2)_1$ es calculado por el promedio de los datos pluviográficos y diarios aplicando Gumbel. $(P_1^2)_3$ es calculado usando Reich (Reich, 1963), and $(P_1^2)_4$ es calculado por el ajuste y modificación de Bell (Bell, 1969). Los resultados de la relación $(R_{1...4})$ estimados para cada estación a través de diferentes métodos de (P_1^2) se muestran en la tabla 4. Por lo tanto, a partir de los resultados, se calculó un promedio de R para definir y respaldar la relación (R) propuesta. Los resultados de la relación (R) propuesta se calcularon mediante la ecuación (8), que se muestra en la tabla 5.

La relación (R) calculada para cada estación varió de 0.35 a 0.44; este rango está cerca de la razón (R) de 0.44 para una estación en Tijuana reportada por Campos-Aranda (Campos-Aranda, 2010), lo que indica que ambas ciudades comparten las mismas características de lluvia. Así, una vez determinada la razón (R) , se proyectó la distribución espacial de esta razón en un mapa para el área de estudio (Figura 4). Se puede establecer que en la ciudad de Ensenada el valor promedio de R es alrededor de 0.39 y este valor se propone como razón (R) para el área.

Es de suma importancia resaltar que en ausencia de datos pluviógrafos, la relación (R) calculada se convierte en la clave para desarrollar unas curvas IDF satisfactorias para las estaciones de pluviómetros estándar, aplicando la ecuación de Chen.

Tabla 3. Revisión de literatura de (P_1^2) para California y Baja California.

Location of weather stations	Rain (P_1^2) (mm)	Reference
Sur de California	12.7	Frevert <i>et al.</i> , 1963
Sur de California	12.7	Reich, 1963
Ensenada B.C	14	Reich, 1963
San Diego	14.22	Dedrick <i>et al.</i> , 1976 Hamilton <i>et al.</i> , 2016
San Diego, CA	15.24	NOAA, 2020
San Diego, CA	13.74, ranges (11.48 – 16.61)	NOAA, 2020
Imperial Beach, CA	10.89, ranges (9.09 - 13.20)	NOAA, 2020
San Ysidro, CA	11.27, ranges (9.39 - 13.63)	NOAA, 2020
Norte de Baja California	10	CENAPRED, 2014

Tabla 4. Relación lluvia – duración ($R_{1...4}$), estimados a través de la relación (P_1^2) y (P_{24}^2) . Donde $(P_1^2)_1$ fueron los datos pluviográficos y diarios promediados aplicando Gumbel, $(P_1^2)_2$ calculado usando Hershfield (Hershfield & Wilson, 1957) y Bell (Bell, 1969), $(P_1^2)_3$ calculado usando Reich (Reich, 1963), and $(P_1^2)_4$ calculado por el ajuste y modificación de Bell.

Estación	$(P_1^2)_1$ (mm)	$(P_1^2)_2$ (mm)	$(P_1^2)_3$ (mm)	$(P_1^2)_4$ (mm)	(P_{24}^2) (mm)	R_1	R_2	R_3	R_4
2072	10.56	17.35	14.20	12.29	32.90	0.32	0.53	0.43	0.37
2036	11.00	21.13	13.80	14.92	38.40	0.29	0.55	0.36	0.39
2035	10.96	17.13	14.50	12.09	31.20	0.35	0.55	0.47	0.39
2001	10.20	19.40	13.90	11.62	34.70	0.29	0.56	0.40	0.33
2005	10.20	23.33	13.70	12.86	41.00	0.25	0.57	0.33	0.31
2045	10.20	22.38	14.50	13.02	39.90	0.26	0.56	0.36	0.33
2065	10.20	21.87	14.50	11.05	40.70	0.25	0.54	0.36	0.27
2079	10.20	20.33	14.70	12.96	35.10	0.29	0.58	0.42	0.37
2106	10.20	18.34	14.50	10.80	34.00	0.30	0.54	0.43	0.32
2108	10.20	21.22	14.5	10.16	39.70	0.26	0.53	0.36	0.26

Table 5. Relación lluvia – duración propuestos (R), determinados usando la ecuación 8.

Estaciones pluviales	(R_1) a través usando el promedio del pluviógrafo	(R_2) usando el (P_1^2) Hershfield and Bell	(R_3) de (P_1^2) Reich	(R_4) usando de (P_1^2) modificado de Bell	Relación (R) (equation 8)
2072	0.32	0.53	0.43	0.37	0.41
2036	0.29	0.55	0.36	0.39	0.40
2035	0.35	0.55	0.47	0.39	0.44
2001	0.29	0.56	0.40	0.33	0.40
2005	0.25	0.57	0.33	0.31	0.37
2045	0.26	0.56	0.36	0.33	0.38
2065	0.25	0.54	0.36	0.27	0.35
2079	0.29	0.58	0.42	0.37	0.41
2106	0.30	0.54	0.43	0.32	0.40
2108	0.26	0.53	0.36	0.26	0.35

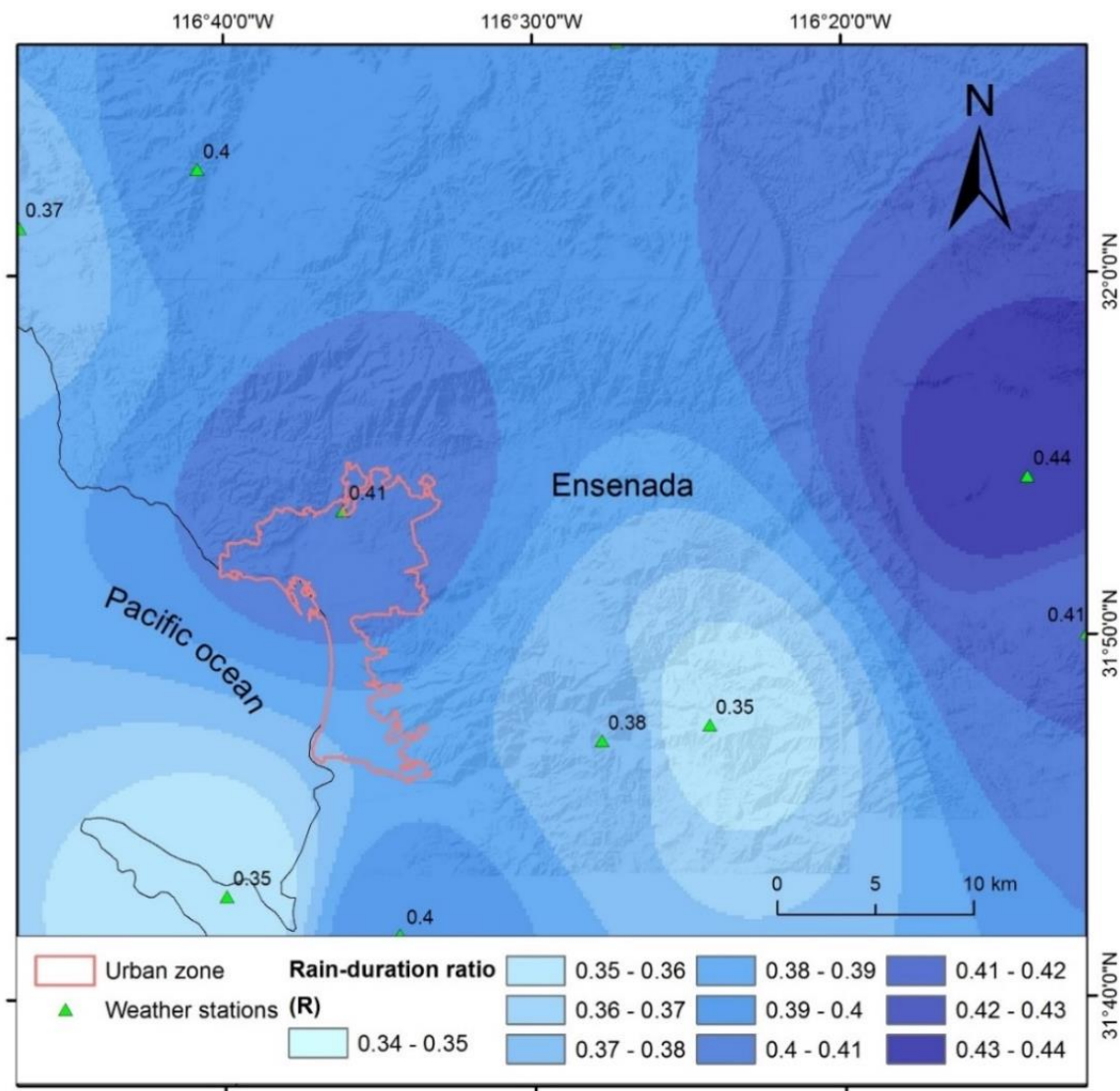


Figura 5. Distribución de la relación lluvia – duración (R) para la ciudad de Ensenada.

La relación IDF se calculó con registros pluviógrafos, aplicando la distribución de Gumbel y, calculada con registros diarios aplicando métodos de Chen a través de diferentes opciones de relación (R). Los diferentes resultados permitieron realizar comparaciones para elegir el método más adecuado para el cálculo de la relación IDF.

La Tabla 6 presenta los resultados de la primera comparación que probó diferentes métodos para calcular la relación IDF. Las Tablas 7, 8 y 9 muestran la comparación establecida que define la selección del mejor método de cálculo de la IDF para cada

estación, apoyado con datos pluviográficos, la IDF reportada por la SCT, la IDF con la relación *R* propuesta y la media. de los cálculos de la IDF probados a través de diferentes métodos.

Las comparaciones de la relación IDF para la estación 2072 mostraron valores similares calculados por los métodos (I) y (H). Chen calcula el método (I) con la relación *R* propuesta, y el método (H) se calcula a partir del promedio de IDF desarrollado por los métodos A, B, C, D, E, F y G descritos anteriormente.

Para las estaciones 2036 y 2035, los resultados de la relación IDF fueron similares por los métodos (C) y (I). El método (C) es informado por las isoyetas de la SCT. También se ha realizado una comparación para las estaciones 2001, 2005 y 2045, que arrojaron resultados equivalentes al aplicar los métodos (C) e (I). Las estaciones 2036 y 2035 son muy importantes para uso agrícola.

Tabla 6. Primera comparación de la relación IDF, estimada a través de diferentes métodos para la estación 2072 para diferentes periodos de retorno.

Periodo de retorno (años)	de Método	IDF (mm/hr) estación 2072				
		10 (min)	20 (min)	30 (min)	60 (min)	120 (min)
10	(A)	38.3	28.1	22.3	14.6	10.5
	(B)	45.2	32.2	25.8	17.2	11.2
	(C)	48.0	38.0	26.0	16.0	13.0
	(D)	52.8	37.8	30.1	19.7	12.5
	(E)	59.6	42.7	33.9	21.8	13.5
	(F)	70.6	50.8	40.1	25.1	14.9
	(G)	99.2	59.0	43.5	25.9	15.4
	Average	59.1	41.2	31.7	20.0	13.0
25	(A)	44.3	32.4	25.6	16.7	12.0
	(B)	53.3	38.0	30.5	20.3	13.2
	(C)	57.0	40.0	31.0	20.0	15.0
	(D)	62.4	44.6	35.5	23.2	14.7
	(E)	70.3	50.4	40.1	25.7	15.9
	(F)	83.4	60.0	47.3	29.7	17.6
	(G)	119.0	70.0	52.0	31.0	18.0
	Average	70.0	47.9	37.4	23.8	15.2
50	(A)	48.7	35.5	28.0	13.1	11.5
	(B)	59.5	42.5	34.0	22.6	14.7
	(C)	64.0	45.0	35.0	22.0	18.0
	(D)	69.6	49.7	39.6	25.9	16.4
	(E)	78.5	56.3	44.7	28.7	17.7
	(F)	93.0	66.9	52.8	33.1	19.7
	(G)	134.7	80.1	59.1	35.1	20.9
	Average	78.3	53.7	41.9	25.8	17.0
100	(A)	53.1	38.7	30.4	19.7	14.2
	(B)	65.7	46.9	37.5	25.0	16.3
	(C)	71.0	50.0	38.0	24.0	20.0
	(D)	76.8	54.9	43.8	28.6	18.1
	(E)	86.6	62.1	49.3	31.7	19.6
	(F)	102.7	73.9	58.3	36.6	21.7
	(G)	150.0	89.2	65.8	39.1	23.3
	Promedio	86.6	59.4	46.2	29.2	19.0

- (A) Estimado de los datos pluviográficos usando Gumbel (ecuación 1).
- (B) Estimado de la ecuación de Chen usando R_1 de la tabla 5.
- (C) Obtenido del mapa de isoyetas del SCT.
- (D) Estimado de la ecuación de Chen usando R_4 de la tabla 5 (ecuación 7).
- (E) Estimado de la ecuación de Chen usando R_3 de la tabla 5 (Reich, 1963).
- (F) Estimado de la ecuación de Chen usando R_2 de la tabla 5 (ecuación 6)
- (G) Obtenido de la Norma del Estado de Baja California.

Las tablas 7 a 9 muestran que los resultados del método (I) están más cerca de los métodos (C) y (H) que del método (A). Por tanto, considerando la posición de los resultados de (I) en el rango de valores de todos los métodos, podría sugerirse como el más adecuado para calcular las curvas IDF. Se eligió el método (I) para calcular la IDF para las 10 estaciones pluviométricas como la mejor opción de los métodos probados. La Tabla 10 muestra la relación IDF para las 10 estaciones calculada por el método Chen a través de la relación (R) propuesta.

Tabla 7. Comparación de la relación IDF estimada a través de diferentes métodos para la estación 2072 para diferentes periodos de retorno.

Periodo de retorno (años)	de IDF (mm/hr) Estación 2072					
	Método	10 (min)	20 (min)	30 (min)	60 (min)	120 (min)
10	(A)	38.3	28.1	22.3	14.6	10.5
	(C)	48.0	38.0	26.0	16.0	13.0
	(H)	59.1	41.2	31.7	20.0	13.0
	(I)	57.7	41.4	32.9	21.2	13.2
25	(A)	44.3	32.4	25.6	16.7	12.0
	(C)	57.0	40.0	31.0	20.0	15.0
	(H)	70.0	47.9	37.4	23.8	15.2
	(I)	68.1	48.8	38.8	25.06	15.59
50	(A)	48.7	35.5	28.0	13.1	11.5
	(C)	64.0	45.0	35.0	22.0	18.0
	(H)	78.3	53.7	41.9	25.8	17.0
	(I)	76.0	54.5	43.3	28.0	17.4
100	(A)	53.1	38.7	30.4	19.7	14.2
	(C)	71.0	50.0	38.0	24.0	20.0
	(H)	86.6	59.4	46.2	29.2	19.0
	(I)	83.9	60.1	47.8	30.9	19.2

(A) Estimado de los datos pluviográficos usando Gumbel (ecuación 1).

(C) Estimado del mapa de isoyetas del SCT.

(H) Estimado del promedio de las IDF desarrollada por los métodos A, B, C, D, E, F, y G.

(I) Estimado de la ecuación de Chen usando la relación (R) propuesta (ecuación 8).

Table 8. Comparación de la relación IDF estimadas a través de diferentes métodos para la estación 2036 para diferentes periodos de retorno.

Periodos de retorno (años)	IDF (mm/hr) Station 2036					
	Method	10 (min)	20 (min)	30 (min)	60 (min)	120 (min)
10	(A)	32.9	24.9	20.8	14.6	10.4
	(C)	74.0	49.0	34.0	24.0	19.0
	(H)	67.7	48.0	37.5	24.8	16.4
	(I)	76.7	54.9	43.7	28.3	17.7
25	(A)	37.5	28.5	23.8	16.7	11.9
	(C)	93.0	62.0	43.0	30.0	24.0
	(H)	82.9	58.8	45.9	30.3	20.1
	(I)	93.9	67.2	53.5	34.6	21.6
50	(A)	41.0	31.1	26.0	18.2	13.1
	(C)	107.0	71.0	49.0	35.0	28.0
	(H)	94.3	66.9	52.1	34.5	22.9
	(I)	107.0	76.6	60.9	39.5	24.7
100	(A)	44.4	33.7	28.2	19.7	14.2
	(C)	121.0	81.0	55.0	40.0	31.0
	(H)	105.7	75.0	58.3	38.8	25.5
	(I)	120.1	86.0	68.4	44.3	27.7

(A) Estimados de los datos pluviográficos usando Gumbel (ecuación 1).

(C) Obtenida del mapa de isoyetas del SCT.

(H) Estimado del promedio de las IDF desarrolladas por los métodos A, B, C, D, E, y F.

(I) Estimado de la ecuación de Chen usando la relación (R) propuesta (ecuación 8).

Tabla 9. Comparación de la relación IDF estimada a través de diferentes métodos para la estación 2035 para diferentes periodos de retorno.

Periodo de retorno (años)	Método	IDF (mm/hr) Estación 2035				
		10 (min)	20 (min)	30 (min)	60 (min)	120 (min)
10	(A)	57.5	40.4	33.0	21.5	11.9
	(C)	60.0	40.0	30.0	23.0	16.0
	(H)	61.6	43.5	34.4	22.9	14.2
	(I)	63.6	45.6	36.2	23.2	14.2
25	(A)	74.5	52.6	42.8	27.8	15.1
	(C)	80.0	60.0	50.0	29.0	21.0
	(H)	76.1	54.9	44.1	27.8	17.3
	(I)	76.8	55.1	43.7	28.0	17.2
50	(A)	87.1	61.7	50.0	32.5	17.5
	(C)	89.8	59.9	45.9	32.0	23.6
	(H)	86.4	61.1	48.4	31.5	19.6
	(I)	86.8	62.3	49.4	31.7	19.4
100	(A)	99.6	70.7	57.2	37.1	19.8
	(C)	110.4	72.7	52.5	37.3	27.9
	(H)	99.4	70.1	55.0	36.1	22.7
	(I)	96.9	69.5	55.1	35.3	21.7

(A) Estimado de datos pluviográficos usando Gumbel (ecuación 1).

(C) Obtenido del mapa de isoyetas del SCT.

(H) Estimado del promedio de las IDF desarrolladas por los métodos A, B, C, D, E, y F.

(I) Estimado de la ecuación de Chen usando la relación (*R*) propuesta (ecuación 8).

Table 10. Relación IDF estimada para cada estación pluviométrica mediante el método Chen con la relación (*R*) propuesta en este estudio

Periodo de retorno (años)	de Estaciones	Intensidad Duración Frecuencia (mm/h) para diferentes duraciones				
		10 (min)	20 (min)	30 (min)	60 (min)	120 (min)
10	2072	57.71	41.35	32.86	21.22	13.21
	2036	76.70	54.92	43.68	28.30	17.69
	2035	63.58	45.63	36.19	23.17	14.22
	2001	68.68	49.18	39.11	25.34	15.84
	2005	76.61	54.76	43.66	28.55	18.12
	2045	66.59	47.62	37.93	24.73	15.61
	2065	68.58	48.97	39.11	25.76	16.51
	2079	71.32	51.10	40.61	26.23	16.32
	2106	61.60	44.11	35.08	22.73	14.21
	2108	74.84	53.44	42.68	28.11	18.02
25	2072	68.15	48.83	38.80	25.06	15.59
	2036	93.96	67.28	53.51	34.66	21.67
	2035	76.82	55.14	43.73	28.00	17.18
	2001	83.95	60.12	47.81	30.97	19.36
	2005	94.00	67.19	53.56	35.03	22.23
	2045	79.00	56.51	45.01	29.34	18.53
	2065	83.28	59.47	47.50	31.28	20.05
	2079	87.28	62.54	49.70	32.10	19.97
	2106	73.74	52.81	41.99	27.21	17.01
	2108	93.09	66.48	53.09	34.97	22.42
50	2072	76.04	54.48	43.30	27.96	17.40
	2036	107.01	76.63	60.94	39.48	24.68
	2035	86.85	62.33	49.43	31.65	19.43
	2001	95.50	68.39	54.38	35.23	22.03
	2005	107.15	76.59	61.06	39.94	25.34
	2045	88.39	63.22	50.36	32.83	20.73
	2065	94.41	67.41	53.84	35.46	22.73
	2079	99.36	71.19	56.57	36.54	22.74
	2106	82.92	59.38	47.22	30.59	19.13
	2108	106.90	76.34	60.97	40.15	25.74
100	2072	83.93	60.14	47.79	30.87	19.21
	2036	120.07	85.98	68.38	44.30	27.70
	2035	96.87	69.52	55.13	35.30	21.67
	2001	107.05	76.66	60.96	39.49	24.69
	2005	120.30	85.99	68.55	44.84	28.45
	2045	97.79	69.94	55.71	36.32	22.93
	2065	105.53	75.35	60.18	39.63	25.41
	2079	111.43	79.84	63.45	40.98	25.50

2106	92.11	65.96	52.45	33.98	21.25
2108	120.71	86.20	68.84	45.34	29.07

Para el cálculo de la relación IDF a partir de registros diarios, el método de Chen ha sido recomendado principalmente por otros autores (Campos-Aranda, 2010; Domínguez *et al.*, 2018) para ser utilizado en México. No obstante, considerando que la lluvia cambia en el espacio y el tiempo, el uso de este método ha sido validado mediante el cálculo preciso de la relación (R), donde dependía de la (P_1^2) . Los resultados de (P_1^2) obtenidos por datos pluviográficos, por Reich y los ajustados por la ecuación de Bell, son similares. Sin embargo, el método ampliamente utilizado es el de Hershfield que proporciona los valores más altos. Por tanto, se consideró calcular (R) con cada valor de (P_1^2) de cada método para hacer un promedio de todos los (R) estimados. Este promedio se propuso como la relación (R) de la zona que puede ser segura para calcular las curvas IDF en otras estaciones de la zona.

Las diferencias entre los resultados de la relación IDF por los métodos comparados están relacionadas con la longitud de la serie de tiempo. Para la estación 2072 que tiene la serie de tiempo más grande para registros pluviógrafos y diarios, se observó que la relación de la IDF con los datos del pluviógrafo dio los valores más bajos que los otros métodos, y que son similares a la IDF del isohyetal de la SCT. La serie de tiempo de los datos del pluviógrafo tiene solo 20 años y los datos de SCT no incluyen las últimas dos décadas; por tanto, sus resultados dan incertidumbres.

Se comprobó que la calidad y cantidad de datos son muy importantes para el análisis de lluvia. El cálculo de las curvas IDF mediante cualquier método debe dar resultados precisos utilizando datos pluviográficos si hay suficientes datos que se ajustan a cualquier distribución estadística.

II.4 Conclusiones

El procedimiento y los métodos para desarrollar la relación de las IDF en Ensenada fueron cuidadosamente probados haciendo uso efectivo de los datos de lluvia disponibles, que incluyeron registros pluviógrafos y diarios que permitieron alcanzar los objetivos de la investigación.

En ausencia de suficientes datos pluviógrafos en este estudio, la relación IDF se llevó a cabo con éxito utilizando la combinación de los métodos de Chen, a través del promedio (R) calculado a partir del valor promedio de la precipitación de una hora y el período de retorno de dos años. Los valores obtenidos se compararon con los valores de algunas ciudades de California y Baja California, con un rango entre 10 y 16.61 mm, y los valores de la razón (R) en un rango entre 0.35 y 0.44; este rango está cerca de la relación (R) de 0.44 para una estación en Tijuana, una ciudad a 100 km de Ensenada. Los valores aquí encontrados corresponden a las características de precipitación de la zona; por lo tanto, el método utilizado en este estudio se puede replicar en otras zonas semiáridas con las mismas características de lluvia.

El método de Chen es aplicable a cualquier zona si la relación (R) está bien definida. Este valor fue revisado cuidadosamente en la región y probado cuidadosamente con pluviógrafo actualizado y datos diarios. Por lo tanto, se propone la relación (R) calculada para desarrollar curvas IDF en ausencia de datos pluviógrafos.

Luego de analizar los resultados de la relación IDF para la estación 2072, se observó que la relación IDF publicada por la Norma del Estado de Baja California presenta los valores más altos de todos los métodos. Aunque también son seguros para el diseño, implican el mayor costo de construcción que podría minimizarse considerando los nuevos resultados. La revisión del documento indica que las relaciones de las IDF se desarrollaron con datos hasta 2011. Por lo tanto, se sugiere que estos resultados de la relación de las IDF se incorporen en la Norma del Estado de Baja California como la actualización de recurrencia que requiere por recomendación.

Este estudio de investigación es el punto de partida para otros estudios que implican el cálculo del caudal máximo y la evaluación de estructuras hidráulicas como insumo para ayudar a mejorar la resiliencia ante inundaciones en la ciudad de Ensenada.

II.5 Referencias

- Arnell, V. (1978). Analysis of rainfall data for use in design of storm sewer systems. *International Conference on Urban Storm Drainage*, 1–15.
- Bell, F. C. (1969). Generalized Rainfall-Duration-Frequency Relationships. *Journal of the Hydraulics Division, HY 1*, 311–327.
- Bell, F. . (1969). Generalized Rainfall - Duration - Frequency Relationships. *Journal of the Hydraulics Division*, 95(1), 311–328.
- Campos-Aranda, D.F. (2010). Intensidades máximas de lluvia para diseño hidrológico urbano en la República Mexicana. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 11(2), 179–188.
- Campos-Aranda, Daniel Francisco. (2012). Relación y estimación de predicciones de lluvia horaria-diaria en dos zonas geográficas de México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, III(2), 141–152.
- Chen, C. (1983). Rainfall intensity-duration-frequency formulas. *J. Hydraul. Eng.*, 109, 1603–1621.
- Courty, L. G., Wilby, R. L., Hillier, J. K., & Slater, L. J. (2019). Intensity-duration-frequency curves at the global scale. *Environmental Research Letters*, 14, 1–11.
- Cruz Aguirre, R. U. (2018, September 28). Además de “Rosa”, ocho huracanes más han pasado a menos de 200 km de Ensenada. TODO@CICESE - Comunicamos Ciencia. <https://todos.cicese.mx/sitio/noticia.php?n=1215#.XdhI15NKjIV>
- de Paola, F., Giugni, M., Topa, M. E., & Bucchignani, E. (2014). Intensity-Duration-Frequency (IDF) rainfall curves, for data series and climate projection in African cities. *Springer*, 3, 1–18. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-3-133>
- Dedrick, C. T., Brown Jr, E. G., & Robie, R. B. (1976). *Rainfall Analysis for Drainage Desig.* Department of Water Resources.
- DeGaetano, A. T., & Castellano, C. M. (2017). Future projections of extreme precipitation intensity-duration-frequency curves for climate adaptation planning in New York State. *Climate Services*, 5, 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2017.03.003>
- Domínguez, R., Carrizosa, E., Fuentes, G. E., Arganis, M. L., Osnaya, J., & Galván-Torres, A. E. (2018). Análisis regional para estimar precipitaciones de diseño en la república mexicana. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, IX(1), 5–29. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-01-01>

- Frevert, R., Schwab, G., Edminster, T., & Barnes, K. (1963). *Soil and Water Conservation Engineering*. John Wiley & Sons Ltd.
- Gericke, O. J., & Du Plessis, J. A. (2012). Evaluation of the standard design flood method in selected basins in South Africa. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 54(2), 2–14.
- Groisman, P. Y., Knight, R. W., & Karl, T. R. (2012). Changes in intense precipitation over the Central United States. *Journal of Hydrometeorology*, 13, 47–66. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-039.1>
- Hamilton, K. A., Ahmed, W., Palmer, A., Sidhu, J. P. S., Hodggers, L., Toze, S., & Haas, C. N. (2016). Public health implications of Acanthamoeba and multiple potential opportunistic pathogens in roof-harvested rainwater tanks. *Environmental Research*, 150, 320–327. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.06.017>
- Hersfield, D. M., & Wilson, W. T. (1957). Generalizing of Rainfall-Intensity-Frequency Data. *AIHS. Gen. Ass. Toronto 1957*, 1, 499–506.
- Hershfield, D. M., & Wilson, W. . (1958). Generalizing of Rainfall-Intensity-Frequency Data. *Proceedings, International Association of Scientific Hydrology, General Assembly of Toronto, I*, 499–506.
- Jaklič, A., Šajn, L., Derganc, G., & Peer, P. (2016). Automatic digitization of pluviograph strip charts. *Meteorological Applications*, 23, 57–64. <https://doi.org/10.1002/met.1522>
- Lin, X. (1999). Flash floods in arid and semi-arid zones. In *Technical Documents in Hydrology. No. 23* (UNESCO).
- Llasat, M.-C. (2001). An Objective Classification of Rainfall Events on the Basis of their Convective Features. Application to Rainfall Intensity in the North-East of Spain. *International Journal of Climatology*, 21, 1385–1400.
- López-Lambraño, Alvaro Alberto, Fuente, Carlos, Gonzalez-Sosa, Enrique, Lopez-Ramos, A. (2017). *Pérdidas por intercepción de la vegetación y su efecto en la relación intensidad , duración y frecuencia (IDF) de la lluvia en una cuenca semiárida. VIII*, 37–56. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-04-03>
- Lopez-Lambraño, A. (2001). *Elaboración de las curvas de Intensidad- Duración-Frecuencia de la lluvia en las estaciones pluviográficas aeropuerto los Garzones, Universidad de Córdoba y Turipana, localizadas en la cuenca media del río Sinú. Montería.*. Elaboración de las curvas de Intensidad- Duración-Frecuencia de la lluvia en las estaciones pluviográficas aeropuerto los Garzones, Universidad de Córdoba y Turipana, localizadas en la cuenca media del río Sinú. Montería, 2001, 82 p.

- López-Lambraño, A. A., Fuentes, C., López-Ramos, A. A., Mata-Ramírez, J., & López-Lambraño, M. (2018). Spatial and temporal Hurst exponent variability of rainfall series based on the climatological distribution in a semiarid region in Mexico. *Atmosfera*, 31(3), 199–219. <https://doi.org/10.20937/ATM.2018.31.03.02>
- Lorente, J., Casas, M. C., Rodríguez, R., & Redaño, Á. (2013). Intensidades extremas y precipitación máxima probable. *Fenómenos Meteorológicos Adversos En España*, August, 142–155.
- Maldonado M., J. I., & Martínez G., A. C. (2007). Elaboración curvas IDF estaciones: Cínera Villa Olga y Santa Isabel - Municipio de Cúcuta - Colombia. *Revista Ambiental - Agua, Aire y Suelo*, 2(2), 80–94.
- NOAA. (n.d.). NOAA ATLAS 14 POINT PRECIPITATION FREQUENCY ESTIMATES: KS. Retrieved August 31, 2020, from https://hdsc.nws.noaa.gov/hdsc/pfds/pfds_map_cont.html
- Organización meteorológica mundial. (2010). *Guía del Sistema Mundial de Observación*. Organización meteorológica mundial.
- Pacheco, B. (2015). *Tiene Baja California historial de desastres*.
- Plummer, N., Allsopp, T., & Lopez, J. A. (2003). *Guidelines on Climate Observation Networks and Systems* (P. Llansó (ed.); Issue 1185). World Meteorological Organization.
- Raghunath, H. M. (2006). *Hydrology: principles, analysis, design*.
- Ramírez Cruz, H., Velasco López, O., & Ibáñez Castillo, L. A. (2015). Estimation of Monthly 30 Minute Rainfall Intensity Based on Pluviometric Data. *Hidrociencias*, 151–159.
- Reich, B. M. (1963). Short-Duration Rainfall-Intensity Estimates and Other Design Aids for Regions of Sparse Data. *Journal of Hydrology*, 3(28), 3–28.
- Rodríguez Esteves, J. M. (2007). La conformación de los “desastres” - Construcción social del riesgo y variabilidad climática en Tijuana, B. C. *Frontera Norte*, 19(37), 83–112.
- Secretaría Comunicaciones y Transporte. (2014). *Isoyetas de intensidad-duración-periodo de retorno para la República Mexicana - Baja California*. Secretaría Comunicaciones y Transporte.
- Secretaría de Gobernación y Cenapred. (2014). *Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos* (Violeta Ra).

- Normas técnicas para elaboración de proyectos de alcantarillado pluvial en el estado de Baja California, 138 (2013).
- SEDATU. (2016). *Términos de Referencia para elaborar Atlas de Riesgos*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/135433/TR_AR_231016_Pu_blico.pdf
- Sherif, M., Chowdhury, R., & Shetty, A. (2014). Rainfall and Intensity-Duration-Frequency (IDF) Curves in United Arab Emirates. *World Environmental and Water Resources Congress 2014*, 2316–2325. <https://doi.org/10.1061/9780784413548.231>
- Smith, S. V, Bullock, S. H., Hinojosa-Corona, A., Franco-Vizcaíno, E., Escoto-Rodríguez, M., Kretschmar, T. G., Farfán, L. M., & Salazar-Ceseña, J. M. (2007). Soil erosion and significance for carbon fluxes in a mountainous Mediterranean-climate watershed. *Ecological Applications*, 17(5), 1379–1387. <https://doi.org/10.1890/06-0615.1>
- WHO and UNEP. (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. In *Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://doi.org/10.1017/cbo9781139177245>

Capítulo III. 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

Artículo publicado

Gámez-Balmaceda E., López-Lambrano A. Seingier G. (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. Quehacer Científico en Chiapas. Volumen 14 No 2.

Resumen

Se determinan las intensidades máximas de precipitación para diferentes periodos de retorno a partir de series pluviométricas y pluviográficas. A partir de un modelo hidrológico e hidráulico, se estiman los hidrogramas máximos para 2, 10, 25 y 50 años de periodos de retorno, y posteriormente, se determinan las áreas de inundación en un sector de la ciudad de Ensenada. Los análisis muestran que el periodo de retorno de 25 años es adecuado para la planeación de un sistema de alerta temprana, ya que con las precipitaciones esperadas cada 25 años se esperan inundaciones con una severidad suficiente como para activar un sistema de alerta temprana y empezar acciones de emergencia. La metodología empleada, constituye una herramienta substancial para la toma de decisiones en cuanto a medidas preventivas para reducir los impactos negativos ante eventos extremos en una zona urbana; así mismo se constituye en un eslabón imprescindible en la planeación de un sistema de alerta temprana ante eventos hidrometeorológicos y climáticos. Finalmente los análisis del fenómeno lluvia – escurrimiento son una encomienda prioritaria por parte de la Secretaria de Comunicación y Transporte (SCT) para todo el país.

Abstract

Intensity – Duration - Frequency (IDF) relationships were developed for different return periods using pluviographic and pluviometric time series. From hydrologic and hydraulic models, peak flows were estimated for return periods of 2, 5, 10, 25 and 50 years. Using these parameters, inundation areas were estimated for a particular sector of the city of Ensenada. The analysis suggests that precipitations with return period of 25 years can be adopted as the triggering severity for an Early Warning System since the intensity and magnitude of the precipitations obtained for this period are expected to cause inundations that will require immediate evacuations and other emergency actions to save lives and reduce the total impact. The applied methodology can greatly inform decision- and policy-making regarding affordable measures to reduce the negative impact of floods due to extreme events in urban areas. Additionally, it provides information that is fundamental in the planning and design of early warning systems for climatological and hydrometeorological events. Finally, the analysis of the rain-flow relationship fulfills one the mandates established for local governments across the country by the Federal Communication and Transportation Ministry.

Palabras clave: Modelación hidrológica, Modelación hidráulica, Cambio Climático.

III. 1 Introducción

El cambio climático y el calentamiento global están estrechamente relacionados con los cambios en los patrones del clima, de tal manera que el aumento de la temperatura en la superficie terrestre modifica el comportamiento de las variables climáticas, especialmente la precipitación, lo que contribuye a la frecuencia de eventos extremos, tales como las sequías e inundaciones (Kunkel *et al.*, 2013; Trenberth, 2011). A manera de ejemplo podemos citar las inundaciones producidas por los huracanes Irma, Harvey y María, ocurridos en el continente americano (Perkins *et al.*, 2018) y los eventos en Europa, Asia, África y Oceanía (Gharbaoui & Blocher, 2018; IPCC, 2012; Marchi, *et al.*, 2010; Zhang, *et al.*, 2014). La efectividad de predecir y advertir sobre la presencia de los eventos de extremos es parte del proceso de un Sistema de Alerta Temprana, en el cual debe incluirse la infraestructura básica para el pronóstico de inundaciones (Qamar-uz-Zaman Chaudhry, 2006).

Las inundaciones constituyen la amenaza natural más frecuente a nivel mundial, y los desastres que ocasionan se convierten en situaciones que sobrepasan las capacidades técnicas de las ciudades para atender las emergencias; esta situación impide el desarrollo sustentable de las mismas debido a los efectos negativos al ambiente y el impacto socio económico de la población (ACP-EU, 2018; Gencer, 2017; UNISDR, 2015). En Ensenada, una ciudad ubicada en el noroeste de México, año tras año las inundaciones han impactado de manera negativa en su desarrollo debido a las grandiosas pérdidas económicas y los múltiples damnificados; esto lleva a que sean catalogadas como la amenaza natural con mayor recurrencia en Baja California, así como para el resto del país (Arreguín-Cortés, Felipe, Cervantes-Jaimes, 2017; B.C, 2014; Rodríguez Esteves, 2007; Soares, J. Blanco, R. García, C. Inzunza, E. Rousseau, 2011); sin embargo los estudios relacionados a la evaluación de la amenaza por inundación, en los atlas de riesgos y publicaciones para Ensenada, se enfocan principalmente en la realización de un inventario histórico de las inundaciones ocurridas en una zona en particular, y carecen de un análisis hidrológico e hidráulico riguroso, que permita establecer la gestión de riesgos a partir de la relación entre la precipitación y la amenaza por inundación esperada considerando distintos periodos de retorno. Esta necesidad constituye el punto de partida en este estudio, el cual consiste en

determinar la amenaza por inundación, como un insumo significativo en la planificación de un Sistema de Alerta Temprana.

Los modelos hidrológicos e hidráulicos constituyen la herramienta adecuada para el análisis y estudio de las inundaciones, debido a que permiten comprender el fenómeno lluvia – escurrimiento para la estimación y cuantificación de las áreas afectadas (Hernandez-Uribe Ruben, Barrios-Piña Héctor, 2017; Jin, Liang, Wang, & Tumula, 2015; Larios-Tlali, Torres-Benites, Quevedo-Nolascol, Martínez-Menes, & Salgado-Tránsito, 2015; Nalini & Sreeja, 2016; Vincent, Pearthree, House, & Demsey, 2004). Este estudio comprende ambos análisis.

A partir de la modelación hidrológica, se obtienen los hidrogramas de escurrimiento directo para diferentes periodos de retorno en la subcuenca. La modelación hidráulica permite evaluar el comportamiento de los tirantes hidráulicos en las secciones transversales correspondientes a los canales o cauces que drenan la cuenca y posteriormente generar los mapas de inundaciones.

Cuando en la zona de estudio se cuenta con estaciones hidrométricas, es posible determinar la relación lluvia – caudal; sin embargo, en países como el nuestro, en donde la red de estaciones hidrométricas es insuficiente, es usual que se recurra a la utilización de las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) de la lluvia para la estimación de la intensidad de diseño, y a partir de esta calcular el caudal de escurrimiento superficial por métodos indirectos (Campos-Aranda, 2012; López-Lambrano *et al.*, 2017). Para este trabajo se estimaron las curvas (IDF) empleando datos pluviográficos y pluviométricos correspondientes a la estación Emilio López Zamora, finalmente se determinó la relación lluvia - caudal para las condiciones en que se produce la inundación en el área de estudio.

III.2 Materiales y Métodos

Área de estudio

El área de estudio corresponde a una subcuenca de la zona urbana de la ciudad de Ensenada, la cual está situada entre las latitudes 31°50' y 32°0' Norte y entre las longitudes 116°40' y 116°20' Oeste. La ciudad de Ensenada se caracteriza por ser una zona semiárida, con temperatura media anual aproximada de 16°C y una precipitación promedio anual de aproximadamente 273 mm y que ocurre principalmente entre los meses de noviembre y abril (Smith S. V. *et al.*, 2007). La zona urbana de la ciudad de Ensenada está comprendida por cuatro subcuencas que drenan hacia el Puerto de Ensenada, lugar donde arriban barcos comerciales y turísticos; la importancia comercial, industrial y económica de la ciudad ha ocasionado un incremento de la poblacional en los últimos años; situación que ha generado cambios en el uso del suelo (COPLADE, 2017). Para este estudio, se escogió una de las cuatro subcuencas mencionada anteriormente (Figura 1), por ser la zona con mayor tendencia de crecimiento poblacional y con mayor historial de inundaciones (B.C, 2014) . El área de la subcuenca es de 38.3 km².

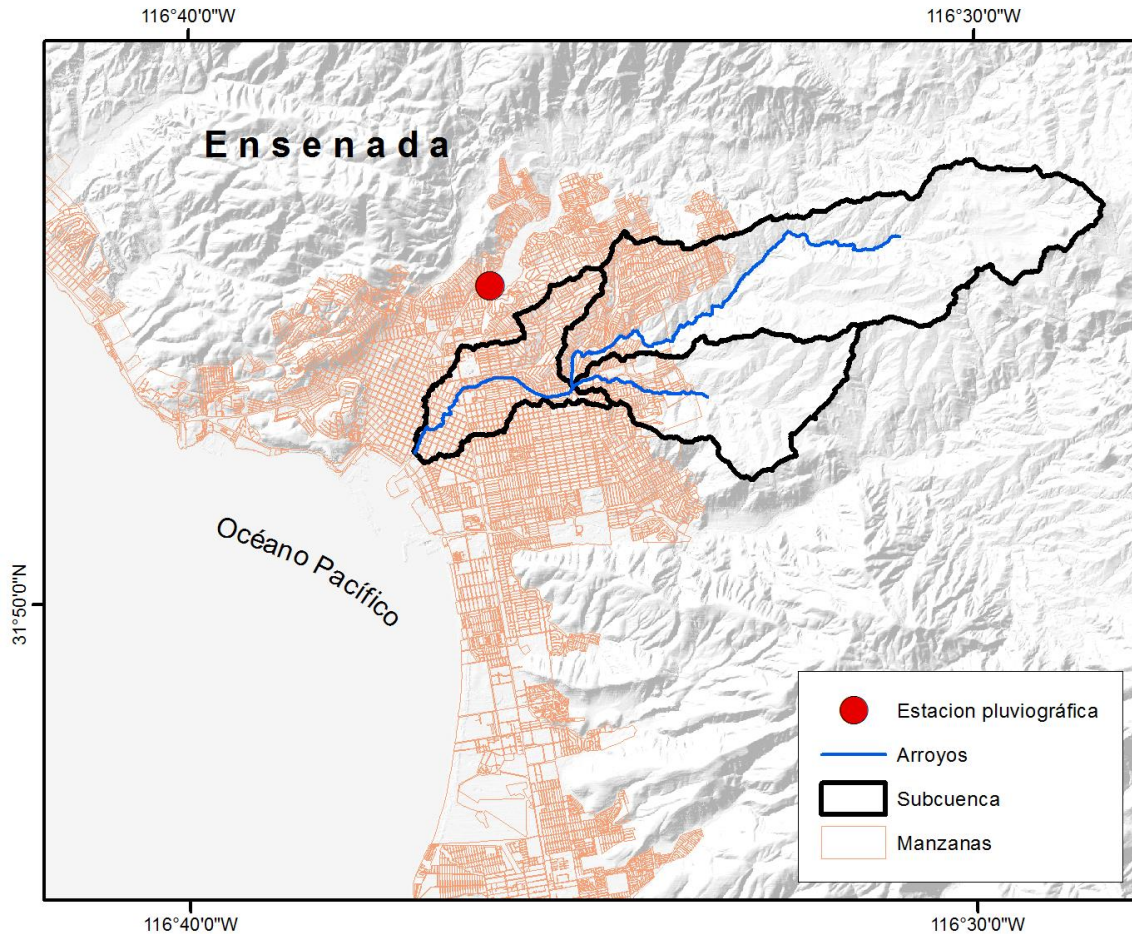


Figura 1. Delimitación del área de estudio.

Datos

El análisis de la lluvia se realizó a partir de los datos pluviográficos y pluviométricos observados en la estación climatológica ubicada en la presa Emilio López Zamora, como se muestra en la figura 1. La serie de tiempo de los datos pluviométricos comprende las lluvias máximas en 24 horas para el periodo de 1969 hasta el año 2018. La estación presenta datos pluviométricos hasta 2011, pero la serie se completó con el registro diario de los datos pluviográficos hasta 2018. La serie de tiempo de los datos pluviográficos, comprende datos registrados cada 10 minutos en una estación automatizada para el periodo de 1999 hasta el año 2018. La topografía del terreno y las características fisiográficas del área de estudio, fueron obtenidas a partir de un modelo digital de elevaciones (MDE), que posteriormente es indispensable para la construcción del modelo hidrológico e hidráulico.

Tabla 1: Descripción de metadatos utilizados en los análisis

Datos	Descripción	Fuente
Precipitación	Datos pluviográficos cada 10 minutos y datos pluviométricos cada 24 horas de la estación de la Presa Emilio López Zamora	CONAGUA, administrados por el laboratorio de meteorología del CICESE http://observatorio.cicese.mx/
MDT	Modelo digital de elevación de alta resolución. LIDAR (5 x 5 m)	INEGI http://www.beta.inegi.org.mx/datos/
Uso de suelo	Datos vectoriales convertidos a GRID, escala 1:250, 000	Inventario Estatal Forestal y de Suelos Baja California 2014. SEMARNAT-CONAFOR., ISBN 978-607-8383-30-6, actualizados de la base de datos de INEGI
Tipo de suelo	Datos vectoriales escala 1:250,000 convertidos a GRID	Edafología, serie II continuo nacional. INEGI http://www.beta.inegi.org.mx/datos/
Topografía del arroyo	Elevaciones de las secciones transversales del arroyo	Modelo de elevación de 0.5 m x 0.5m construido con vuelo de un dron de la UABC.

Este estudio comienza a partir del análisis de las series de tiempo pluviográficas y pluviométricas. Para el caso de las series pluviométricas se analizaron 64 años de registro y para las series pluviográficas se analizaron 20 años de registro. En ambos casos, se trazaron líneas de tendencia con la finalidad de analizar los gradientes de incremento o decremento de la precipitación en la zona de estudio.

Las curvas intensidad – duración – frecuencia (IDF) de la precipitación, constituyen una representación gráfica de la probabilidad de ocurrencia para una intensidad de lluvia con una duración determinada. La intensidad de precipitación estimada, se utiliza comúnmente en el cálculo de los caudales para diferentes periodos de retorno, los cuales son requeridos en el diseño ingenieril de estructuras hidráulicas (Mirhosseini, Srivastava, & Stefanova, 2013). De acuerdo a las recomendaciones de CENAPRED para la evaluación de la amenaza por inundación en zonas urbanas, se deben evaluar los periodos de retorno de 5, 10, 20, 50 y 100 años (CENAPRED, 2011), para este estudio se emplearon los periodos de retorno correspondientes a 2, 5, 10, 25 y 50 años. Para el análisis de amenaza a tomarse en cuenta para la planeación de un sistema de alerta temprana, se escogió el periodo de retorno de 25 años debido a que la precipitación correspondiente a dicho periodo de retorno ocurre

de manera frecuente en la zona, y a pesar de no ser un periodo de retorno alto se generan inundaciones en la zona urbana. Por otro lado, un periodo de retorno de 25 años, es el más usual y recomendado para el diseño en general de estructuras hidráulicas urbanas.

A partir de los valores máximos de precipitación, se utilizó la función de distribución de probabilidades de Gumbel o de valores extremos para el ajuste de los datos. De acuerdo a (López-Lambrano 2001) se expresa con la ecuación 1:

$$F(x) = e^{\left[-e^{\left(-\frac{x-\mu}{\alpha}\right)}\right]}, \quad (-\infty < x < \infty) \text{ Ecuación 1}$$

Donde $0 < \alpha < \infty$ es el parámetro de escala; $-\infty < \mu < \infty$ es el parámetro de posición o valor central, e es la base de los logaritmos neperianos, α , X y μ corresponden a los parámetros de la distribución de los momentos estadísticos de la muestra. La derivada de la distribución proporciona la función de distribución de las probabilidades o función densidad, y los valores de X para diferentes periodos de retorno (T) se determinan mediante ecuación 2:

$$X_T = \mu + \alpha Y_T \text{ Ecuación 2}$$

y

$$Y_T = -\ln \left[\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right] \text{ Ecuación 3}$$

Con las ecuaciones anteriores, se obtiene la precipitación correspondiente al periodo de retorno que sea de interés y posteriormente se convierte a intensidad de precipitación para ser utilizado en la determinación del hidrograma de escurrimiento superficial o caudal de diseño.

Para el análisis y desarrollo de las modelaciones hidrológicas, se empleó como herramienta el modelo hidrológico HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) (U.S. Army Corps of Engineers, 2016). Este modelo utiliza métodos de transformación del fenómeno lluvia-escurrimiento para estimar los hidrogramas de escurrimiento directa generados por las precipitaciones en una cuenca durante un periodo especificado.

El modelo meteorológico considera las precipitaciones, intensidades y escenarios planteados. El modelo topológico y físico (Figura 2) contiene la información correspondiente a las áreas de cada subcuencas, tipo, cobertura y uso de suelo, así como los tiempos de concentración. La información relacionada con las características fisiográficas y geomorfológicas de la cuenca fueron determinadas empleando un modelo digital de elevaciones (MDE), cuya resolución era de 5 metros.



Figura 2. Esquematización del modelo hidrológico de la cuenca en estudio

Para el análisis del fenómeno lluvia-escorrimento se ha tomado el método del número de curva (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS, 1972). En la esquematización del modelo, la subcuenca que corresponde a la zona urbana y al tránsito de los hidrogramas se encuentra nombrada como W60 y el cauce como R30. Las subcuencas aguas arriba de la zona en estudio se representan como W40 y W50; y confluyen en la unión denominada J15, dicha unión corresponde al punto de entrada del caudal a la subcuenca W60 (Figura 2). Para el análisis hidrológico se plantean las siguientes hipótesis de partida: en primer lugar se asume que las zonas de inundación en la zona urbana, se originan producto los escurrimientos superficiales que se generan a partir de las precipitaciones que caen en las subcuencas W40 y W50; es decir, las zonas altas de la cuenca. En la segunda hipótesis se supone que la zona urbana es inundada, debido a las precipitaciones que ocurren en dicha zona, la cual es representada por la subcuenca W60.

El análisis y el desarrollo de las modelaciones hidráulicas, fue a partir del uso del modelo hidráulico HEC-RAS (Hydrologic Engineering Centre-River Analysis System) (U.S. Army Corps of Engineers, 2016), el cual ha sido ampliamente utilizado para determinar el área y los tirantes hidráulicos ante una inundación (Baró-suárez, *et al.*, 2007; CENAPRED, 2014; Larios-Tlali, *et al.*, 2015; Rubén Ernesto Hernández-Uribe *et al.*, 2017; Taylor *et al.*, 2007; Werren *et al.*, 2016). El modelo permite calcular los niveles de la superficie del agua bajo condiciones de flujo permanente o no permanente y gradualmente variado, en un canal natural o artificial, y se fundamenta en la solución de la ecuación de energía, en la cual las pérdidas de energía por fricción se calculan por la ecuación de Manning y las pérdidas locales por contracción y expansión del flujo, se calculan como una fracción del cambio en la cabeza de velocidad entre dos secciones transversales. A partir de la información relacionada con los datos geométricos y del flujo, se realizan los cálculos relacionados al perfil del agua en flujo permanente. En el proceso se realiza una solución unidimensional de la ecuación de energía. En ella las pérdidas de energía son evaluadas por fricción (ecuación de manning), por contracción y expansión. La ecuación de momentum es utilizada en situaciones donde el flujo es rápidamente variado; esto incluye régimen de flujos mixtos.

A partir de un modelo digital de elevaciones (MDE) y ortofotos con una resolución de 0.5 metros, se obtuvieron las características del cauce y de las secciones transversales que fueron analizadas hidráulicamente, para luego obtener los mapas correspondientes a las zonas o áreas susceptibles a inundaciones.

III.3 Resultados y Discusión

El análisis de las tendencias correspondientes a las series de precipitaciones de los datos pluviométricos y pluviográficos (Figuras 3 y 4), presentan gradientes positivos respectivamente, lo que indica que año con año los eventos extremos están ocurriendo y seguirán presentándose en el futuro, mientras las condiciones actuales que marcan el régimen pluviométrico de la zona se mantengan; esto también se puede complementar con los análisis realizados en la zona por Lopez-Lambrano *et. al* (2018), que mediante un análisis fractal de la precipitación, los resultados indican que el comportamiento de la lluvia es antipersistente en el tiempo, es decir que tienen una alta probabilidad de que los eventos

de precipitación aumenten seguido de un decremento, como un hecho notable del cambio climático. Las curvas intensidad – duración y frecuencia de la precipitación (IDF) en la zona obtenidas a partir del análisis de las series mencionadas, se muestran en la figura 5. Se nota que existe una relación inversamente proporcional entre la intensidad y la duración, para los períodos de retorno establecidos.

De igual forma se puede establecer directamente la intensidad máxima probable para cada período de retorno en una determinada duración.

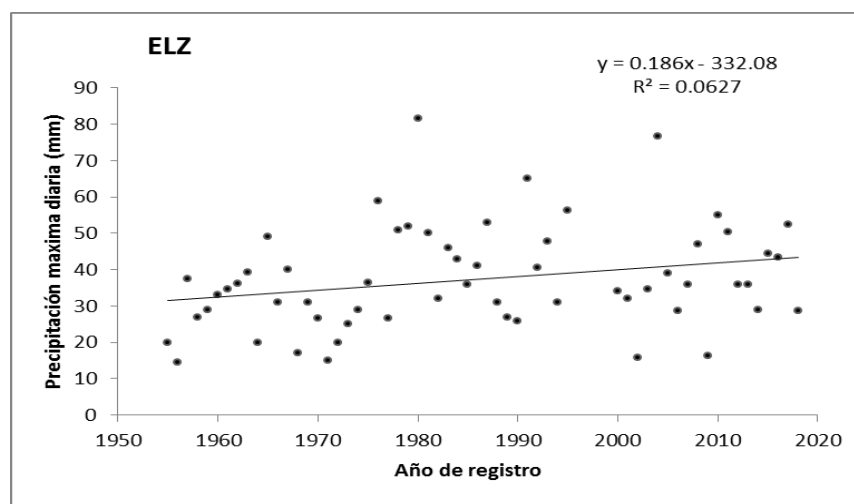


Figura 3: Tendencia de la precipitación máxima en 24 horas por año, medida con pluviómetro en la estación Emilio López Zamora

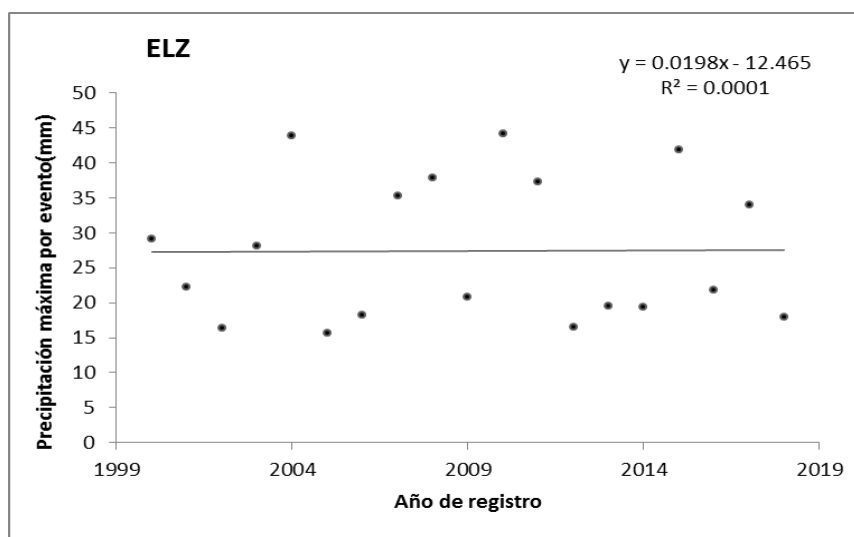


Figura 4: Tendencia de los eventos máximos en la estación Emilio López Zamora.

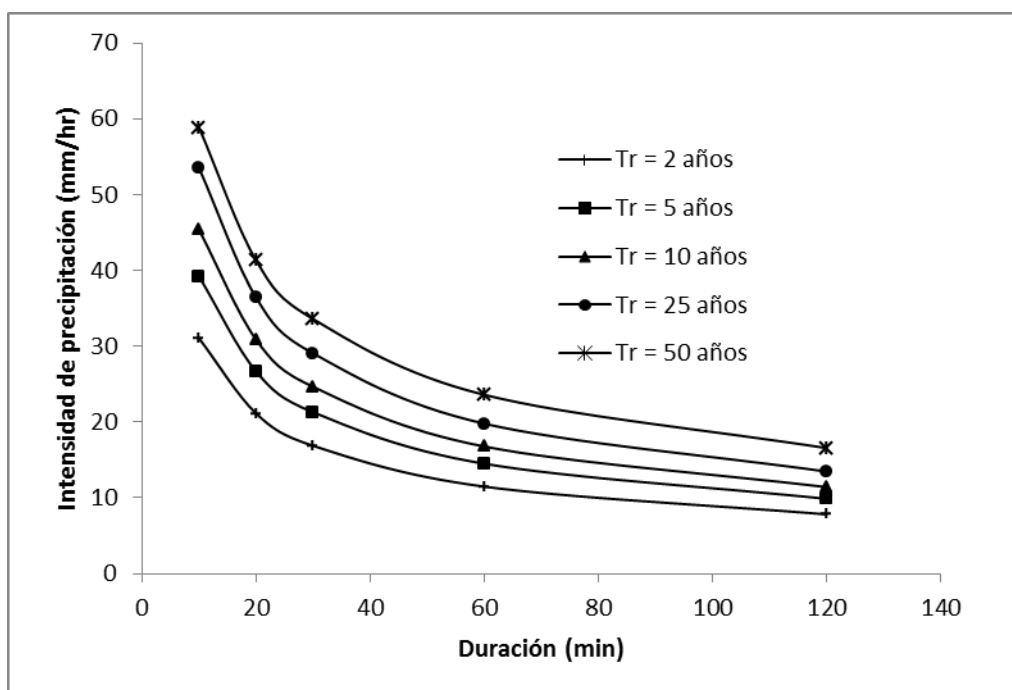


Figura 5: Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia para la Estación Emilio López Zamora.

Con el modelo hidrológico se obtuvieron los caudales máximos para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años. La calibración fue basada en el análisis de sensibilidad de parámetros para determinar cuál de las variables tenía mayor incidencia en la escorrentía superficial. En este caso correspondió al número de curva, el cual depende de las clasificaciones de los suelos y de la vegetación. Su variación tiene un gran efecto sobre el valor del caudal simulado, fundamentalmente respecto al volumen de escorrentía directa y caudal máximo. En la tabla 2 se encuentra reportada, para cada subcuenca la información correspondiente al área, tiempos de concentración (T_c), número de curva (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS, 1972), tiempos de retardo (lag) y la precipitación obtenida de las curvas IDF para cada tiempo de concentración en las subcuencas que conforma el modelo físico de la cuenca.

Tabla 2: Información correspondiente al modelo hidrológico y meteorológico de la cuenca para su modelación en HMS.

Subcuenca	Área (km ²)	Tc (min)	CN	Lag min	Lluvia (mm) Tr 2	Lluvia (mm) Tr 5	Lluvia (mm) Tr 10	Lluvia (mm) Tr 25	Lluvia (mm) Tr 50
W40	23.01	105	80	63	14.63	18.47	21.37	25.21	28.12
W50	9.32	40	81	24	9.93	12.54	14.51	17.12	19.09
W60	5.98	95	93	57	14.08	17.77	20.56	24.26	27.05

En la tabla 3, se presentan los caudales máximos obtenidos para cada subcuenca, así como para el tránsito en los arroyos de la zona de estudio y el punto considerado como la salida de la cuenca. La relación lluvia - caudal para cada periodo de retorno en las subcuencas se obtiene de las tablas 2 y 3. Por ejemplo, cuando se presenta una lluvia de 24.26 milímetro en un tiempo igual a 95 minutos se produce un caudal de 11.3 m³/s correspondiente a un periodo de retorno de 25 años.

Tabla 3: Caudales máximos para distintos periodos de retorno en las subcuencas y elementos que representan el modelo hidrológico en HMS.

Subcuencas y arroyos	Q (Tr 2) m ³ /s	Q (Tr 5) m ³ /s	Q (Tr 10) m ³ /s	Q (Tr 25) m ³ /s	Q (Tr 50) m ³ /s
W40	0.2	1.9	4.2	8.2	12
W50	0	0	0.1	0.3	0.6
W60	4	6.4	8.4	11.3	13.6
Unión (J15)	0.2	1.9	4.2	8.5	12.5
Arroyo (R30)	0.3	1.9	4.2	8.4	12.3
Punto de salida	4	6.4	10.6	17.5	23.7

Con el modelo hidráulico se obtuvieron los tirantes del agua para diferentes periodos de retorno. Para los caudales correspondientes a los periodos de retorno de 2 y 5 años reportados en la tabla 3, no se presentaron desbordamientos en las bancas correspondientes a las secciones transversales del arroyo (R30); sin embargo, al considerar

el caudal obtenido para los periodos de retorno de 10 años, 25 años y 50 años se presentaron desbordamientos en algunas secciones transversales del arroyo. Como resultado para la primera hipótesis; es decir, la inundación en la zona urbana de Ensenada es debido a los escurrimientos originados por las precipitaciones en las cuencas aguas arriba, en este caso se debe tomar en cuenta que cuando ocurra una lluvia con una magnitud de 25.21 milímetros en un tiempo igual a 105 minutos, en la subcuenca W40 y 17.12 milímetros para un tiempo igual a 40 minutos en la subcuenca W50 se genera un caudal por ambas subcuencas de $8.5 \text{ m}^3/\text{s}$ para un periodo de retorno de 25 años, el tirante hidráulico en una de las secciones transversales del arroyo se aprecia en la figura 6.a. Para la segunda hipótesis, si se considera que solo llueve en la subcuenca W60, empleando un periodo de retorno de 25 años también se genera inundación debido a los escurrimientos producidos por la lluvia igual a 24.6 mm, el tirante hidráulico en una de las secciones del arroyo se aprecia en la figura 6b. Cuando se emplea un periodo de retorno mayor, como el de 50 años, la inundación aumenta en área y altura.

Las figuras 7.a y 7.b muestran el área de inundación en la zona urbana para los periodos de retorno de 25 y 50 años respectivamente, considerando la primera hipótesis. Las figuras 8.a y 8.b muestran el área de inundación en la zona urbana considerando la segunda hipótesis para los periodos de retorno 25 y 50 años respectivamente. Para los cuatro escenarios planteados y analizados se producen inundaciones. Las áreas afectadas se encuentran ubicadas entre las calles Oaxaca, Mexicali, Luis Calzada, Constituyentes de 1917, 5 de Febrero, Nueva Rosita y 11; todas pertenecientes al casco urbano de la ciudad de Ensenada. También se puede notar que la mayoría de las viviendas que resultan afectadas por la inundación, se encuentran ubicadas entre las calles Mexicali y Oaxaca.

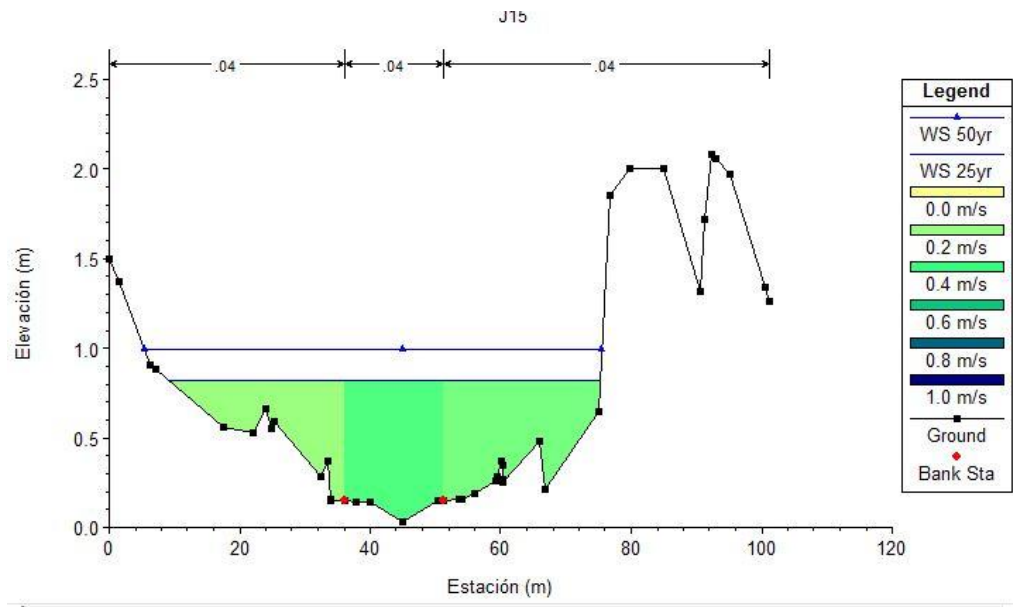


Figura 6a: Tirantes hidráulicos para la hipótesis 1. En donde se observa un valor de 0.8 m para un periodo de retorno de 25 años (WS 25yr) y 1.0 m para un periodo de retorno de 50 años (WS 50 yr).

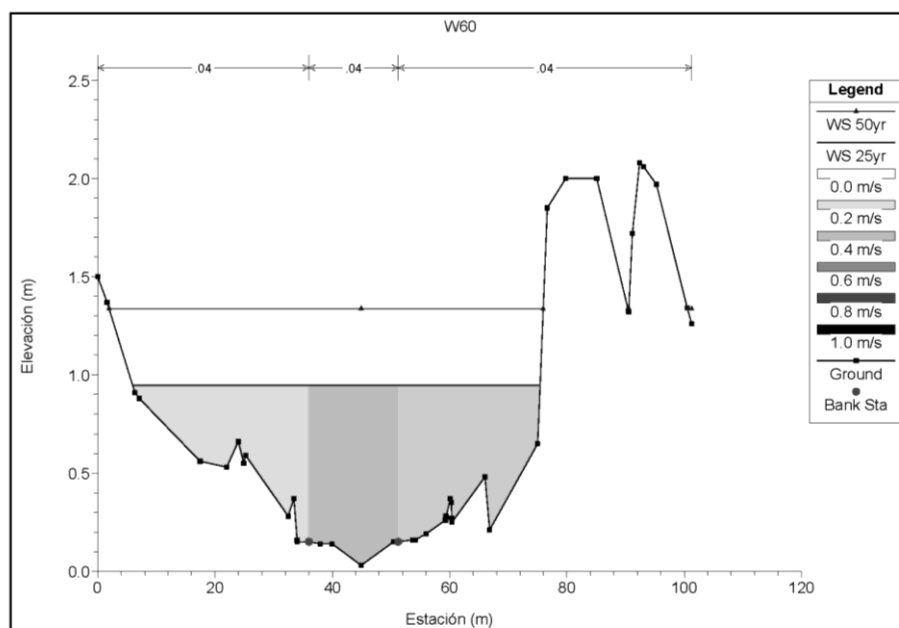


Figura 6b: Tirantes hidráulicos para la hipótesis 2. En donde se observa un valor 0.95 m para un periodo de retorno de 25 años (WS 25yr) y 1.35 m para un periodo de retorno de 50 años (WS 50 yr). El color gris oscuro indica la altura del agua en el ancho del canal.

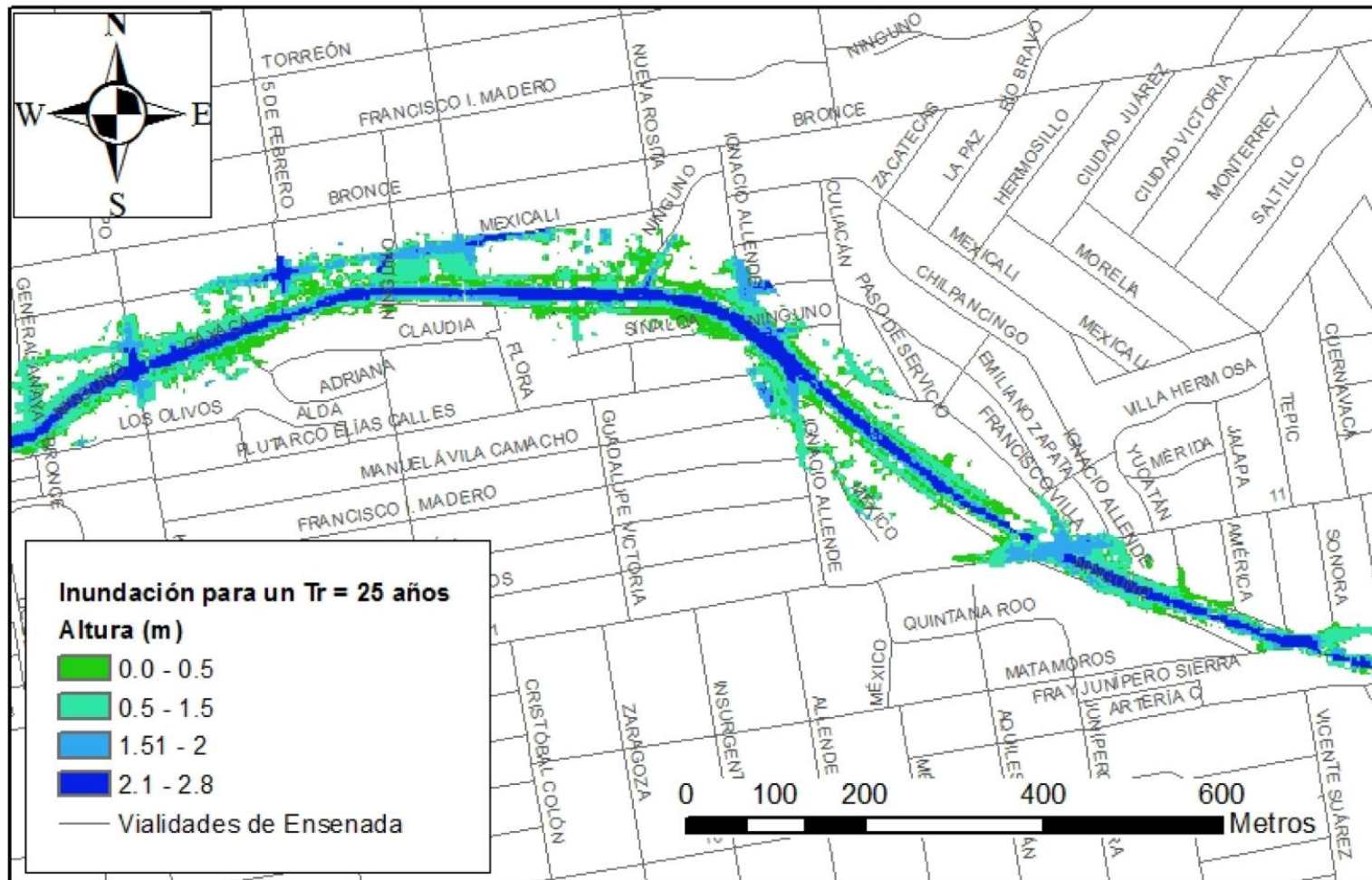


Figura 7a: Área de inundación correspondiente a un periodo de retorno (T_r) de 25 años, considerando la hipótesis 1.

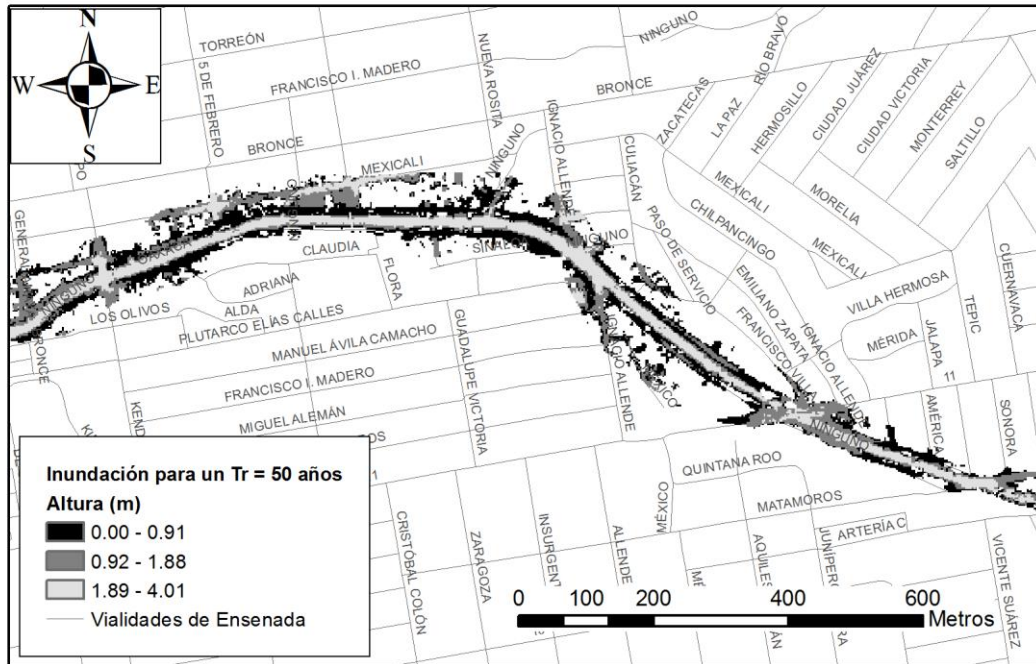


Figura 7b: Área de inundación correspondiente a un periodo de retorno (Tr) de 50 años, considerando la hipótesis 1.

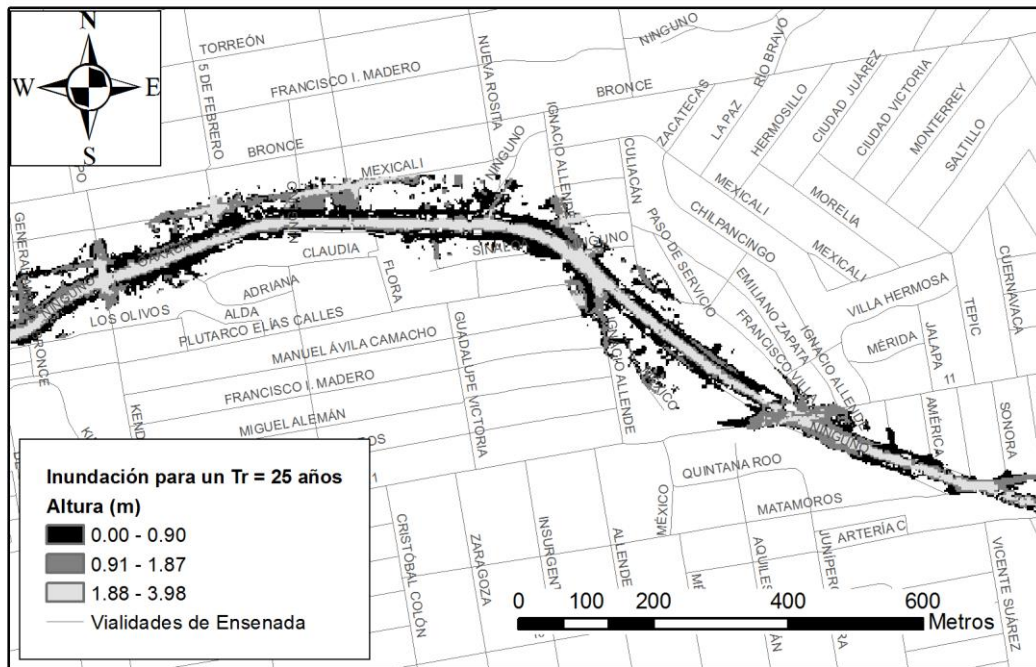


Figura 8a: Área de inundación correspondiente a un periodo de retorno (Tr) de 25 años, considerando la hipótesis 2.

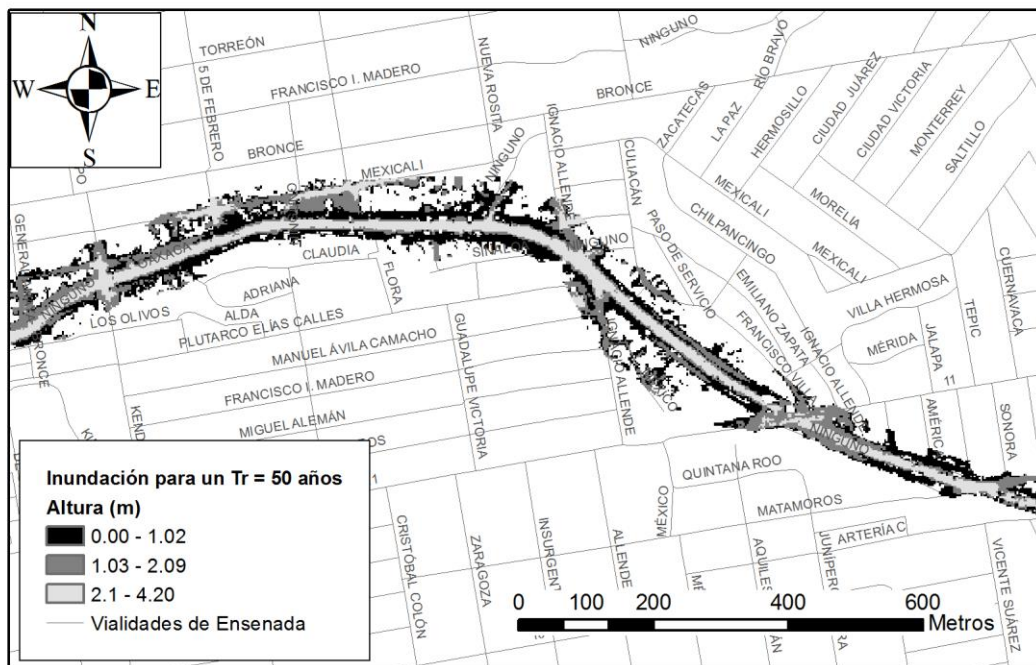


Figura 8b: Área de inundación correspondiente a un periodo de retorno (T_r) de 50 años, considerando la hipótesis 2.

III.4 Conclusiones

La modelación hidrológica e hidráulica permiten estudiar y analizar las condiciones de flujo permanente de acuerdo a la geometría de las secciones transversales correspondientes a un arroyo o cauce. Se pudo realizar el análisis de la respuesta de un sistema hídrico urbano ante eventos extremos de precipitación; evaluando las secciones transversales del tramo en estudio que son susceptibles a ser afectadas por desbordamientos e inundaciones. Se comprobó que la hipótesis 2 es la condición más desfavorable para la amenaza de inundación, la cual debe ser considerada al proponer la creación de un sistema de alerta temprana.

Se ha considerado que el periodo de retorno de 25 años es adecuado para la planeación de un sistema de alerta temprana, ya que con las precipitaciones esperadas cada 25 años se esperan inundaciones con una severidad suficiente como para causar daños y pérdidas significativas, y requieren por lo tanto evacuación y medidas de emergencia. Las inundaciones debidas a precipitaciones con períodos de retorno de 2, 5 y 10 años no causan daños mayores ni requerirían evacuaciones masivas. Por eso se toman los valores de precipitación con un período de retorno de 25 años como el insumo adecuado para diseñar el sistema de alerta temprana.

La metodología empleada en la modelación hidrológica e hidráulica para el pronóstico de inundaciones, constituye una herramienta sustancial para la toma de decisiones en cuanto a medidas preventivas ante la presencia de eventos extremos en una zona urbana; así mismo se constituyen en un eslabón imprescindible en la planeación de un sistema de alerta temprana ante eventos hidrometeorológicos y climáticos, que permita la gestión integral del riesgo.

Finalmente, un sistema de alerta temprana contribuye significativamente a la reducción del riesgo presente y futuro. Por lo tanto, este sistema debe ser un proceso que involucre una red de varias instituciones, en donde se genere y analice toda la información para ayudar a prevenir eventos de desastres, desde el monitoreo de los eventos climáticos,

la generación de modelos de pronósticos, la generación de modelos numéricos para cuantificar la amenaza, el buen manejo y comunicación de la información para alertamiento a la población. De este Sistema depende en gran parte la seguridad de la población, ya que es una medida para reducir los impactos negativos de la amenaza. La evaluación de la amenaza de inundación en este estudio contribuye de manera significativa para la planeación de un sistema de alerta temprana, y además, es una encomienda prioritaria por parte de la Secretaría de Comunicación y Transporte (SCT) para todo el país.

III.5 Referencias

- ACP-EU, Natural Disaster. Risk. Reduction. Program. (2018). *Hurricane Irma Recovery Needs Assessment: A Report by the Government of Antigua and Barbuda*. Retrieved from <https://www.gfdr.org/en/publication/hurricane-irma-and-maria-recovery-needs-assessment-antigua-and-barbuda>
- Arreguín-Cortés, Felipe, Cervantes-Jaimes, C. (2017). Flood Risk Management in Mexico. In *Flood Risk Management Theodore V Hromadka II* (pp. 261–273). IntechOpen. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.69834>
- B.C, Coordinación. Estatal. de Protección. Civil. (2014). *Atlas de Riesgos de Baja California*. Retrieved from <http://www.proteccioncivilbc.gob.mx/Atras/BajaCalifornia.html>
- Baró-suárez, J. E., Díaz-delgado, C., & Calderón, G. (2007). Curvas de daños económicos provocados por inundaciones en zonas habitacionales y agrícolas de México . Parte II : caso de estudio en la cuenca alta del río Lerma , México. *Ingenieria Hidraulica En Mexico*, XXII(1992), 71–85.
- Campos-Aranda, D. F. (2012). Relación y estimación de predicciones de lluvia horaria-diaria en dos zonas geográficas de México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, III(2), 141–152.
- CENAPRED. (2011). Metodología para la elaboración de mapas de riesgo por inundaciones en zonas urbanas, VII, 33–55.
- CENAPRED. (2014). *Metodología para la elaboración de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas*.
- COPLADE, (Comite de Planeación para el Desarrollo del Estado). (2017). Enero 2017. *Publicaciones Sociodemográficas/Baja California*, (55), 1–8. Retrieved from <http://www.copladebc.gob.mx/publicaciones/2017/Mensual/Ensenada 2017.pdf>
- Gencer, E. A. (2017). A Handbook For Local Government Leaders Making Cities Resilient – My City is Getting Ready ! Making Cities Resilient – My City is Getting Ready ! *UNISDR*.
- Gharbaoui, D., & Blocher, J. (2018). Limits to Adapting to Climate Change Through

- Relocations in Papua-New Guinea and Fiji. In *Limits to Climate Change Adaptation. Climate Change Management*. Springer, Cham (pp. 359–379).
https://doi.org/10.1007/978-3-319-64599-5_20
- Hernandez-Uribe Ruben, Barrios-Piña Héctor, R. A. (2017). Análisis de riesgo por inundación: metodología y aplicación a la cuenca Atemajac. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 8(3), 5–25. Retrieved from
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222017000300005
- IPCC. (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245>
- Jha, Abhas K, Bloch Robin, J. L. (2012). *A Guide to Integrated Urban Flood Risk Management for the 21st Century*. (D. . The World Bank Washington, Ed.).
- Jin, H., Liang, R., Wang, Y., & Tumula, P. (2015). Flood-runoff in semi-arid and sub-humid regions, a case study: A simulation of Jianghe watershed in northern China. *Water (Switzerland)*, 7(9), 5155–5172. <https://doi.org/10.3390/w7095155>
- Kunkel, K. E., Karl, T. R., Easterling, D. R., Redmond, K., Young, J., Yin, X., & Hennon, P. (2013). Probable maximum precipitation and climate change. *Geophysical Research Letters*, 40(7), 1402–1408. <https://doi.org/10.1002/grl.50334>
- Larios-Tlali, H., Torres-Benites, E., Quevedo-Nolascol, A., Martínez-Menes, M. R., & Salgado-Tránsito, J. A. (2015). Riesgo de inundación en la subcuenca del río La Antigua, Veracruz, México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 6, 39–56.
- López-Lambraño, Alvaro Alberto, Fuente, Carlos, Gonzalez-Sosa, Enrique, Lopez-Ramos, A. (2017). Pérdidas por intercepción de la vegetación y su efecto en la relación intensidad , duración y frecuencia (IDF) de la lluvia en una cuenca semiárida, VIII, 37–56. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-04-03>
- Marchi, L., Borga, M., Preciso, E., & Gaume, E. (2010). Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management. *Journal of Hydrology*, 394(1–2), 118–133. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.017>
- Mirhosseini, G., Srivastava, P., & Stefanova, L. (2013). The impact of climate change on rainfall Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves in Alabama. *Regional Environmental Change*, 13(SUPPL.1), 25–33. <https://doi.org/10.1007/s10113-012->

- Nalini, S., & Sreeja, S. P. (2016). and maximum flood depth (MFD) in an urban catchment of Northeast India. *Natural Hazards*, 83(3), 1527–1544.
<https://doi.org/10.1007/s11069-016-2374-1>
- Perkins, K. M., Munguia, N., Moure-Eraso, R., Delakowitz, B., Giannetti, B. F., Liu, G., ... Will, Markus, Velazquez, L. (2018). International Perspectives on the Pedagogy of Climate Change. *Journal of Cleaner Production*, 200, 1043–1052.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.296>
- Qamar-uz-Zaman Chaudhry. (2006). *Strengthening National Capacities for Multi Hazard Early Warning and Response System. Response.*
- Rodríguez Esteves, J. (2007). Construcción social del riesgo y variabilidad climática. *Frontera Norte*, 19(37), 83–112.
- Smith S. V., Bullock S. H., Hinojosa-Corona A., Franco -Vizacaino E., Escoto-Rodriguez M., Kretzchmar T. G., Farfan L. M., S.-C. J. M. (2007). SOIL EROSION AND SIGNIFICANCE FOR CARBON FLUXES IN A MOUNTAINOUS MEDITERRANEAN-CLIMATE WATERSHED. *Ecological Applications*, 17(5), 1379–1387.
- 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:10.2495/978-1-84564-6-1-46> 2 12
- Taylor, P., Nascimento, N., Machado, M. L., Baptista, M., & Silva, A. D. P. E. (2007). The assessment of damage caused by floods in the Brazilian context The assessment of damage caused by floods in the Brazilian context, (January 2015), 37–41.
<https://doi.org/10.1080/15730620701466591>
- Trenberth, K. E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47(1–2), 123–138. <https://doi.org/10.3354/cr00953>
- UNISDR. (2015). *Making Development Sustainable: The Future of Disaster Risk Management. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*. Geneva, Switzerland: United Nations Office for Disaster Risk Reduction.
- Vincent, K. R., Pearthree, P. A., House, P. K., & Demsey, K. A. (2004). Inundation

Mapping and Hydraulic Reconstructions of an Extreme Alluvial Fan Flood , Wild Burro Wash , Pima County , Southern Arizona.

- Werren, G., Reynard, E., Lane, S. N., & Balin, D. (2016). Flood hazard assessment and mapping in semi-arid piedmont areas : a case study in Beni Mellal , Morocco. *Natural Hazards*, 81(1), 481–511. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-2092-0>
- Zhang, Q., Zhang, J., Yan, D., & Wang, Y. (2014). Extreme precipitation events identified using detrended fluctuation analysis (DFA) in Anhui, China. *Theoretical and Applied Climatology*, 117(1), 169–174. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0986-x>

Capítulo IV. Metodología Multidisciplina en la Evaluación Integral del Riesgo de Inundación: Caso de Estudio Ensenada

Ena Gámez Balmaceda¹, Alvaro López-Lambrano^{1,2}, Carlos Villacís³, Georges Seingier¹, Hiram Rivera Huerta¹, José Baró Suárez⁴, Alvaro López Ramos⁵, Luisa Martínez Acosta⁵

¹ Universidad Autónoma de Baja California ² Hidrus ³ Pacific Disaster Center, PDC,

⁴ Universidad Autónoma del Estado de México ⁵ Universidad Pontificia Bolivariana

Artículo enviado como capítulo de libro: **Gestión integral del riesgo de desastre hidrometeorológicos, climáticos en sistemas socioecológicos desde diferentes dimensiones y enfoques (2020)**

Editorial de la Universidad Autónoma de Querétaro

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 las viviendas 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.

IV.1 Introducción

El impacto de eventos naturales extremos afecta negativamente los procesos de desarrollo. Esto es especialmente cierto 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 creciente de asentamientos informales aumenta aún más 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 prácticamente el 50% de todos los eventos catastróficos reportados globalmente (CRED, 2020). En México el problema de los desastres relacionados a 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 naturales, algunas 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 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 Estrategia Internacional para la Reducción del Desastres.

El riesgo a desastre está definido como las pérdidas potenciales, de todo lo que se puede perder cuando ocurre un evento, 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 expuestos en el área de la amenaza 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 o peligro (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 a los términos de referencia de Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU), donde se indica el uso de las guías de Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) para toda la república mexicana (CENAPRED, 2006; SEDATU, 2016). Sin embargo, considerando que estas guías están basadas con 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 estudio es hacer 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 métodos y datos fisiográficos, socioeconómicos y culturales característicos de la ciudad. Las características más relevantes de la ciudad en este estudio son: el clima semiárido, y su ubicación geográfica, en una zona fronteriza.

Para este objetivo se evalúa la amenaza para diferentes periodos de retorno (T_r), se elabora un modelo de exposición, la evaluación de la vulnerabilidad física estructural en viviendas y las pérdidas económicas directas. Para que la evaluación del riesgo sea integral, se hace un análisis del impacto socioeconómico, la identificación de estructuras críticas y el análisis de prioridades para la gestión de riesgo (Figura 1). La metodología que se presenta involucra disciplinas de las ciencias físicas y sociales.

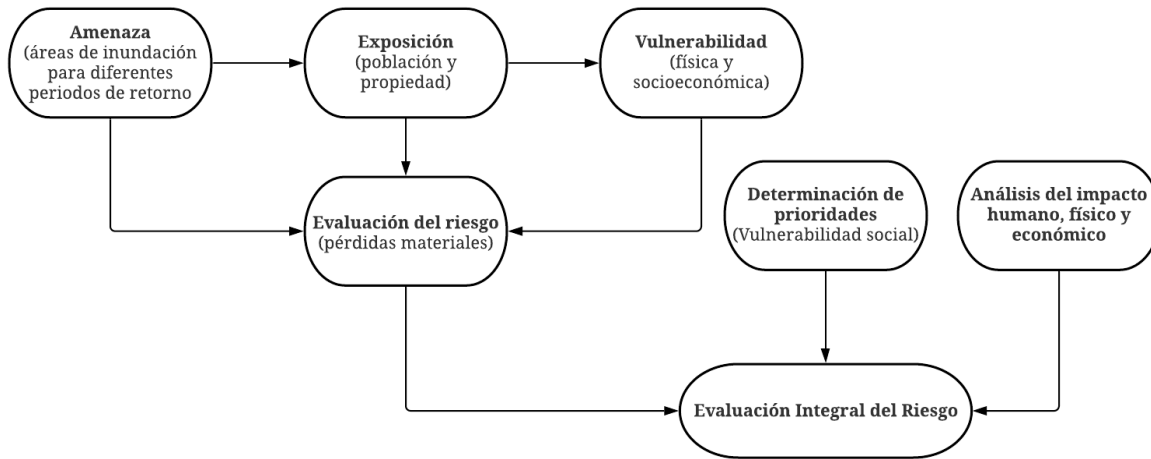


Figura 1. Diagrama general de la metodología para la evaluación integral del riesgo.

VI.2 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, que indica que a partir del periodo de retorno de 25 años se presentan inundaciones significativas en la ciudad de Ensenada (Gámez-Balmaceda, López-Lambraño, Seingier, & López-Ramos, 2019).

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 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 ° (López-Lambraño *et al.*, 2020). Esta subcuenca tiene su salida 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, consideradas la mayor exposición al riesgo de inundación en este estudio. Los arroyos a evaluar en la figura 2 se encuentran: a la derecha el arroyo Bronce, a la izquierda el arroyo Cañón DP y al centro el arroyo Presa ELZ.

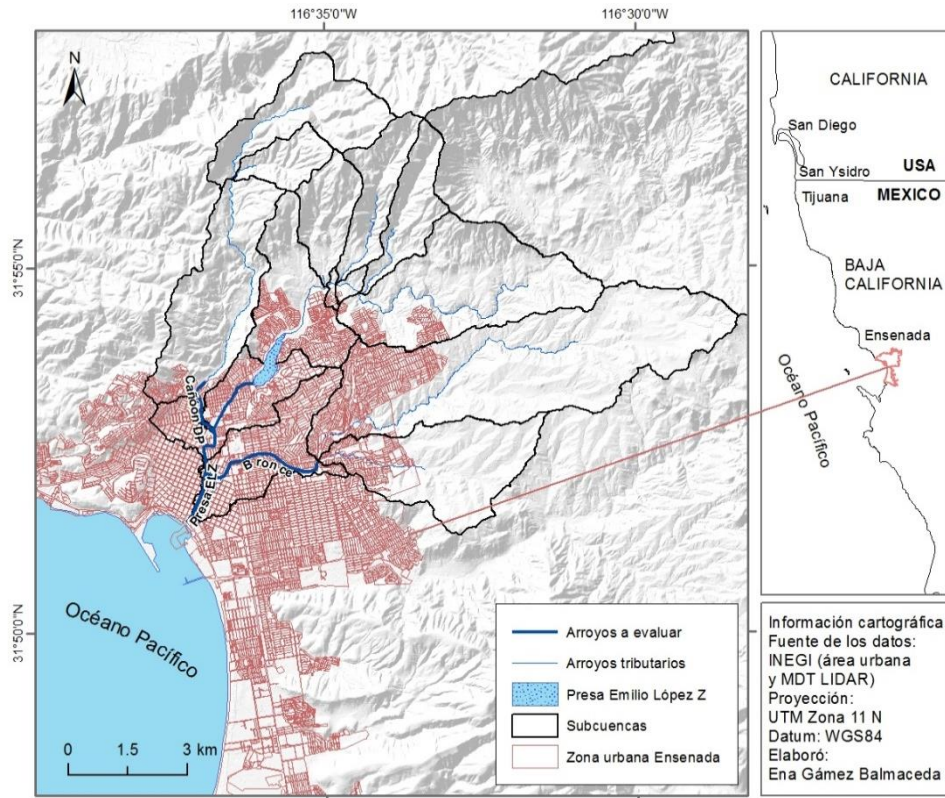


Figura 2. Área de estudio

A partir de las características del área de estudio, de los datos y métodos disponibles para la zona, se propone el proceso de la figura 3 para la evaluación de la amenaza.

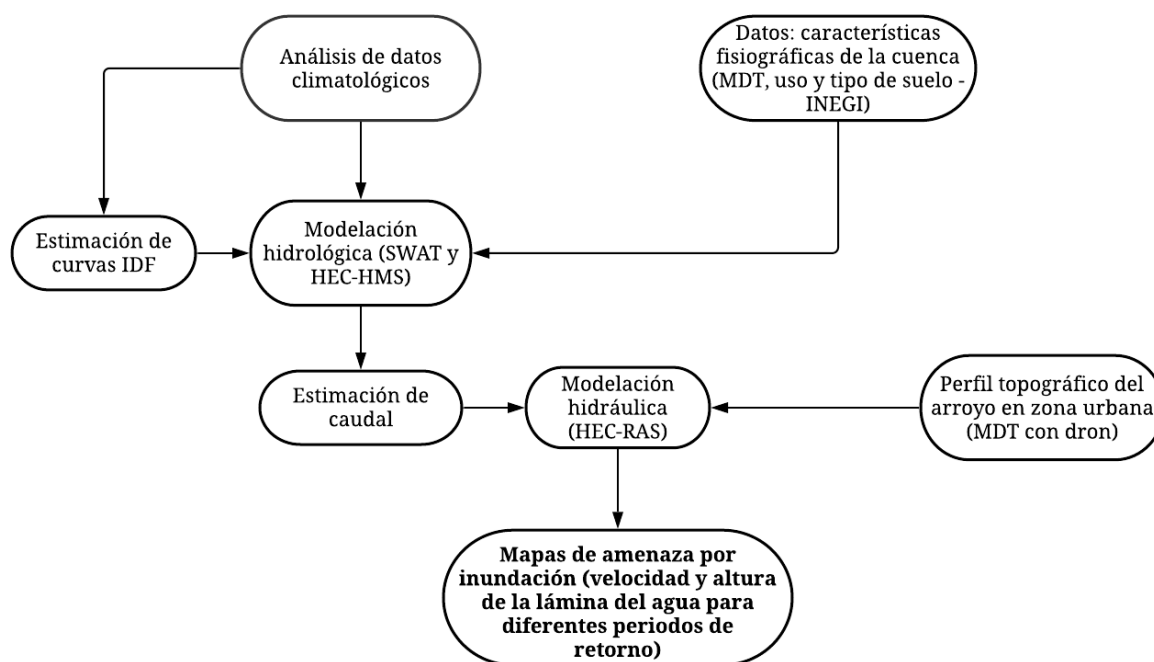


Figura 3. Proceso para la evaluación de la amenaza por inundación.

El primer paso para la evaluación de la amenaza, y como dato principal, es el análisis de los datos de precipitación. Para el caso de la ciudad de Ensenada se revisaron las curvas IDF con que cuenta la ciudad, donde se encontró que fueron hechas hace más de 20 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 de 1940 a 2019, obtenidos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y de estaciones automáticas particulares. De igual manera, se revisaron las herramientas de modelación hidrológica y su fundamentación teórica sobre la evaluación del balance hídrico, para evaluar la distribución de la lluvia y obtener el caudal máximo. Los datos de suelo y de terreno para la delimitación de las cuencas se obtuvieron de Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Los modelos revisados fueron el *Soil Water Assessment Tool* (SWAT) y el *Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS) que se basan en el método de número curva (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, 2011; U.S. Army Corps of Engineers, 2017). El SWAT proporcionó los números de curva que se utilizaron en el HEC-HMS para modelar las subcuencas de la figura 2, donde se encontró que los mayores escurrimientos ocurren cuando llueve en las subcuencas de la zona urbana. Los caudales de las subcuencas para los

tres arroyos se muestran en el cuadro 1. Posteriormente, como se indica en las guías del CENAPRED, se hace una modelación hidráulica por medio del HEC-RAS. Además del caudal y la rugosidad del canal para la modelación, se necesita la información topográfica de cada sección transversal del arroyo. La topografía puede obtenerse a partir de un modelo digital del terreno (MDT) de alta resolución. Como primera opción se probó una modelación con un MDT LIDAR por sus siglas en inglés *Light Detection and Ranging*, con resolución de 5m x 5m, obtenido de INEGI para la zona urbana de Ensenada. La modelación con el LIDAR nos indicó que no se inundaba con la lluvia modelada, sin embargo, del conocimiento que se tiene de la zona, de cada vez que se inunda, se procedió a hacer otra prueba con un MDT con mayor resolución (0.1 m x 0.1 m). Este modelo fue elaborado por medio de fotogrametría digital, derivada de la tecnología de los drones y con el uso del software Agisoft (Agisoft, 2018). Como resultado, se representa la comparación de las áreas de inundación obtenidas de los dos modelos (Figura 4). De la comparación, se seleccionó el modelo obtenido con el dron para la generación de los mapas con las áreas de inundación para periodos de 25, 50 y 100 años. Como un dato adicional a las guías del CENAPRED, en la modelación hidráulica se incluyó el resultado de la velocidad del agua, el cual constituye un dato importante para la evaluación de la vulnerabilidad física en las viviendas. Como ejemplo se presenta la figura 5 con los mapas de amenaza por inundación para un periodo de 100 años con el MDT seleccionado. Los mapas para los demás periodos se encuentran en la sección de anexos.

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

Subcuenca de arroyos evaluados	Área (km ²)	Lluvia	Lluvia	Lluvia	Caudal	Caudal	Caudal
		(mm)	(mm)	(mm)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
		Tr = 25 años	Tr = 25 años	Tr = 25 años	Tr = 25 años	Tr = 50 años	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

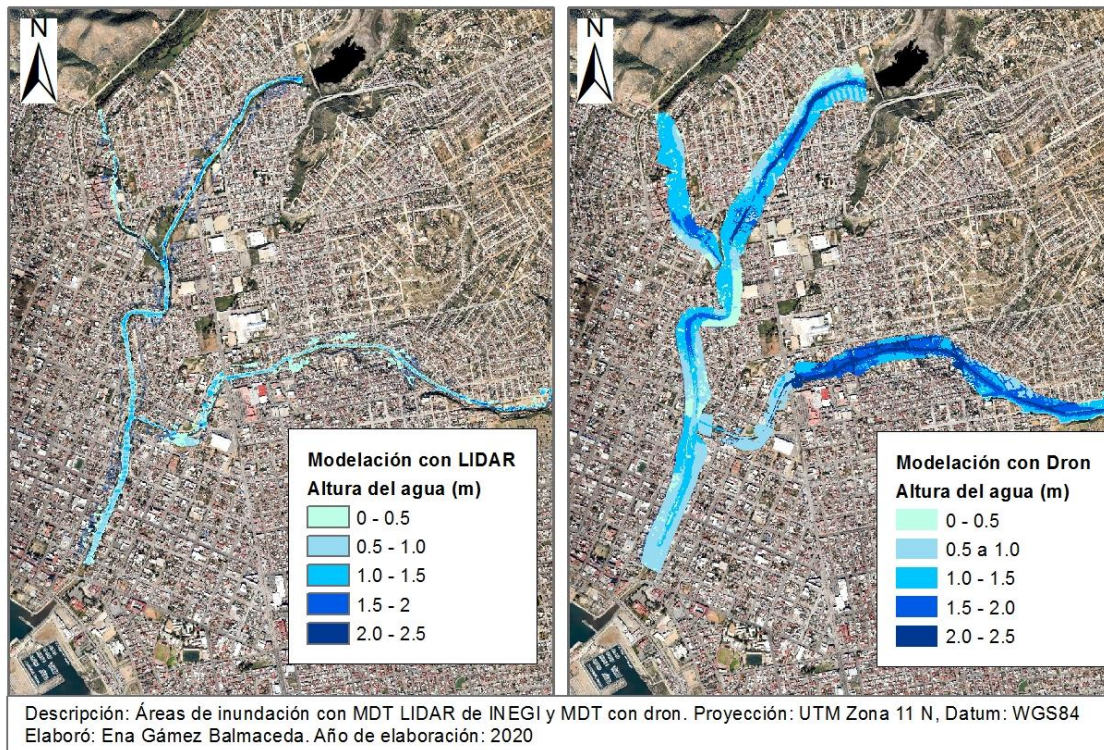


Figura 4. Comparación de áreas inundadas obtenidas con el uso de dos modelos digitales del terreno para un periodo de 100 años.

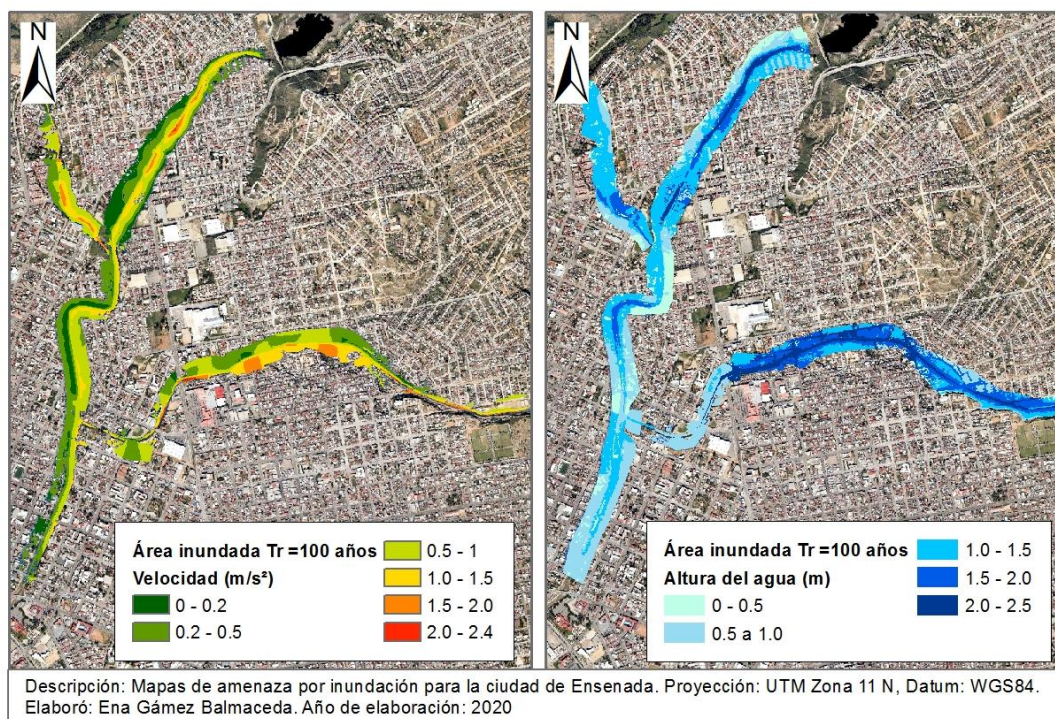


Figura 5. Mapas de amenaza por inundación para un periodo de retorno de 100 años.

IV.3 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). Los datos de partida para esta evaluación son la información cartográfica de INEGI del censo de 2010 y 2015. Se observó que algunas manzanas y viviendas del censo 2015 no aparecían en el censo de 2010. Además, con ayuda de las imágenes satelitales de Google Earth, se observó que algunas manzanas y viviendas no aparecían en ninguna de los dos censos, por lo tanto, la información faltante se completó con información de google Earth 2020 y datos de campo. Adicionalmente, en el trabajo de campo se levantó el dato del material de techos, paredes y piso de las viviendas, 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.

Una vez que se ha completado el inventario de viviendas expuestas, se determina la severidad de la amenaza o nivel de peligro que experimentan, a través del dato de altura y velocidad del agua (Alcocer-yamanaka, Rodríguez-Varela, Bourguett-Ortiz, Llaguno-Guilberto, & Albornoz-Góngora, 2016; FEMA, 2018). La literatura consultada indica que los daños estructurales se esperan a partir de una severidad muy alta, dependiendo del tipo de estructura (Cuadro 2). Esta parte del proceso constituye el modelo de exposición, en el cual, se asignó el valor de la altura por la velocidad del agua a cada vivienda, ante la amenaza de inundación (Cuadro 3 y figura 7).

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. Resultados del modelo de exposición para cada periodo de retorno

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	104	186	274
Muy alta	35	35	94
Extrema	1	14	34
Total	1 609	1 609	1 609



Figura 7. Ejemplo de manzanas y viviendas en al arroyo Bronx. Los puntos de colores son las viviendas clasificadas por la severidad de la amenaza para un periodo de retorno de 100 años (Cuadro 3).

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 viviendas por su tipo de construcción. La figura 8 muestra los tipos constructivos representativos de las viviendas en las áreas de amenaza por inundación, con un total de 168 viviendas de material ligero, 302 de madera, 847 de mampostería de 1 piso y 292 de mampostería de dos pisos.



Vivienda de material ligero



Vivienda de madera



Vivienda de mampostería de 1 piso



Vivienda de mampostería 2 pisos

Figura 8. Tipo de construcción en viviendas aledañas a los arroyos estudiados, las fotos se tomaron en campo y la clasificación se tomó de las guías de CENAPRED.

IV.4 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 9.

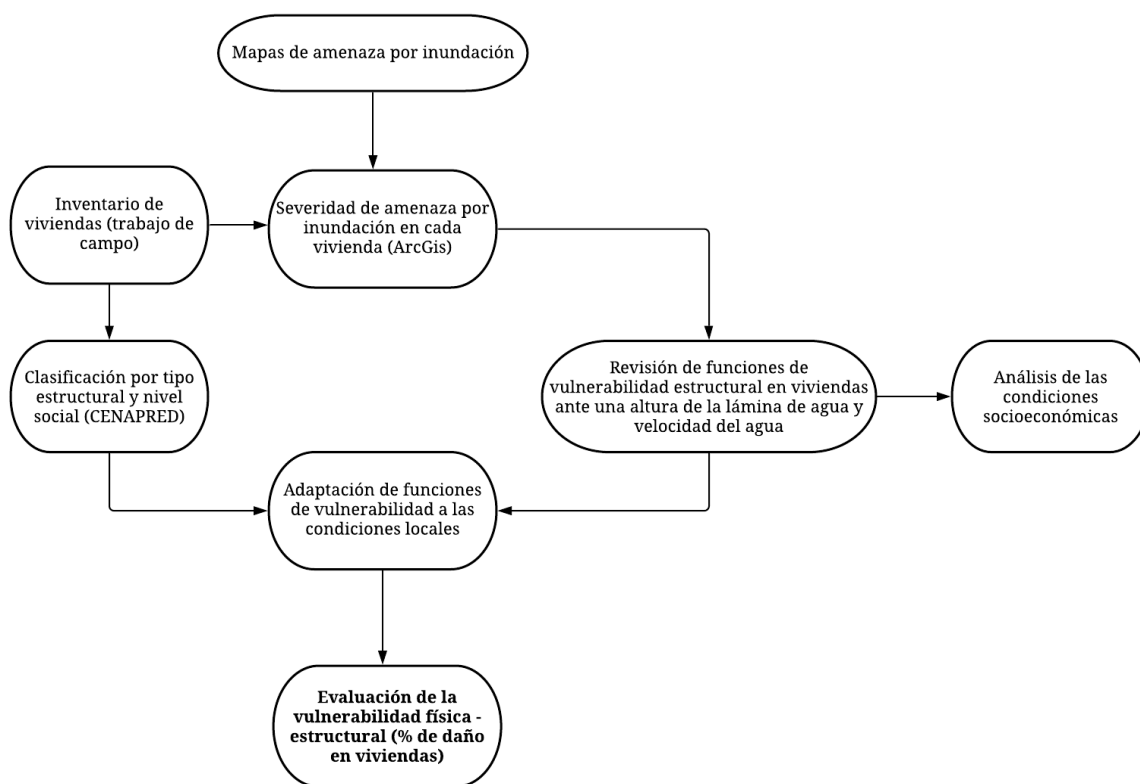


Figura 9. Proceso para la evaluación de la vulnerabilidad física-estructural en viviendas.

La vulnerabilidad se evalúa para determinar el nivel de daño esperado que experimentarán las viviendas. Uno de los métodos más confiables para la evaluación de la vulnerabilidad a nivel global son las funciones de vulnerabilidad, ya que son elaboradas por un grupo de expertos en evaluación de daños, por medio del 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, éstas serán usadas para determinar el porcentaje de daño al menaje de las viviendas. En estas 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. A nivel mundial hay muchas publicaciones que han evaluado la vulnerabilidad de las estructuras civiles por medio de modelos matemáticos, que se basan con las especificaciones de diseño, dependen del tipo de 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 de referencia para seleccionar las funciones que fueran aplicables a la zona de estudio.

Para seleccionar las funciones de vulnerabilidad para 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 a sus necesidades, usos costumbres. Ensenada por ser una de las ciudades más antiguas como 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, si bien es cierto que existe un ingreso per cápita mayor al de algunas ciudades del resto del país, también existe situación de pobreza al igual que muchas ciudades, con insatisfacción en el bienestar de las familias. Muchas familias han migrado a esta zona en busca de un mejor desarrollo, y han construido sus viviendas de muchas maneras, o compran casas móviles procedentes de Estados Unidos, que son de madera y de muy baja calidad (Jardón Hernández & Ordóñez Barba, 2009; Ortega Villa, 2000; Peña Muñoz, 2020). Por otro lado, la población que empezó a poblar el municipio, al igual que sus descendientes, procuran conservar el patrimonio histórico y el tipo de construcción en las viviendas, con un parecido californiano adquirido del país vecino de Estados Unidos en edificios importantes y viviendas, las cuales corresponden a construcciones de madera principalmente, y mampostería (Calderon, Robles, & Aguilar, 2015).

Con base al 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 exteriores de la vivienda, solo por 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 Ensenada (figura 11). Las funciones obtenidas se utilizaron para evaluar la vulnerabilidad en las 1 609 viviendas en el área de inundación de los tres arroyos. Con las funciones de la figura 10 y 11, se obtuvo el porcentaje de daño para cada tipo de estructura, y se clasificó la vulnerabilidad de acuerdo a este porcentaje (cuadro 4).

Los cuadros 5 a 7 muestran la cantidad de viviendas vulnerables para cada periodo de retorno. 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 y del menaje se presentan en la evaluación del riesgo.

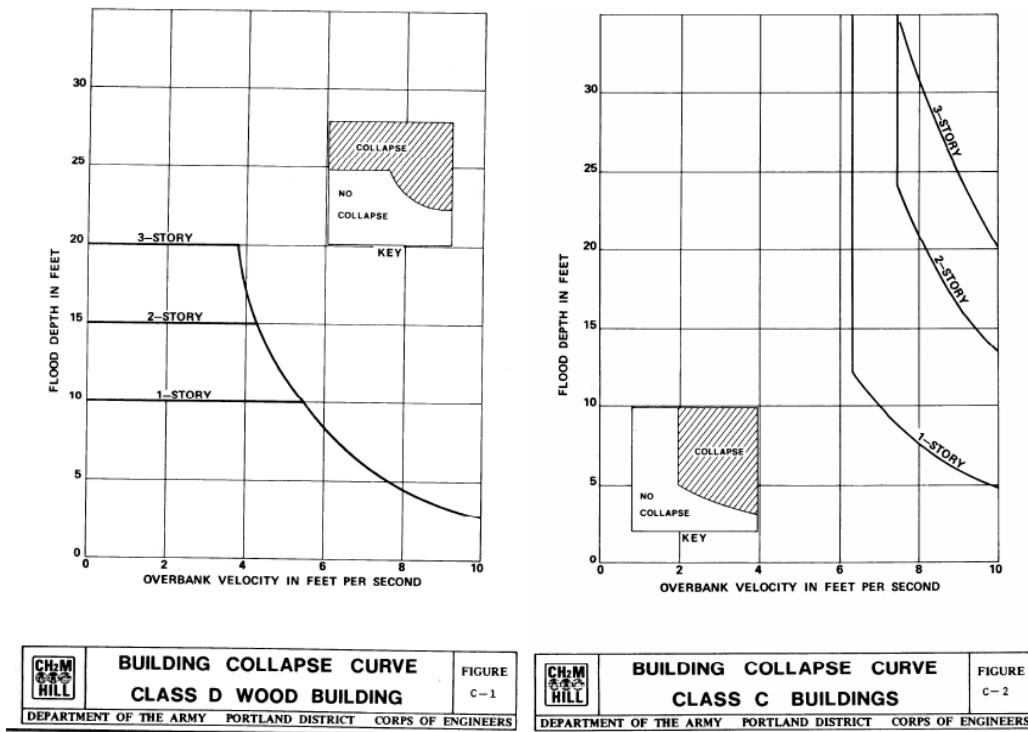


Figura 10. Funciones de colapso para estructuras de madera y mampostería (FEMA, 2001).

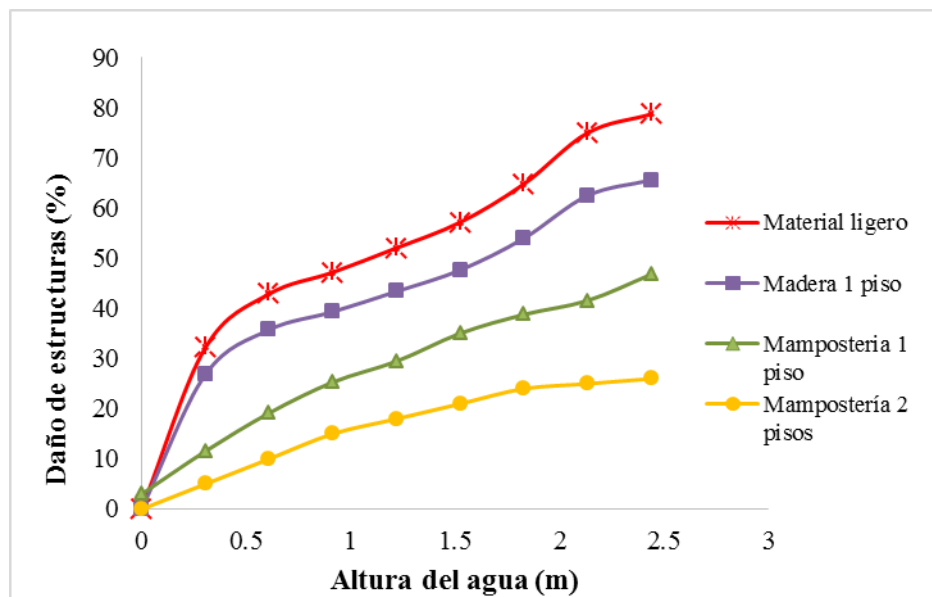


Figura 11. Funciones de vulnerabilidad propuesta para las viviendas de Ensenada

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

Vulnerabilidad	Material ligero	Madera	Mampostería	Mampostería 2 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%	-	-

Cuadro 5. Viviendas vulnerables para Tr = 25 años

Vulnerabilidad	Material ligero	Madera	Mampostería	Mampostería 2 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

Cuadro 6. Viviendas vulnerables para Tr = 50 años

Vulnerabilidad	Material ligero	Madera	Mampostería	Mampostería 2 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

Cuadro 7. Viviendas vulnerables para Tr = 100 años

Vulnerabilidad	Material ligero	Madera	Mampostería	Mampostería 2 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

IV.5 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 a 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 del CENAPRED, se hizo un ajuste en la cantidad de enseres que acostumbra la población. Dentro de las características socioeconómicas y culturales de esta zona fronteriza y de los datos levantados en campo, se encontró que la mayoría de las viviendas humildes, de materiales ligeros y de madera tipo II y III, poseen automóvil y un poco más de enseres de lo que se reporta en las guías de 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, en los que se incluye ropa, juguetes, electrodomésticos, muebles, automóviles y casas móviles, entre otros. El 90% de la población de Baja California compra bienes usados o nuevos de US (Ortega, 2000). Esta situación contribuye al aumento del riesgo respecto a las casas móviles traídas de Estados Unidos, 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 donde se observó que fueron autoconstruidas, tipo IV son viviendas de un piso bien construidas, y 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 del Estado, los costos totales se muestran 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, 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 (cuadro 9). El costo total por los daños esperados en 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

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

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

	Costo M.N	Costo M.N	Costo M.N
Daños en viviendas	(Tr = 25 años)	(Tr = 50 años)	(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

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, si tienen la capacidad para enfrentar el riesgo o se verán en la necesidad de 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 y 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 identificaron con ayuda de google Earth y datos de INEGI. El cuadro 11 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; el arrastre de los vehículos por la corriente es un problema recurrente que atiende 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 estructuras de servicio 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, con los daños esperados para un periodo de 25 años, si el municipio no

tuviera los 33 millones que se necesitan, y solo cuenta con 10 millones para ayudar a la población afectada, tendrá que decidir a quienes priorizar. En ese caso, el mapa de vulnerabilidad social, que está relacionado con los indicadores de pobreza y desarrollo, indica donde se encuentra la población más vulnerable socialmente. 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 clasificó 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. El cuadro 12 muestra el ejemplo para la determinación de prioridades con los resultados del impacto humano, 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. En la foto se observa una estación de bomberos y una estación de policía junto al arroyo. Foto obtenida de Google Earth.

	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)
---	---

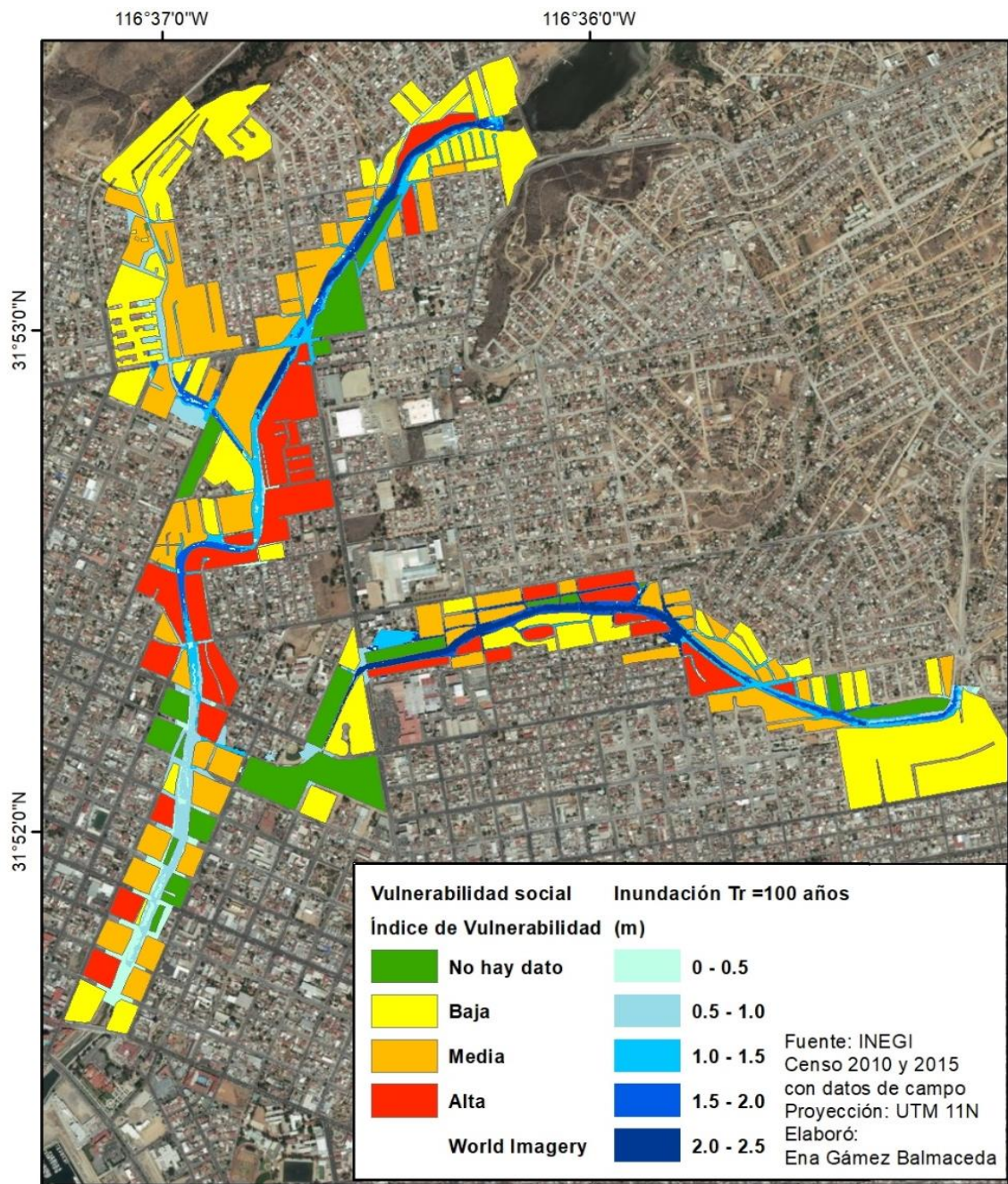


Figura 12. Mapa de vulnerabilidad social obtenido con datos de INEGI.

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 vulnerables socialmente	Heridos esperados por viviendas colapsadas	Personas 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

Los resultados de este trabajo son un ejemplo representativo de la evaluación integral del riesgo por el impacto de las inundaciones, el escenario de lo que pasaría en la población y sus bienes si las condiciones del sistema no cambian. 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 la coordinación del gobierno, 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 ocurriría cuando se presenten las lluvias modeladas. Por otro lado, en el contexto de la ley de Protección Civil, el reglamento de edificaciones de Ensenada y el Plan de Desarrollo Urbano del municipio, se establece que no está permitido construir en zonas de riesgo, por lo tanto, debe haber una regularización en asentamientos informales o tomar medidas para evitar que se construya en zonas de riesgo.

IV.6 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 logró la integración de la amenaza, la vulnerabilidad relacionada al estado de daño esperado en cada vivienda, el

impacto humano, pérdidas físicas, impacto socio-económico y determinación de prioridades.

La calidad de los datos es lo primero que hay que mejorar para una buena evaluación del riesgo. Como ejemplo, para la zona de estudio se actualizaron los datos de precipitación y el dato del modelo de terreno en el arroyo, para poder llevar a cabo la apropiada evaluación de la amenaza. Aunque se disponga de datos oficiales, se recomienda que se revisen y se evalúen los resultados obtenidos, para su posible actualización. Otro ejemplo es INEGI, como fuente oficial de datos en México, tiene 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, es recomendable que se complementen con datos de campo, siempre que sea posible, para tener una mejor estimación de resultados.

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 a la hora 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 en compra de riesgo. Las viviendas con mayor vulnerabilidad estructural se encuentran con vulnerabilidad social alta, por lo tanto, se encuentran en mayor desventaja a 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. Así mismo, se recomienda que se incorporen funciones de vulnerabilidad estructural en sus guías para cada tipificación de viviendas de México.

IV.7 Referencias bibliográficas

- Agisoft. (2018). Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition. Copyright © 2018 Agisoft LLC. <https://doi.org/10.1016/j.bjps.2011.05.024>
- 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). *Guia Basica para la Elaboracion 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, (Comite de Planeación para el Desarrollo del Estado). (2017). Enero 2017. *Publicaciones Sociodemográficas/Baja California*, (55), 1–8. Retrieved from [http://www.copladebc.gob.mx/publicaciones/2017/Mensual/Ensenada 2017.pdf](http://www.copladebc.gob.mx/publicaciones/2017/Mensual/Ensenada%202017.pdf)
- CRED, C. for R. on the E. of 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-Rodriguez, 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*. Retrieved from https://www.fema.gov/media-library-data/20130726-1820-25045-8292/hzmh2_1_fl_tm.pdf
- FEMA. (2016). Guidance for Flood Risk Analysis and Mapping, 1(May), 1–29.
- FEMA. (2017). Substantial Damage Estimator (SDE) User manual.
- 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. Retrieved from <https://cloud.atcouncil.org/s/6KNtXC3H8xz3yg6#pdfviewer>
- Fuentes Mariles, O., Franco, V., Luna Cruz, L., & Morales Rodríguez, H. (2014). *CARACTERIZACIÓN FLUVIAL E HIDRÁULICA DE LAS INUNDACIONES EN MÉXICO*. Retrieved from 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-Lambraño, 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.
- 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>

- 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. Retrieved from 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. Retrieved from <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)*. Retrieved from 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:10.2495/978-1-84564-6-1-46_2_12
- 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. Retrieved from 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, (March), 84. Retrieved from <http://www.mvn.usace.army.mil/Portals/56/docs/PD/Donaldsv-Gulf.pdf>

IV.8 Anexos



Figura 13. Mapas de amenaza por inundación (altura del agua) para un periodo de 25 años



Figura 14. Mapas de amenaza por inundación (velocidad) para un periodo de 25 años



Figura 15. Mapas de amenaza por inundación (altura del agua) para un periodo de 50 años

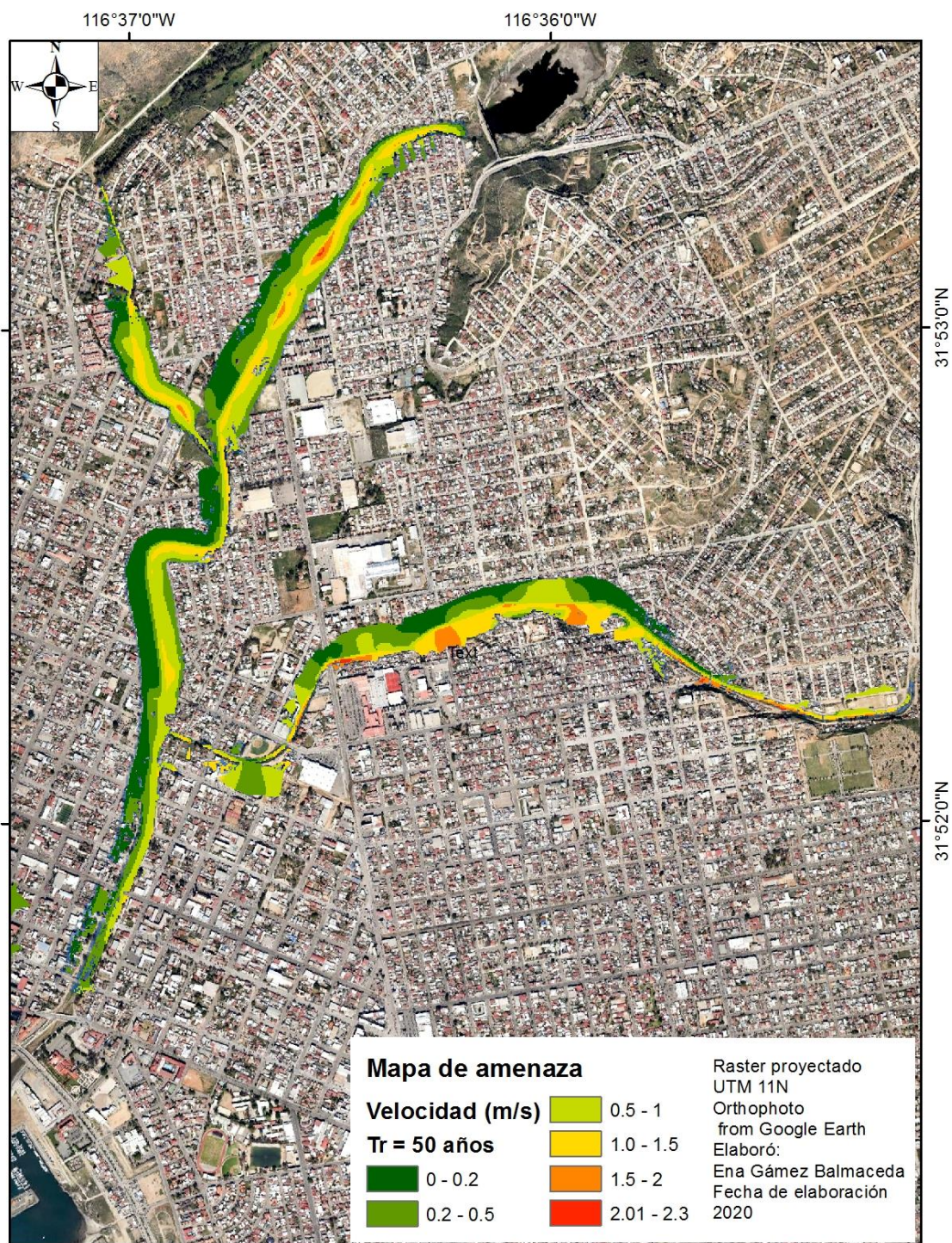


Figura 16. Mapas de amenaza por inundación (velocidad) para un periodo de 50 años



Figura 17. Mapas de amenaza por inundación (altura del agua) para un periodo de 100 años



Figura 18. Mapas de amenaza por inundación (velocidad) para un periodo de 100 años

Capítulo V: Conclusiones generales

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 logró la integración de la amenaza, la vulnerabilidad relacionada al estado del daño esperado en cada vivienda, el impacto humano, pérdidas físicas, impacto socio-económico y la determinación de prioridades.

Los aportes principales se destacan en las publicaciones de los capítulos II al IV. La calidad de los datos es lo principal a evaluar para llevar a cabo cualquier investigación. En el capítulo II la contribución principal es el método para calcular curvas IDF en cualquier sitio donde no hay datos pluviográficos y pluviométricos, y su actualización para la ciudad de Ensenada, se proporciona las estimaciones de IDF en cada estación evaluada.

La evaluación de los periodos de retorno es otro elemento muy importante para la determinación de la amenaza, ya que proporcionan información importante para la activación de los sistemas de alerta temprana. Por ejemplo, el capítulo III se encontró que la lluvia modelada a partir del periodo de 25 años genera inundaciones significativas en la ciudad de Ensenada. Los mapas de amenaza para todos los periodos de retorno, contenidos en el capítulo IV son una contribución importante para la toma de decisiones.

La evaluación de la vulnerabilidad física estructural de una vivienda es muy importante para estimar el número de personas que resulten heridas o evacuadas. Además 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 en compra de riesgo. Por lo tanto, es importante tomar en cuenta las características sociales y culturales de la población para la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo.

Los métodos para la estimación de pérdidas materiales se ajustaron de acuerdo a las condiciones locales de este año 2020, pero deben actualizarse de acuerdo a los cambios en cada ciudad, en esta tesis se limitó solo a pérdidas materiales por daños directos en

vivienda. Sin embargo, es importante tomar en cuenta para futuros estudios, el cálculo de los daños indirectos y afectaciones a la infraestructura urbana.

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 en esta tesis. 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. Así mismo, se recomienda que se incorporen funciones de vulnerabilidad estructural en sus guías para cada tipificación de viviendas de México, en conjunto con funciones de vulnerabilidad para infraestructura.