

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología

Unidad Valle de las Palmas, Campus Tijuana

Programa educativo de licenciatura en Ingeniería Civil

“ANÁLISIS DE RIESGO POR INUNDACIONES EN ZONA URBANA DE LA CIUDAD DE TIJUANA. CASO DE ESTUDIO”

TESIS

para obtener el grado de
Licenciatura

Presenta:

Guillermo Willys Duarte

Director de tesis

Dr. Mario González Durán

Tijuana, Baja California, enero 2021

Tabla de contenido

Índice de figuras..... 3

Índice de tablas..... 5

Índice de ecuaciones..... 6

Dedicatoria..... 6

Agradecimientos..... 6

Resumen..... 7

I. Introducción..... 8

I.1 Necesidad de la Investigación 8

I.2 Problemática 8

I.3 Justificación..... 9

I.4 Antecedentes..... 9

 I.4.1 Lluvias de 1916 9

 I.4.2 Lluvias de 1978 12

 I.4.3 Lluvias de 1993 13

 I.4.4 Tijuana y su proyección hacia al 2030 17

 I.4.5 Investigaciones anteriores 18

I.5 Objetivo general..... 19

I.6 Objetivos específicos..... 19

I.7 Marco Teórico..... 20

 1.7.1 Inundaciones 20

 1.7.2 Impacto de las inundaciones en México y en el mundo 21

 1.7.3 Fenómeno del niño..... 26

 1.7.4 Riesgo 28

 1.7.5 Modelos digitales de inundación 38

 1.7.6 Metodología del CENAPRED..... 39

II. Metodología 42

II.1 Cuenca del Río Tijuana 42

II.2 Delimitación del área de subcuenca a estudiar..... 44

II.3 Caracterización de la subcuenca..... 49

II.4 Determinación de gastos de escurrimiento 54

 II.4.1 Análisis de datos pluviométricos 54

 II.4.2 Determinación de gastos de escurrimiento 59

 II.4.3 Modelo digital de inundación 63

 II.4.4 Determinación del Riesgo..... 71

III. Resultados 76

IV. Discusiones y conclusiones..... 80

V. Referencias bibliográficas	83
VI. Glosario	87

Índice de figuras

1. Inundación de 1916 en San Diego.....	10
2. Nota periodística “Tijuana Bajo el agua”.....	11
3. Inundación de Tijuana 1916.	11
4. Presa Abelardo L. Rodríguez, 1978.....	13
5. Canalización del río Tijuana, 1978.....	13
6. Distribución espacial de zonas dañadas, 1993.....	15
7. Canalización del río Tijuana, 1993.....	15
8. Proyección de población en Tijuana.	17
9. Mapa de riesgo por inundación según Protección Civil.....	18
10. Porcentaje del impacto económico por desastres (2000-2015).....	22
11. Porcentaje de daños y pérdidas generadas por tipo de fenómeno en 2015.....	23
12. Porcentaje de daños y pérdidas generadas por tipo de fenómeno en 2016.....	23
13. Porcentaje de daños y pérdidas por fenómenos hidrometeorológicos, 2016.	24
14. Porcentaje de decesos por tipo de fenómeno hidrometeorológico en 2016.....	24
15. Afectaciones de las inundaciones en la vida humana (2005-2014 vs. 2015).....	25
16. Fenómeno meteorológico de “El Niño”.....	27
17. Coeficientes de variación entre temporada normal y temporada “El Niño”.	28
18. Mapa semántico de riesgo.	29
19. Diagrama de riesgo.	30
20. Balanza del peligro.....	32
21. Mapa conceptual de vulnerabilidad.....	34
22. Esquema de la exposición.....	36
23. Esquema del riesgo.	37
24. Clasificación esquemática de metodologías de modelado de inundaciones.....	39
25. Geometría de un cauce a ser simulado en HEC-RAS.....	40

26. Localización de cuenca a analizar.	43
27. Geomorfología de la Cuenca del Río Tijuana.	43
28. MDE de California y de México.	45
29. Comparación de MDE antes y después.	45
30. Delimitación de MDE de Cuenca del Río Tijuana.	46
31. Proceso de identificación de subcuenca.	47
32. Flow Direction y Flow Accumulation en subcuenca preliminar.	48
33. Subcuenca preliminar, final y microcuencas.....	49
34. Subcuenca, microcuencas y escurrimientos.	50
35. Subcuenca y escurrimientos en imagen satelital.	50
36. Procedimiento de cálculo de pendiente promedio.....	51
37. Ubicación de estaciones pluviométricas.	54
38. Consulta de estaciones de E.U.....	57
39. Eventos extraordinarios por año.	59
40. Curva de precipitación de diseño en función del periodo de retorno (EST. MÉXICO Y E.U.).....	60
41. Diagrama del flujo de los escurrimientos.	63
42. Archivo de elevación TIN de la subcuenca.	64
43. Trazado de geometría del Río Tijuana	65
44. Conjunto de geometrías.....	66
45. Geometría en HEC-RAS	67
46. Análisis de inundación en HEC-RAS.....	68
47. Modelo de inundación en ArcMap.	70
48. Modelo de inundación en Google Earth.	70
49. Peligro/severidad por inundación.....	71
50. Marginación en Tijuana.	72
51. Áreas afectadas e índice de marginación.	73
52. Uso del Inventario Nacional de Viviendas	74
53. Información proporcionada por INVI.	75
54. Modelo de inundación sobre subcuenca.	77

55. Vista aerea en ángulo de modelo de inundación - a.....	77
56. Vista aerea en ángulo de modelo de inundación - b.....	78
57. Vista aerea en ángulo de modelo de inundación - c.....	78
58. Mapa de riesgo por inundación en Tijuana.....	79
59. Porcentaje de población afectada de manera directa.....	79
60. Severidad de inundación según CENAPRED.....	80

Índice de tablas

1. Descripción de Lluvias de 1993 en Tijuana, Baja California, México.....	16
2. Descripción de características de modelado por HEC-RAS.....	41
3. Escurrimientos de subcuenca.....	49
4. Área de microcuencas y longitud de escurrimientos.....	50
5. Coeficientes de escorrentía en zona urbana.....	52
6. Coeficientes de escorrentía en terreno natural.....	52
7. Resumen de características de microcuencas.....	53
8. Tiempo de concentración por microcuenca.....	53
9. Periodos de registro por estación.....	55
10. Precipitaciones mayores a 50 mm, estaciones México.....	56
11. Precipitaciones mayores a 50 mm, estaciones E.U-1.....	57
12. Precipitaciones mayores a 50 mm, estaciones E.U-2.....	58
13. Precipitaciones de diseño.....	61
14. Gastos de escurrimiento por microcuenca.....	62
15. Matriz de riesgo modificada.....	73
16. Viviendas afectadas.....	76
17. Población afectada de manera directa.....	76

Índice de ecuaciones

Ecuación 1.- Ecuación de riesgo.	30
Ecuación 2.- Pendiente por método de Taylor y Schwarz.....	51
Ecuación 3.- Tiempo de concentración, método de Kirpich.	53
Ecuación 4.- Distribución de Gumbel	60
Ecuación 5.- Intensidad de precipitación.....	61
Ecuación 6.- Gasto o caudal.	61
Ecuación 7.- Ecuación de riesgo propuesta	80

Dedicatoria

Esta investigación va dedicada a mi familia, *mis padres y hermanos quienes me apoyaron en todo lo que he necesitado para mi educación y desarrollo académico.* También va dedicada a la ciudad que me vio nacer y crecer, Tijuana, una forma de regresarle un poco de lo que me ha dado.

Agradecimientos

Agradezco de igual forma y en primer lugar a mi familia que siempre están a mi lado y me ofrecen su ayuda cuando la necesito, me acompañan siempre con amor.

Agradezco a mi universidad por las experiencias que me permitió vivir durante mi desarrollo académico, al Dr. Mario González Durán por el impulso, asesoría y apoyo incondicional, al M.I. Jesús S. García Carrera por su apoyo, valiosa asesoría y seguimiento, a todo el equipo del INEEL, a mi compañero Jeremy Ryan Sánchez Valdivia por sus contribuciones, a mis compañeros que sin ellos no podría haber logrado el crecimiento que logré, agradezco a todos aquellos que estuvieron involucrados directa o indirectamente en el desarrollo de esta investigación.

Resumen de la tesis de Guillermo Willys Duarte, presentada como opción para la obtención del grado de Licenciatura en Ingeniería Civil de la UABC. Tijuana, Baja California, México, diciembre de 2020.

ANÁLISIS DE RIESGO POR INUNDACIONES EN ZONA URBANA DE LA CIUDAD DE TIJUANA. CASO DE ESTUDIO

Tijuana, una ciudad dinámica, de rápido crecimiento y con su centro económico asentado en las inmediaciones de un río cuyo cauce se mantiene con un caudal mínimo por largos periodos de tiempo, desde meses hasta años, el tiempo suficiente para lograr que la comunidad olvide que los largos periodos secos vienen acompañados de súbitos eventos hidrometeorológicos de altas intensidades.

La importancia de la realización de esta investigación recae en los acontecimientos pasados que han marcado la historia de la ciudad, generando daños catastróficos y que, a la fecha, a pesar de tener innumerables lecciones de pérdidas humanas, materiales y económicas, el desarrollo de la ciudad sigue sin atender este riesgo latente, el de una inundación, permitiendo asentamientos y desarrollos (habitacionales y comerciales) en áreas de alta exposición.

El modelo digital de inundación para la zona urbana de Tijuana que se ha desarrollado con datos pluviales de la CONAGUA y la NOAA (Estados Unidos) y en coordinación con el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias busca identificar las zonas de mayor riesgo en las inmediaciones de los principales escurrimientos de la ciudad, determinando en términos cualitativos y generales el grado de peligro, exposición y vulnerabilidad los cuales fueron determinados con información del Inventario Nacional de Viviendas del 2016 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

I. Introducción

I.1 Necesidad de la Investigación

Históricamente en la ciudad de Tijuana del estado de Baja California se han desarrollado importantes precipitaciones pluviales que generan inundaciones en ciertas zonas de la ciudad provocando un desastre (tanto natural como humano), pues las afectaciones en la ciudad han sido catastróficas debido al crecimiento urbano desmedido y poco planificado. Algunos eventos relevantes que se han presentado con lluvias de altas intensidades en periodos cortos de tiempo son por ejemplo los casos de 1978 y 1993

Se vuelve prioritario tener una proyección de las afectaciones que podría sufrir la población, para así diseñar planes de acción y mitigación mayormente sustentados y que cumplan ante posibles escenarios extremos, esto debido a que el municipio no contempla dentro de sus planes de desarrollo ninguna política clara sobre la colección de información para saber la afectación en las edificaciones y la población ante cualquier hecho extraordinario que pudiera ocurrir. Los resultados aquí presentados servirán para una mejor y oportuna toma de decisiones.

I.2 Problemática

Las lluvias extraordinarias que ha experimentado la ciudad de Tijuana se caracterizan por generar grandes afectaciones a la infraestructura urbana, como vialidades, sistemas de drenaje pluvial y colonias enteras, generando pérdidas económicas, materiales e incluso humanas. Estas lluvias, en general, se presentan en periodos de retorno de aproximadamente 25 y 50 años, y desafortunadamente, la poca información documentada o difundida del ciclo hidrológico de la región provoca que durante la época de sequía, donde hay ausencia de lluvias por periodos largos de tiempo, muchas zonas despobladas pueden ser consideradas para el desarrollo o crecimiento

urbano a través de asentamientos humanos (regulares o irregulares), zonas industriales, etc., cuando en realidad son zonas con alto potencial de inundación o escurrimiento a la llegada de un evento extraordinario. El punto de referencia que nos da un panorama más completo de estas problemáticas es el evento hidrometeorológico presentado a inicios de 1993, uno de los más importantes hasta la fecha por su intensidad y magnitud.

I.3 Justificación

El constante crecimiento de Tijuana de forma desmedida y carente de esquemas claros de urbanización, sumado a las condiciones geográficas y atmosféricas de su ubicación que propician un comportamiento hidrometeorológico errático con antecedentes catastróficos para sus habitantes, no solo mantienen un riesgo latente, sino que este mismo va en aumento y las medidas para prevenir y mitigar los estragos de un futuro evento deben de estar a la altura de las circunstancias.

I.4 Antecedentes

I.4.1 Lluvias de 1916

Tijuana, Baja California, México fue oficialmente constituida el 11 de julio de 1889 (IMPLAN Tijuana, 2010) y ha sido incluso desde antes de su fundación que los fenómenos hidrometeorológicos, específicamente las inundaciones pluviales, han marcado su historia.

Cuando apenas el poblado comenzaba a conformarse éste era una localidad llamada Tía Juana, en el documento *“Atlas de Riesgos del Municipio de Tijuana, 2014”* se presume que el poblado se localizaba en territorio estadounidense (Ayuntamiento de Tijuana, 2014a) y no fue hasta la inundación de 1891 que se obligó el traslado del mismo a zonas más altas, las que hoy ocupa el centro histórico de Tijuana(Conklin, 1988).

Una de las inundaciones más importantes que azotó la región fue la de 1916, la cual según los registros del vecino país del norte, éste sigue siendo el desastre climático más grande en la historia de San Diego donde murieron 22 personas y fueron destruidos puentes, caminos y vías férreas. Colapsaron presas que llevaron al centro de la ciudad un tirante de hasta 5 pies de altura (*Figura 1*) (San Diego Digital Archives, 2020). Por su parte, en el lado mexicano una crecida del Río Tijuana destruye el recién inaugurado hipódromo y el puente la Marimba que conectaba ambos lados del mismo (Rodríguez Esteves, 2008), la memoria fotográfica nos permite dimensionar la magnitud del desastre en las *figuras 2 y 3*.

Figura 1. -
Inundación de 1916 en San Diego.



Foto del San Diego River tomada el 28 de enero de 1916. Autor desconocido.

Figura 2. -

Nota periodística “Tijuana Bajo el agua”.



Periódico Evening Tribune referente a inundación de Tijuana de 1916. (San Diego Red, 2016).

Figura 3. -

Inundación de Tijuana 1916.



Foto tomada de, (Archivo Histórico de Tijuana, 2016).

I.4.2 Lluvias de 1978

Otras fechas que marcarían la historia de Tijuana serían las fuertes avenidas de la segunda mitad del siglo XX. La ciudad fronteriza se convirtió en un receptor de migrantes que buscaban cruzar al vecino país en busca de mejores oportunidades, según dice la narradora del documental *“La respuesta de un pueblo”* que fue recuperado en 2015 por el C. Antonio H. Rosquillas se menciona sobre Tijuana que *“se ha visto convertida en un maremágnum de gente, la mayoría de escasos o nulos recursos, que se aferran a seguir en ella (Tijuana) viviendo en cañones, lechos de ríos y cerros, construyendo sus hogares con materiales frágiles que no reúnen ni los más mínimos requisitos de seguridad”*.

Ante tal situación y con las precipitaciones presentadas en los primeros meses de 1978, la ciudad tuvo grandes daños, decenas de decesos y por primera vez en 34 años se abrirían las compuertas de la presa Abelardo L. Rodríguez debido al alto nivel que esta presentaba *“el vaso de la presa captó 101,602 millones de metros cúbicos; faltándole únicamente 15 millones para alcanzar el récord establecido 40 años atrás”*(CESPT, 2006), teniendo así que evacuar a más de 10,000 mexicanos que se encontraban asentados en las inmediaciones del lecho del Río Tijuana (Dirección de Información y Relaciones Públicas del Gobierno de Baja California, n.d.). Hay que hacer énfasis de la importancia de la canalización del Río Tijuana que se encontraba construida en su primera etapa para esa fecha, la cual en palabras del entonces Presidente de la República Mexicana *“en su previsión dentro de las circunstancias ha impedido una catástrofe nacional de dimensiones que no podemos ni siquiera imaginar... el esfuerzo de la República al hacer este canal ha quedado en esta sola ocasión plena y absolutamente justificada”* (López Portillo, 1978).

Figura 4. -
Presa Abelardo L. Rodríguez, 1978.



Presa Abelardo L. Rodríguez a su máxima capacidad antes de la apertura de 3 de sus compuertas para el desfogue en enero de 1978.(Dirección de Información y Relaciones Públicas del Gobierno de Baja California, n.d.)

Figura 5. -
Canalización del río Tijuana, 1978.



Fotografía tomada desde uno de los puentes que cruza la canalización del río Tijuana el cual muestra un gasto considerable debido a las altas precipitaciones presentadas. (Ayuntamiento de Tijuana, 2014b)

I.4.3 Lluvias de 1993

La ciudad no tuvo mayor obstáculo para crecer económica, social y territorialmente en los años venideros. Debido a diversos factores geográficos y geopolíticos, Tijuana creció a pasos agigantados y fuera de un marco de planeación urbana. Se estima como cita (Romo-Aguilar, 1996, p. 65) que para el año de 1993 más del 50% del crecimiento urbano se dio en cerros y cañones, “áreas que en el Plan de Desarrollo Urbano de 1984 estaban consideradas como de preservación

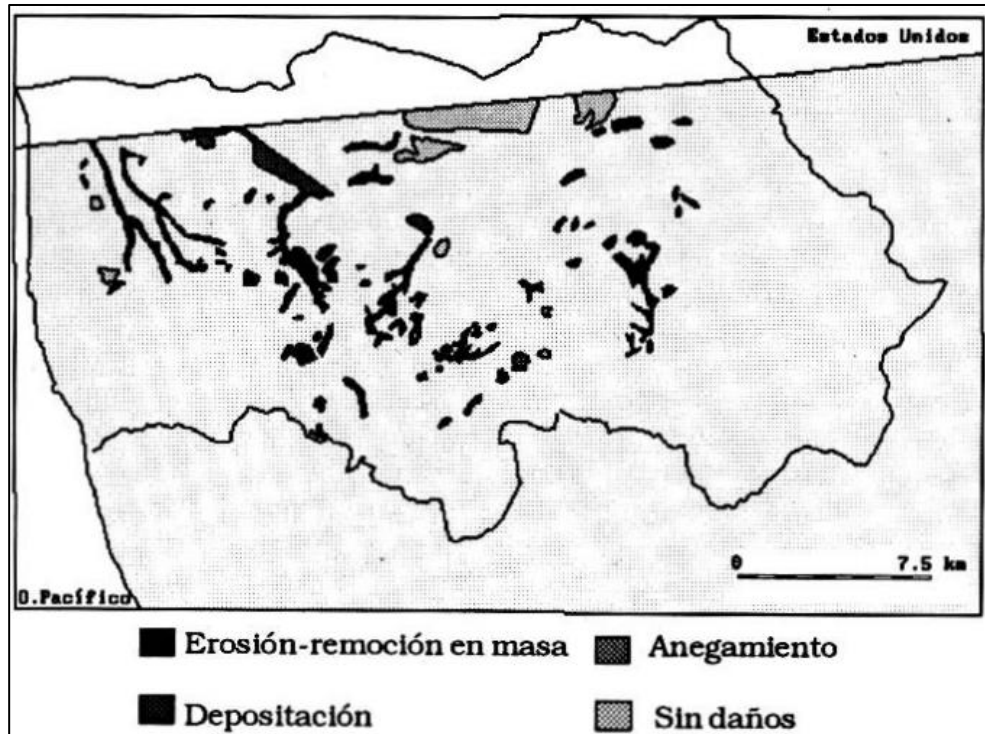
ecológica. Estas ocupaciones provocaron evidentes problemas de ordenamiento urbano y de dotación de servicios". Tijuana el ser una zona árida se caracteriza por escasear en su vegetación en la zona urbana y sobre todo en las zonas en las que se propiciaron gran parte de las invasiones territoriales o "urbanización informal". Al haber "una falta de vegetación contenedora, los escurrimientos superficiales se intensifican arrastrando grandes cantidades de suelo de las partes altas a las bajas, contribuyendo a la saturación de vialidades y canales"(Barajas T. & Méndez M., n.d.).

Para el año de 1980, la presa Abelardo L. Rodríguez se encontraba a su máxima capacidad después de varios eventos de precipitación considerables; las compuertas fueron abiertas y aguas abajo la corriente destruyó una gran cantidad de casas que se encontraban asentadas a las orillas del Río Tijuana(Dedina, 1995) evidenciando la falta de planeación de los asentamientos humanos en la ciudad.

Las precipitaciones que se presentaron en enero de 1993 se estiman fueron de alrededor de 210 mm, con catorce días de lluvia (Bocco et al., 1993a, p. 30,31), sin embargo, el mayor impacto fue generado por una precipitación de 50 mm de manera continua en menos de 24 horas(Ayuntamiento de Tijuana, 2014a). El área dañada basándose en fotografías aéreas y visitas de inspección en sitio fue aproximadamente de 1960 hectáreas (10% del área urbana de 1993)(Bocco et al., 1993b, p. 14.), 57% fue dañado por erosión-remoción en masa, 20% por depositación y el 23% restante, por anegamiento.

Según el reportaje "Las lluvias de 1993 en Tijuana, la tormenta olvidada"(Tijuana en el Tiempo, 2019) se detalla que a pesar de que la alerta por estas fuertes precipitaciones se extendió desde la ciudad de Los Ángeles en los Estados Unidos hasta Ensenada, Baja California, las pérdidas fueron cuantiosas debido a la falta de prevención. Se presume que el inicio de las precipitaciones comenzó el 6 de enero, para la mañana del 7 de enero de 1993 ya se había superado el promedio mensual y en dos semanas de lluvia ya se había superado el promedio anual de precipitación en la ciudad.

Figura 6. -
Distribución espacial de zonas dañadas, 1993.



Áreas que sufrieron mayor daño por las inundaciones de enero de 1993. Tomada de (Bocco et al., 1993b)

Figura 7. -
Canalización del río Tijuana, 1993.



Foto del caudal de la canalización del río Tijuana durante las precipitaciones de enero de 1993 (Desconocido, 1993).

Tabla 1.-
Descripción de Lluvias de 1993 en Tijuana, Baja California, México.

Año	Evento	Estado	Muertes	Población afectada	Daños totales (Millones de dólares)	Gastos o Lluvia	Descripción
1993	Lluvias de Invierno	Baja California	33	10,000	\$32.00	100 mm en 4 h, cuenca del río Tijuana 316 mm en 15 horas, cuenca del arroyo Miraflores.	Se desbordaron los ríos Tijuana y Tecate, en Baja California, así como los arroyos El Carrizo y Matanuco, en Baja California Sur. En el río Tijuana se presentó una inundación súbita. Los sistemas de comunicación y las zonas de agricultura fueron severamente dañadas. Cierre de aeropuertos. 45% de la ciudad

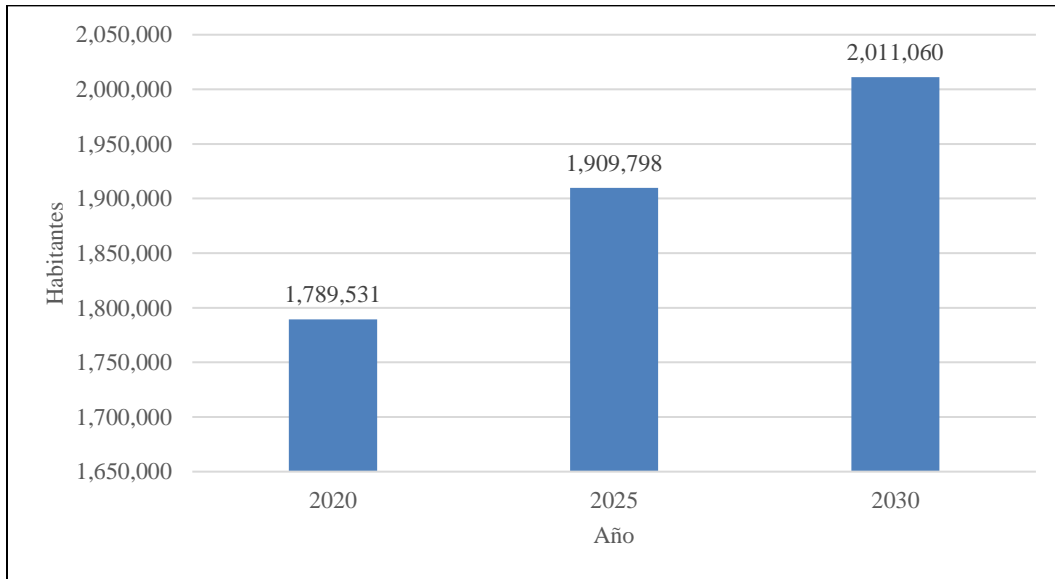
Datos recopilados del Centro Nacional de Prevención de Desastres Inundaciones, 2019. Elaboración propia.

De acuerdo con la Tabla de *Eventos que han generado los mayores daños por inundación en México de 1943 a 2004*, (CENAPRED, n.d.) estas lluvias fueron incluidas y se registraron los datos de la *tabla 1*.

I.4.4 Tijuana y su proyección hacia al 2030

En los años posteriores el crecimiento de la ciudad fronteriza continuó de tal manera que para el año de 2015 contaba con una población de 1 millón 641 mil 570 habitantes (INEGI, 2015a) en comparación a los 747 mil 381 con los que contaba al inicio de la década de 1990 (INEGI, 1990), esto la convierte en la ciudad más poblada del noroeste mexicano. Se estima que para 2020 la población ronde en 1 millón 789 mil 513 habitantes y en 2030 ascienda alrededor de los 2 millones 11 mil 60 tijuanaenses (CONAPO, 2015).

Figura 8. -
Proyección de población en Tijuana.



Proyección de población para el municipio de Tijuana con información del Consejo Nacional de Población.
Elaboración propia.

El IMPLAN menciona en el “*Programa de desarrollo urbano del centro de población de Tijuana 2008-2030*” que para hacer frente a la demanda de vivienda por incremento poblacional y rezagos existentes para el 2015, se debieron haber desarrollado 17,495 viviendas anualmente, de las cuales 6,292 viviendas serían para abatir el rezago y 11,204 viviendas por incremento poblacional. Asimismo, se debieron considerar aquellas viviendas localizadas en zonas no aptas para su desarrollo, por lo que el requerimiento total de vivienda se incrementara

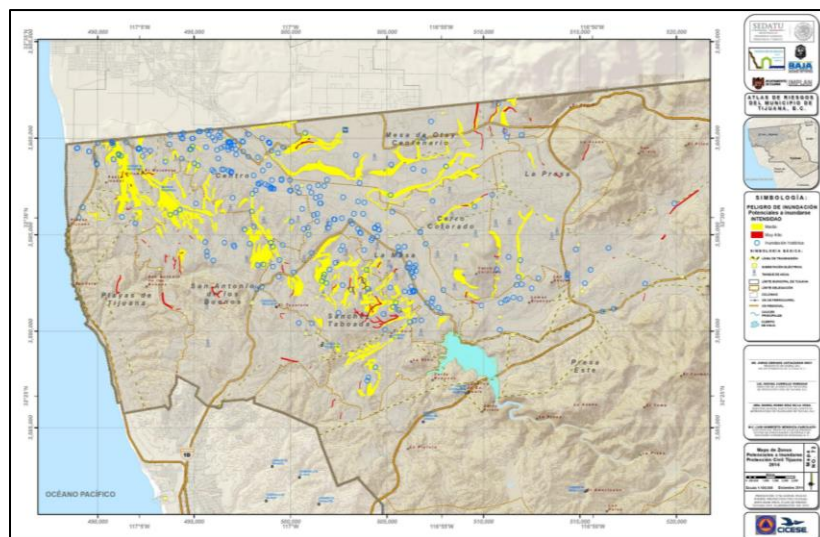
(IMPLAN Tijuana, 2010) esto con el fin de lograr un equilibrio para el año 2030.

Como es notorio desde hace años, Tijuana es un punto receptor de migrantes tanto nacionales como internacionales que por gran variedad de factores terminan viviendo en la ciudad de forma permanente. La falta de una planeación integral que vaya en orden con el ritmo de crecimiento poblacional provocado por los fenómenos migratorios y las necesidades socioeconómicas que esto demanda ha provocado que existan esos grandes rezagos de vivienda. Las “invasiones” en la ciudad de Tijuana se han hecho cada vez más comunes, a tal grado que ya es incluso parte de la cultura de la urbe.

I.4.5 Investigaciones anteriores

Tomando en cuenta la información que está libre al público y a la cual se ha podido acceder por medio del “Atlas Municipal del Riesgos” de Tijuana, elaborado por protección civil en el 2014, ellos utilizaron la metodología del CENAPRED para hacer un mapa de peligro por inundación. Es interesante resaltar que, según el mapa, las zonas en las inmediaciones del Río Tijuana no presentan peligro alguno, a pesar de que la misma información histórica localiza gran cantidad de inundaciones en el área.

Figura 9. -
Mapa de riesgo por inundación según Protección Civil.



Mapa de riesgo por inundación en la ciudad de Tijuana. Elaborado por Protección Civil en coordinación con diversas instancias en el año de 2014.

I.5 Objetivo general

Identificar las principales áreas de riesgo por inundación en las inmediaciones de los principales escurrimientos que alimentan el Río Tijuana dentro de la zona urbana por medio de un modelo digital de inundación para tener una proyección de la afectación a nivel social.

I.6 Objetivos específicos

- Ubicar áreas que se verían afectadas con mayor severidad ante inundaciones provocadas por un fenómeno hidrometeorológico.
- Crear un parámetro para cuantificar el riesgo por inundación tomando en cuenta factores sociales.
- Determinar la población estimada que se vería afectada ante una precipitación extraordinaria.
- Determinar la cantidad de viviendas afectadas y sus características.
- Crear un mapa de riesgo por inundación tomando en cuenta los niveles de severidad y de marginación de cada AGEB urbano y rural.

I.7 Marco Teórico

1.7.1 Inundaciones

Podemos definir una inundación como un fenómeno en el que el agua extiende su cobertura a lugares donde en condiciones normales no está presente. Las inundaciones pueden ser provocadas por diversos factores entre los cuales podemos mencionar el oleaje marino, las mareas de tormenta, el fallo en alguna infraestructura hidráulica y la provocada por eventos hidrometeorológicos.

Desde la perspectiva de la actividad humana observamos que la urbanización y a su vez el aumento en la demanda de recursos naturales y de infraestructura para satisfacer las necesidades de la población son los principales propiciadores de las condiciones ideales para una inundación. La destrucción de la vegetación permite con mayor facilidad el arrastre del suelo donde antes no sucedía, favoreciendo el azolve y la erosión y obstaculizando infraestructura pluvial. Por otro lado, las obras civiles de las ciudades, tales como las vialidades, edificios, explanadas y demás construcciones hechas generalmente de concreto o en su caso de asfalto hacen el suelo impermeable impidiendo la correcta infiltración dejando en la superficie mayor cantidad de agua.

Los desastres por inundación pueden ser provocados principalmente por dos categorías, fluviales y pluviales. El ser fluvial significa que ésta fue provocada por el desborde de algún río o alguna infraestructura hidráulica o barrera natural que actúan como contención, pasando el agua de estar contenida a dispersarse en las inmediaciones.

La pluvial es provocada por las precipitaciones que superan la capacidad de infiltración del suelo y hace que el agua se acumule en la superficie.(CENAPRED, 2019)

La inundación fluvial tiende a ser de mayor profundidad trayendo enormes impactos negativos en

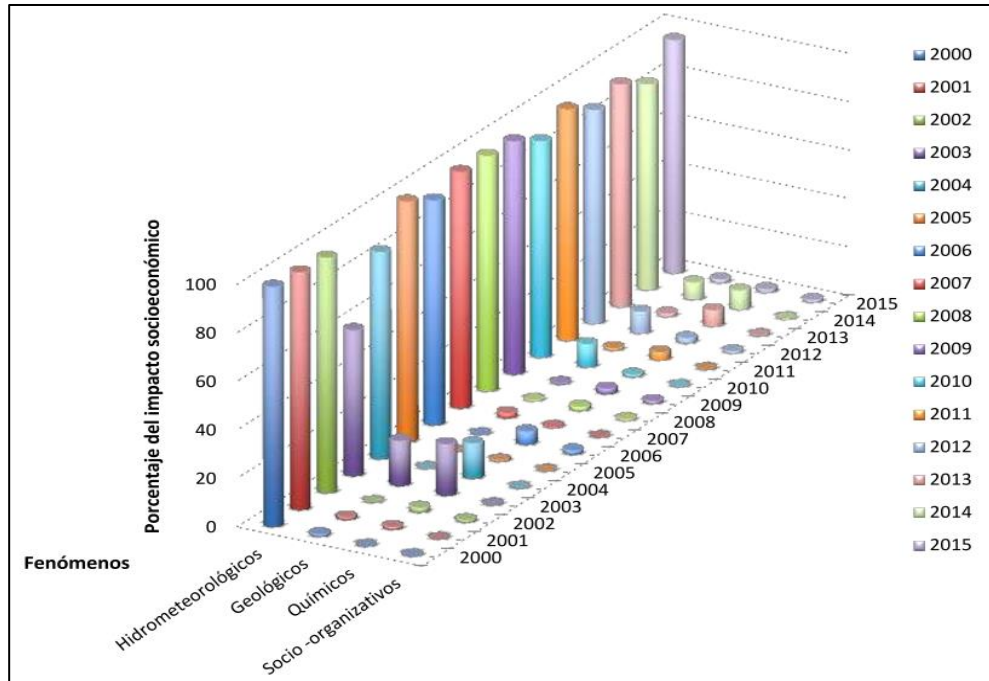
las áreas circundantes. Por otro lado, la inundación pluvial suele ser de profundidades relativamente bajas, pero con una extensión mucho mayor a la de una fluvial y es ahí donde se debe prestar atención pues ambas con sus características a pesar de ser opuestas tienen la capacidad de generar impactos muy parecidos.

Es común mitigar en ciertas áreas, sobre todo en el sur de México, el riesgo por la parte fluvial con infraestructura de contención como diques, sin embargo, aún en esas condiciones la pluvial sigue presentando riesgos para la zona en cuestión. Es por eso que se sugiere que, en el contexto urbano, se le debe dar la misma importancia a la mitigación del riesgo por inundación pluvial que a la fluvial, siendo este último el que comúnmente se hace por la relación que mantiene esta última con la magnitud e impacto devastador. (Tanaka et al., 2020).

I.7.2. Impacto de las inundaciones en México y en el mundo

Los impactos socioeconómicos derivados de fenómenos hidrometeorológicos son en su conjunto los más cuantiosos en comparación con el resto de los fenómenos (geológicos, químicos y socio-organizativos) (*ver figura 9*). Se estima que en México cada año en promedio estos representan pérdidas de 23,383.09 millones de pesos y 171 decesos (CENAPRED, 2016).

Figura 10. –
Porcentaje del impacto económico por desastres (2000-2015).

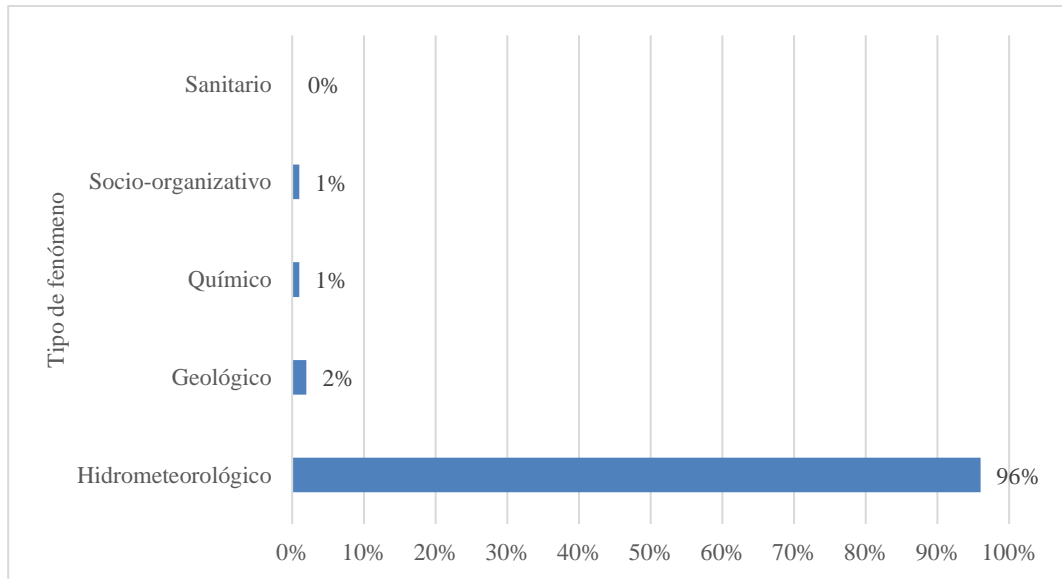


Los datos de 2015 están en versión preliminar y sujetos a revisión.

Fuente: Impacto socioeconómico CENAPRED, 2016.

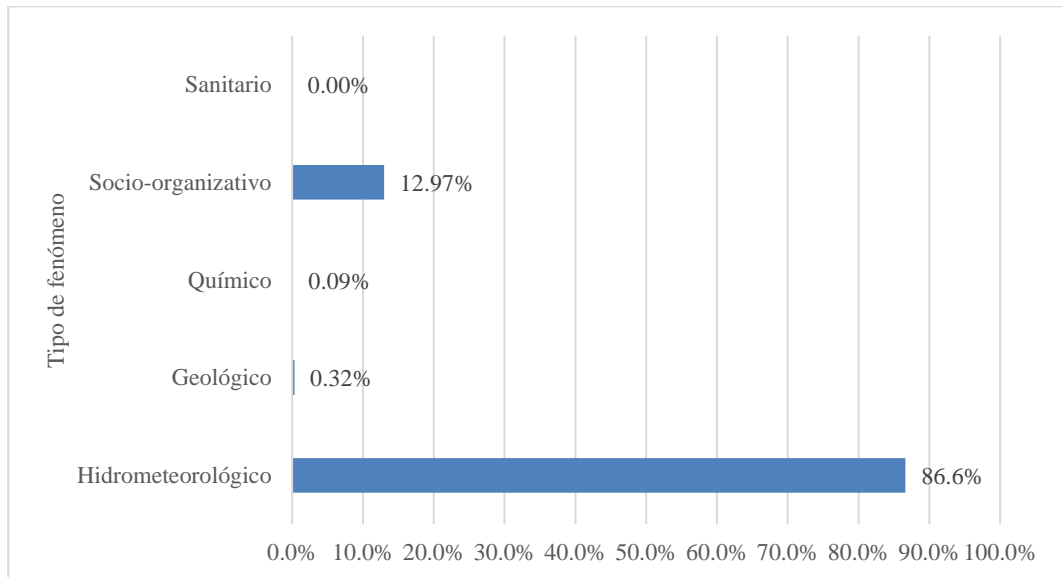
Tan solo en 2015 del 100% de daños y pérdidas generadas en México le correspondieron 96% a los fenómenos hidrometeorológicos (*figura 10*), dentro de los cuales el 44% del impacto fue ocasionado por lluvias fuertes y el 18.4% por inundaciones.(CENAPRED, 2015). Si bien, para el 2016 este porcentaje disminuyó al 86.62% (*figura 11*), la cantidad no deja de ser alarmante, pues se registraron 135 defunciones, 5 millones 264 mil 233 ciudadanos afectados, 23 mil 233 viviendas y 7 mil 477.8 hectáreas dañadas, sumando un total de pérdidas de 11, 947.8 millones de pesos.(CENAPRED, 2018).

Figura 11. -
Porcentaje de daños y pérdidas generadas por tipo de fenómeno en 2015.



Datos tomados del Impacto socioeconómico de los desastres en México, CENAPRED, 2015. Elaboración propia.

Figura 12. -
Porcentaje de daños y pérdidas generadas por tipo de fenómeno en 2016.

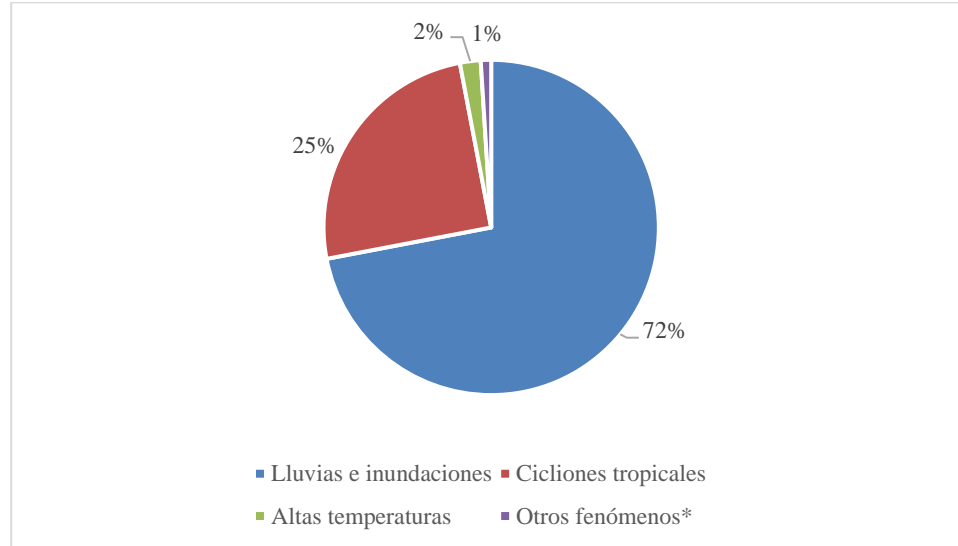


Datos tomados del Impacto socioeconómico de los desastres en México, CENAPRED, 2016. Elaboración propia.

Enfocándonos exclusivamente en los fenómenos hidrometeorológicos, en el 2016 los fenómenos hidrometeorológicos se comportaron de acuerdo con las *figuras 12 y 13*

Figura 13. -

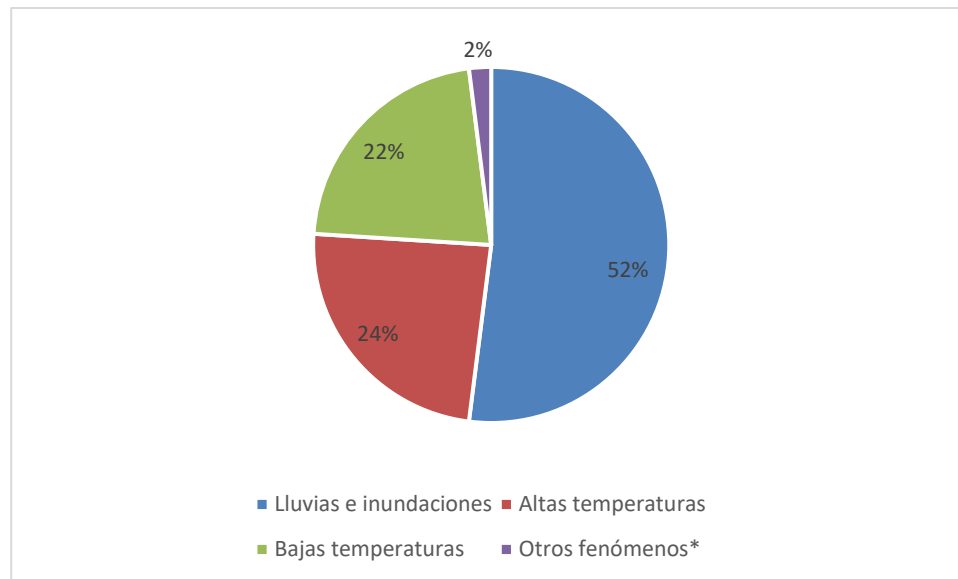
Porcentaje de daños y pérdidas por fenómenos hidrometeorológicos, 2016.



*Vientos fuertes y tormentas severas. Datos tomados del Reporte de impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana 2016 del CENAPRED. Elaboración propia.

Figura 14. -

Porcentaje de decesos por tipo de fenómeno hidrometeorológico en 2016.

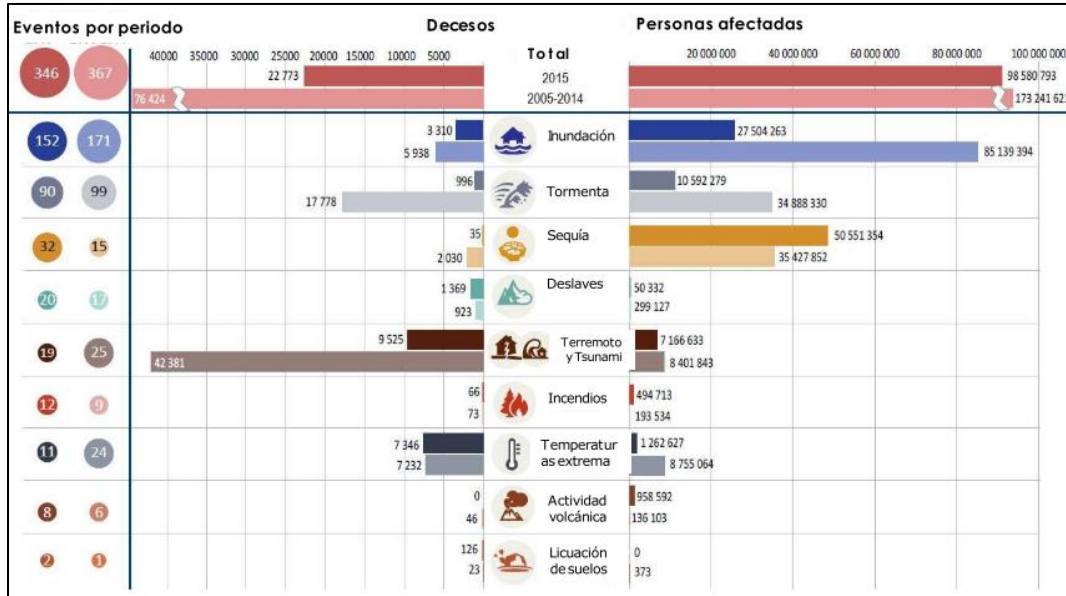


*Vientos fuertes y tormentas severas. Datos tomados del Reporte de impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana 2016 del CENAPRED. Elaboración propia.

En 2016 las lluvias e inundaciones acumularon la mayor proporción de afectaciones con 71.7% (8571.2 millones de pesos)(CENAPRED, 2018).

Según los datos de la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastre que recopiló el Centro Nacional de Prevención de Desastres se muestra como los fenómenos de inundación representaron del 2005 al 2014 la mayor afectación de personas a nivel mundial, aproximadamente 85 millones 139 mil 394 seres humanos (*ver figura 14*).

Figura 15. -
Afectaciones de las inundaciones en la vida humana (2005-2014 vs. 2015).



Tomado de Reporte de impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana 2016 del CENAPRED. Fuente: Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción de los Riesgos de Desastre. 25 de enero de 2016.

Tanto a nivel nacional como internacional es evidente notar que las inundaciones representan un fuerte impacto socioeconómico. Según la Organización de las Naciones Unidas, por medio de la Organización Mundial de la Salud se menciona que “*el impacto en las infraestructuras sanitarias y demás sistemas esenciales para la supervivencia puede ser enorme y ocasionar escasez de alimentos e interrupción de servicios de salud pública básicos, como el abastecimiento de agua*”(Global Health Organization, 2020), “los fenómenos hidrometeorológicos son las amenazas que más personas afectan, ocurren más continuamente y más pérdidas generan”(Torres, 2020).

También menciona en su artículo “*Acción sanitaria en las crisis humanitarias: inundaciones*” que algunos de los factores que aumentan la vulnerabilidad ante un fenómeno de este tipo son:

- Asentamientos situados en llanuras aluviales.

- Edificios y cimientos no resistentes.
- Ausencia de sistemas de alarma y de concienciación sobre el peligro de inundación.
- Escasa capacidad de la tierra para absorber la lluvia, por ejemplo, debido a la erosión o al revestimiento con cemento.

I.7.3 Fenómeno del niño

El término “El Niño” inicialmente fue como se le denominó a un ligero aumento en la temperatura superficial del mar a lo largo de las costas del Perú y Ecuador, que se observaba cercano a las fiestas decembrinas de Navidad (de ahí el nombre “El Niño” en clara referencia religiosa al nacimiento del Niño Jesús). Los científicos comenzaron a referirse al fenómeno como ENSO (por sus siglas en inglés, El Niño Southern Oscillation)(Winckell et al., 2005).

En las últimas décadas, se ha podido observar cómo este calentamiento se presenta en una región mucho más extensa que se extiende desde el Océano Pacífica central hacia el Océano Pacífico tropical del este, a lo largo de la línea ecuatorial modificando patrones climáticos globales(Coordinación Estatal de Protección Civil Baja California, 2019), siendo parte fundamental del sistema global climático, resultado de una fluctuación interanual del sistema Océano-Atmosférico en el Océano Pacífico Ecuatorial. Tiene tres fases. Cálida (El Niño), Fría (La Niña) y Neutral, siendo esta última la fase donde el océano se comporta de manera normal.

El Niño y la Niña según la Organización Mundial Meteorológica son condiciones anómalas en la temperatura superficial del mar en el Pacífico tropical del este (siendo anómalo una variación de 0.5° C o más o a la inversa) por encima o debajo de la media del periodo 1971-2000, durante un trimestre y debe permanecer al menos 5 trimestres con esas condiciones.

Según la Coordinación Estatal de Protección Civil (Baja California) en su documento “Fenómenos hidrometeorológicos” se detalla que uno de los efectos de “El Niño” es el

sobrecalentamiento de la capa superior del Océano Pacífico frente a la península de Baja California. Ante un evento intenso, se pueden presentar aumentos en las intensidades de precipitación.

Figura 16.-
Fenómeno meteorológico de “El Niño”.

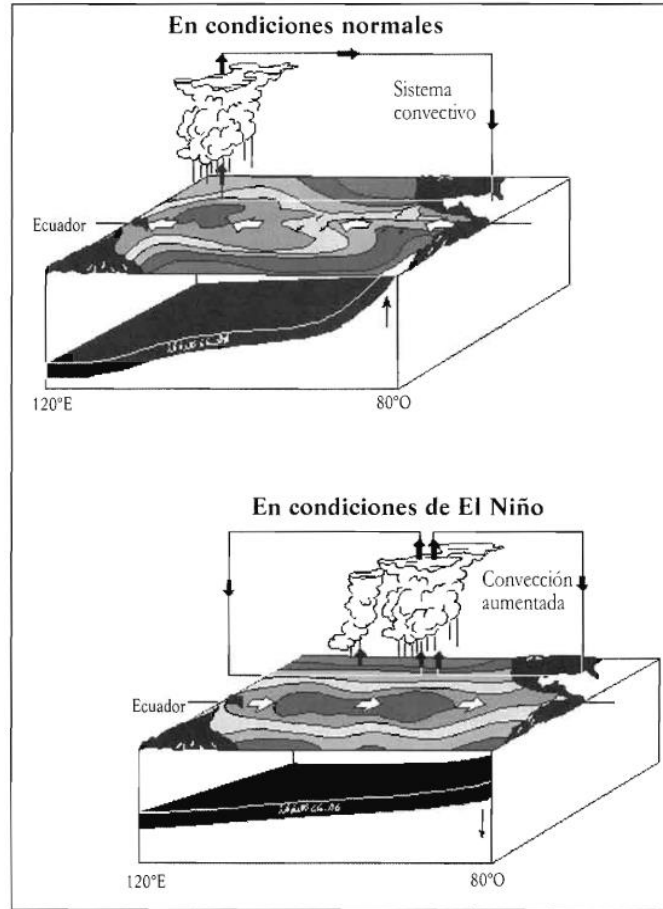
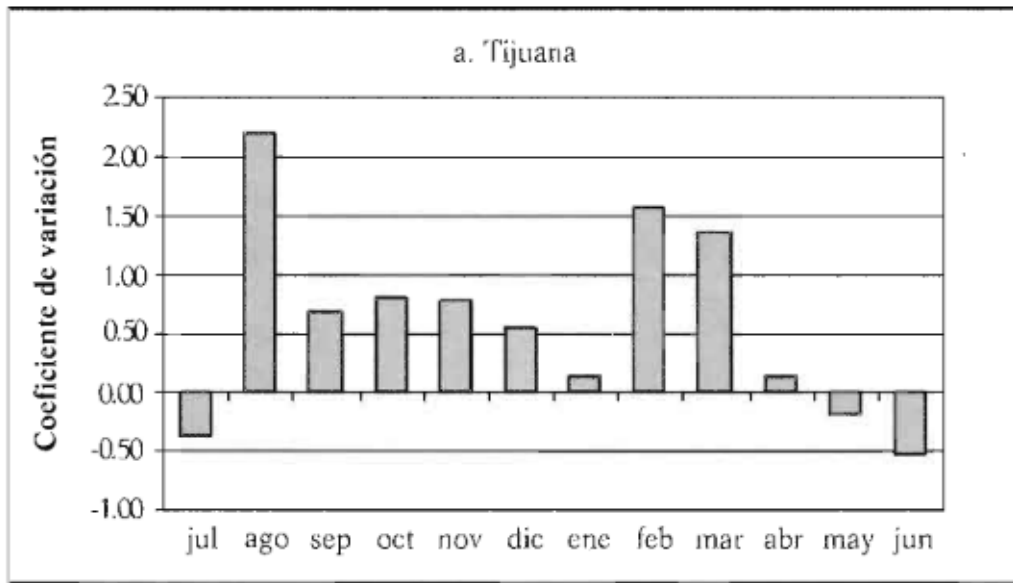


Diagrama esquemático del comportamiento de condiciones normales y condiciones de El Niño en el Océano Pacífico Fuente: (NOAA, n.d.) *Schematic diagrams of El Niño and Normal Conditions*

En el caso de Tijuana “Los Niños afectan, en promedio, lluvias que durante el invierno normal tienen una variación de 74.8 por ciento” (Winckell et al., 2005).

Figura 17. -

Coefficientes de variación entre temporada normal y temporada “El Niño”.

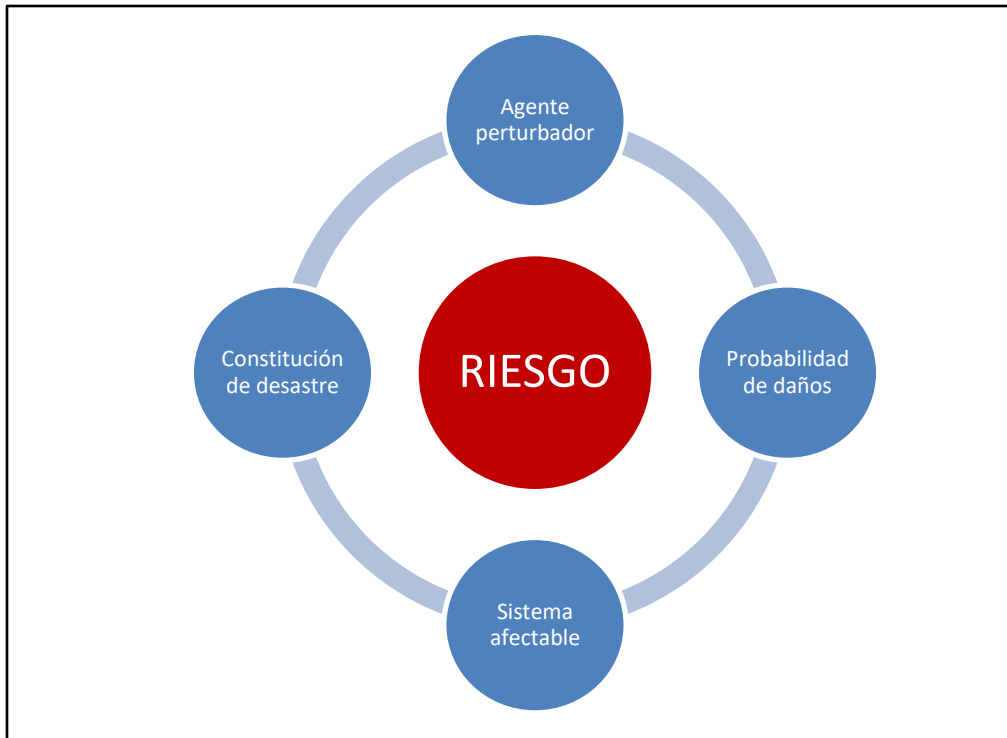


Fuente: Cincuenta años de la historia pluviométrica en Tijuana, 2005, p.19, (Winckell et al., 2005)

1.7.4 Riesgo

El riesgo es un tópico muy común de tratar en las instituciones y todo lo relacionado a la protección civil a nivel nacional e internacional y no es para menos pues dentro de su campo semántico hay conceptos muy importantes que deben ser tomados en cuenta cuidadosamente para que pueda existir un buen desarrollo humano en los diversos centros de población, pues uno de los puntos de partida para abordar el concepto es que está relacionado directamente con las actividades humanas.

Figura 18. -
Mapa semántico de riesgo.



Mapa semántico de conceptualización básica del riesgo, tomando conceptos de “Lineamientos generales para la elaboración de atlas de riesgos”(Guevara O. et al., 2014). Elaboración propia.

Cualitativamente, se entiende Riesgo “*como la probabilidad de ocurrencia de daños, pérdidas o efectos indeseables sobre sistemas constituidos por personas, comunidades o sus bienes, como consecuencia del impacto de eventos o fenómenos perturbadores*”(Guevara O. et al., 2014) y la probabilidad de que estos eventos ocurran en un área determinada se le denomina amenaza.

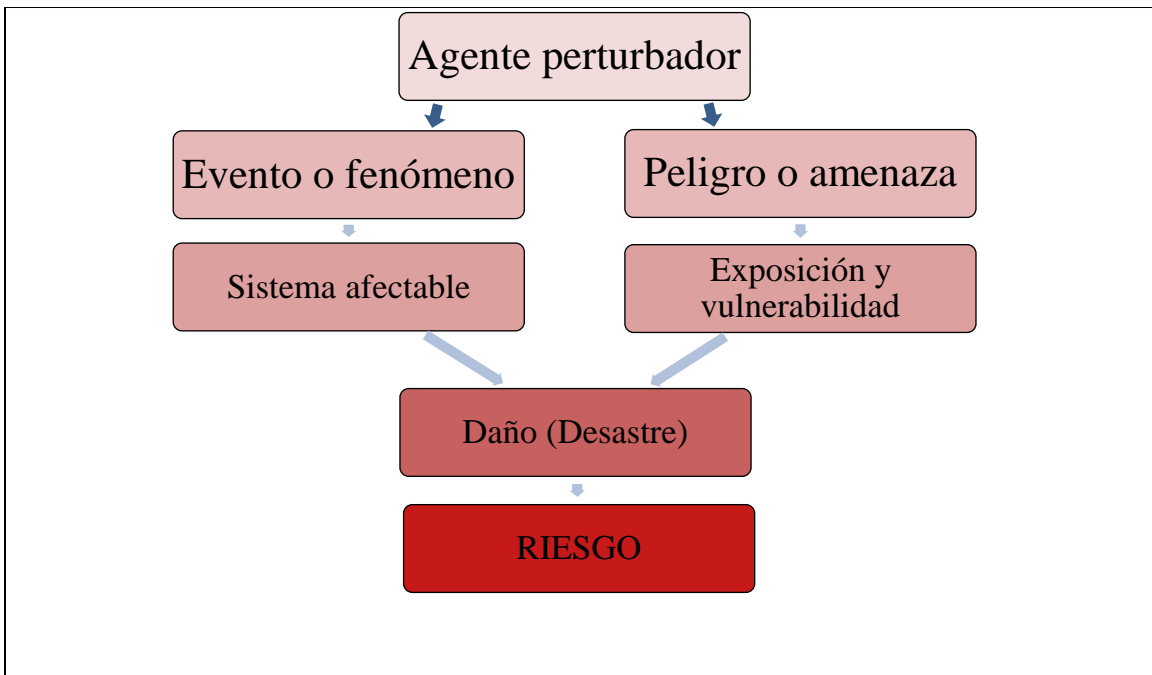
En términos cuantitativos una de las definiciones más aceptadas del riesgo se entiende como la función de tres factores: la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino, la vulnerabilidad el área de influencia y el valor de los bienes y valores que se encuentran expuestos ante tal evento o fenómeno (*ecuación 1*).

Ecuación 1.- Ecuación de riesgo.

$$\mathbf{Riesgo = f(Peligro * Vulnerabilidad * Exposición)} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 1)}$$

Donde f es frecuencia. Fuente: CENAPRED

Figura 19. -
Diagrama de riesgo.



Basado en esquema del CENAPRED, modificado. Elaboración propia.

1.7.4.1 Peligro

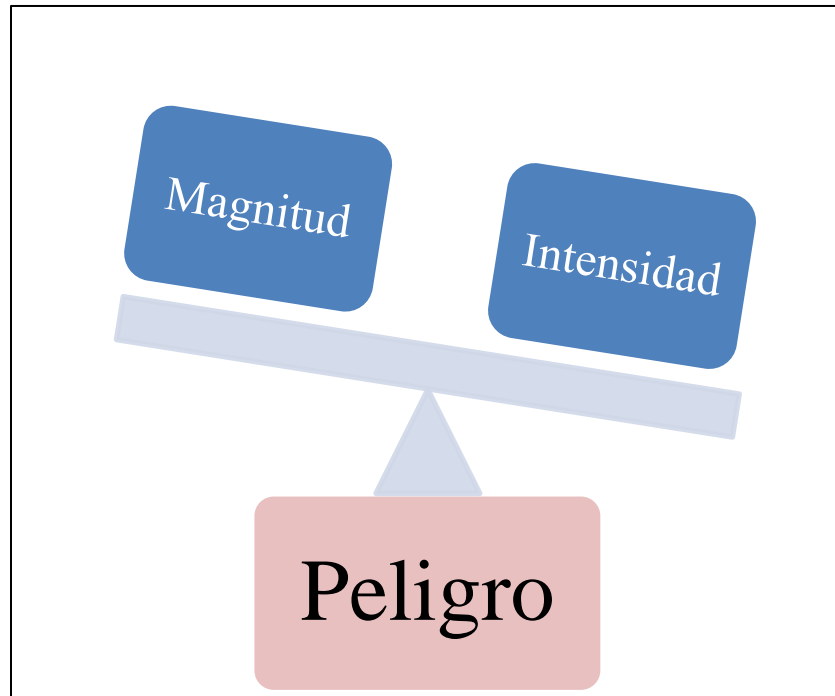
El peligro se define según el Centro Nacional de Prevención de Desastres como la “probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino de cierta intensidad, durante un cierto periodo de tiempo y en un sitio dado”.

Para un correcto estudio y análisis de este es importante definir en primer término cuál o cuáles son los fenómenos perturbadores e identificar dos parámetros que comúnmente se distinguen en los fenómenos; la intensidad y la magnitud.

La intensidad se refiere a la medida de la fuerza con la que se manifiesta un evento y ésta depende de las características particulares del sitio donde se está presentando que propician mayor o menor intensidad según sea el caso. La magnitud es un término utilizado para referirse al tamaño del fenómeno tomando en cuenta lo potencialmente destructivo que puede ser y la cantidad de energía que libera.

Por ejemplo, en un fenómeno hidrometeorológico como lo es una precipitación nos referimos a la magnitud cuando estamos hablando de la cantidad de milímetros de lluvia que se registran durante todo el evento desde su inicio hasta el fin. Por su parte la intensidad engloba la cantidad de lluvia que se precipita sobre unidad de tiempo (normalmente milímetros por hora). Es ahí donde se puede determinar realmente el peligro en estos casos pues puede que se presente una precipitación de gran magnitud en una ciudad, pero con una baja intensidad y si estamos en el supuesto de que se cuenta con una infraestructura promedio de drenaje pluvial, es muy probable que las afectaciones sean mínimas pues los escurrimientos se podrán dar con mayor facilidad al no haber mayor saturación en el sistema. Sin embargo, si la lluvia es de una magnitud moderada o baja pero la intensidad de muy alta esto provocaría una precipitación súbita que si bien, puede que dure poco y la cantidad de milímetros de lluvia sea menor en comparación al primer escenario planteado, al haber una mayor concentración en un menor periodo de tiempo es más probable que el sistema colapse, esa situación representa un mayor peligro y es por eso que por lo general el peligro se relaciona con la intensidad que con la magnitud de un fenómeno.

Figura 20. -
Balanza del peligro.



En la figura se visualiza el parámetro que en términos generales tiene mayor influencia para determinar si un evento es más o menos peligroso. Elaboración propia.

1.7.4.2 Vulnerabilidad

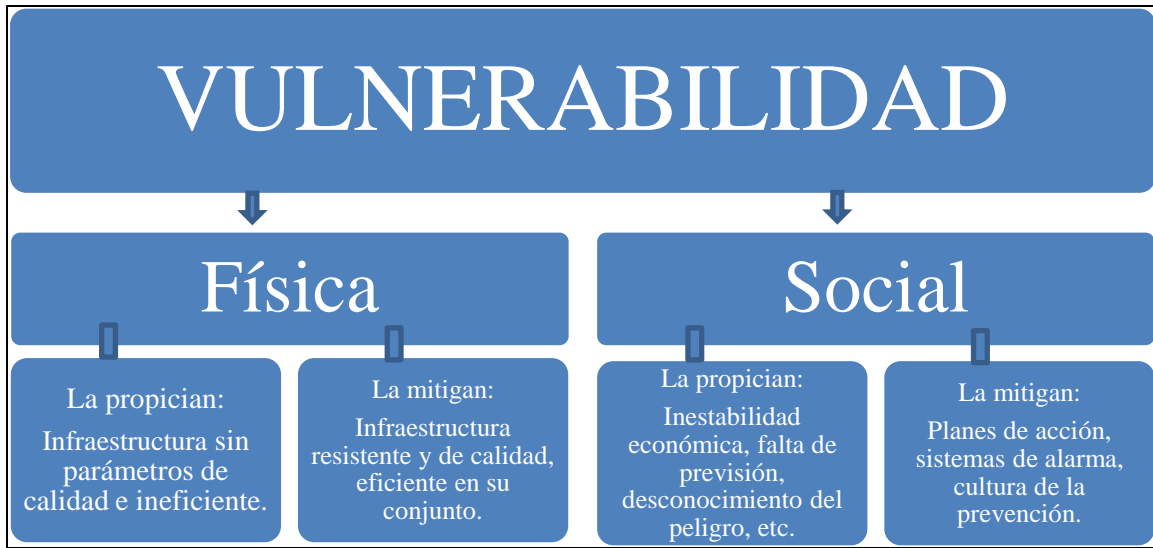
Para el CENAPRED la vulnerabilidad se define como “*susceptibilidad o propensión de los sistemas expuestos a ser afectados o dañados por el efecto de un fenómeno perturbador*” que se entiende como el grado de pérdidas que se puede esperar tras la manifestación de un evento de este tipo.

La vulnerabilidad en términos generales puede ser determinada por dos ejes, la vulnerabilidad física y la vulnerabilidad social. La primera se refiere, por ejemplo, al nivel de aislamiento que podría tener una construcción de presentarse una inundación, manteniéndose a salvo a sí misma y a sus ocupantes, es por eso por lo que es más sencillo analizarla en términos cuantitativos en relación con la cantidad, calidad y eficiencia de la infraestructura con la que se cuenta. Por su parte la vulnerabilidad social es un parámetro cualitativo de la comunidad que es

objeto de estudio en la que influyen los aspectos económicos, educativos, culturales, etc. Su cálculo es relativo pues depende del enfoque que el investigador desee darle y de la variabilidad de los diversos factores que influyen en el amplio concepto social. Para términos de este documento, la evaluación de la vulnerabilidad se basará en los aspectos primordialmente en los aspectos sociales y se tomarán algunas consideraciones menores de los aspectos físicos.

En el tenor de comprender los conceptos a mayor profundidad podemos hablar de un caso hipotético en el que una ciudad se ve afectada por una fuerte y súbita avenida de precipitaciones la cual puede generar importantes inundaciones. La vulnerabilidad física sería baja si se cuenta con un buen sistema de drenaje pluvial que permite la existencia de escurrimientos adecuados pues así la susceptibilidad de presentarse una inundación sería mínima. Asimismo, la vulnerabilidad social ante un fenómeno de tales características y magnitud podría decirse pequeña si la población que se encuentra en el área de exposición cuenta con planes operativos de evacuación ante contingencias, sistemas eficientes de alerta y en general una buena cultura de la prevención, pues en este caso una sociedad informada sabrá bien cómo actuar antes, durante y después del fenómeno.

Figura 21. -
Mapa conceptual de vulnerabilidad.



Resumen conceptual de algunos parámetros que influyen considerablemente en el aumento o disminución de la vulnerabilidad según su tipo. Elaboración propia.

1.7.4.3 Exposición

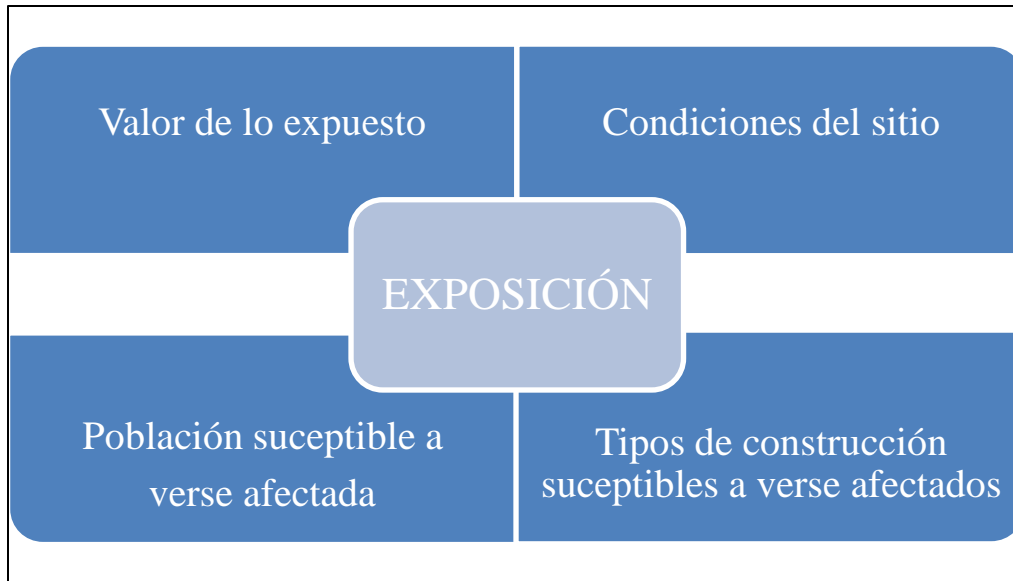
La exposición o grado de exposición se refiere a la “*cantidad de personas, bienes y sistemas que se encuentran en el sitio y que son factibles de ser dañados*”(CENAPRED, 2014). Generalmente el grado de exposición se cuantifica en términos monetarios pues es común que de esa manera se represente el valor de los daños que son provocados por un fenómeno, aunque no siempre es traducible en dinero, también puede ser representado por el número de personas que son propensas a verse afectadas.

Las sociedades se encuentran en constante desarrollo y crecimiento, esto implica que las condiciones en las que se encuentra un potencial sitio de desastre varían en función del tiempo. Entendiéndose que a mayor desarrollo y crecimiento hay una mayor demanda de infraestructura, bienes y servicios, entonces las inversiones necesarias al igual que la población concentrada son mayores, al ser el grado de exposición un parámetro que está estrechamente relacionado con estos conceptos, ante mayor sea el valor de lo expuesto, mayor es el riesgo que se enfrenta. Si el valor

de lo expuesto es nulo, el riesgo también lo será, sin importar la magnitud o intensidad del peligro. Es necesario entonces que se concentren esfuerzos en disminuir la exposición por medio de sistemas de alerta temprana que permitan una correcta evacuación ante una ocurrencia o en términos de urbanización, evitar el asentamiento en sitios propensos a recibir los efectos de un evento de este tipo.

Siguiendo la línea de las inundaciones, una comunidad que se encuentra asentada en una cañada, con mínima infraestructura de drenaje pluvial y con las características geomorfológicas que describe ese tipo de formaciones, sin importar que los edificios ahí construidos tengan altas especificaciones de resistencia, calidad y eficiencia, la exposición es muy alta debido a las condiciones del sitio. Es por eso por lo que los asentamientos humanos deben de ser planeados tomando en cuenta este importante factor que puede requerir altos costos de inversión ya sea para prevenir desastres o para mitigar los efectos provocados por los mismos. Para términos de este documento la exposición se basará primordialmente en la cantidad de personas que pueden verse afectadas por los fenómenos hidrometeorológicos de lluvias e inundaciones

Figura 22. -
Esquema de la exposición.



Conceptualización de los principales factores que influyen directamente en el grado de exposición de un sitio ante la presencia de un fenómeno. Elaboración propia.

Contando con una cuantificación razonable del peligro, la vulnerabilidad y el grado de exposición es necesario representar geográficamente las intensidades de los efectos de eventos extremos, pues resulta de gran utilidad para la realización de planes de inversión y planeación urbana, así como para darle difusión a los resultados por medio de información sencilla de entender para la población en general.

Figura 23. -
Esquema del riesgo.



Los factores que influyen en el nivel de riesgo y sus principales detonantes. Elaboración propia

1.7.4.4 Periodo de retorno

Una de las formas más comunes de representar probabilísticamente un fenómeno es en términos del “periodo de retorno” y su inverso la “tasa de excedencia”, que son “*el lapso que en promedio transcurre entre la ocurrencia de fenómenos de cierta intensidad*” y “*el número medio de veces, en que por unidad de tiempo, ocurre un evento que exceda cierta intensidad*” respectivamente.(Guevara O. et al., 2014). El concepto de periodo de retorno no implica que sea

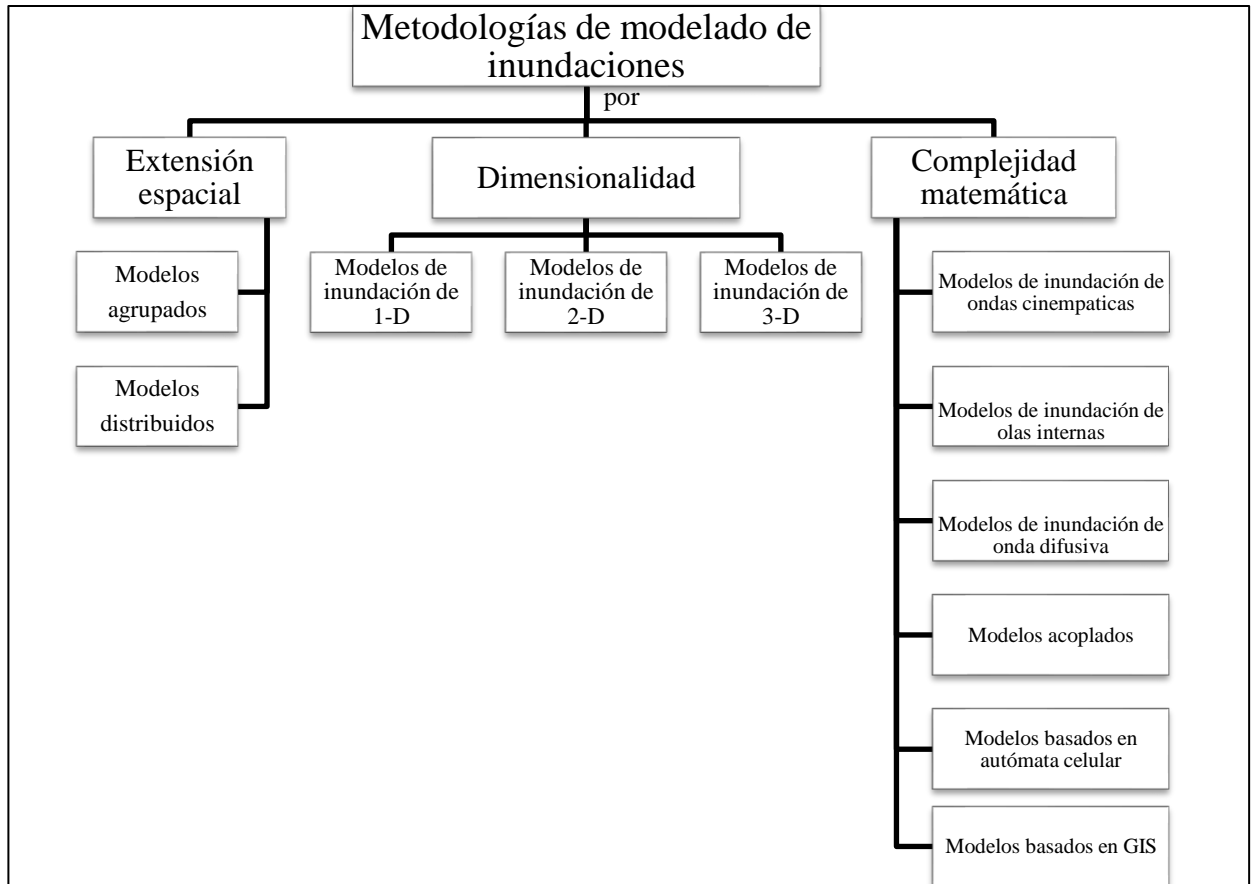
un proceso estrictamente cíclico, si bien se debe de basar en basta información distribuida a través de los años en la cual se pueden identificar ciertos patrones, no siempre debe transcurrir cierto tiempo para que el evento se repita. Cuando no se cuenta con suficiente información histórica para la representar el peligro en términos de periodos de retorno, se recurre a escalas cualitativas, buscando las representaciones más comunes y de mayor utilidad.

1.7.5 Modelos digitales de inundación

Un modelo digital de inundación en su esencia pretende representar el área que potencialmente se verá afectada por un escurrimiento, por lo general pluvial. Hay una gran variedad de métodos que van desde baja hasta alta complejidad en donde los factores que se involucran son más y de mayor precisión.

El modelado de las inundaciones urbanas provocado por precipitaciones pluviales en los países en desarrollo no ha recibido suficiente atención. Se han realizado algunos avances para mejorar el estado de los análisis y el seguimiento de las inundaciones en los países en desarrollo. Esto se debe potencialmente a la ratificación de varias iniciativas de desastres globales y en particular al impulso de la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR por sus siglas en inglés) que se basa en cinco pilares esenciales para lograr resultados positivos en la gestión de inundaciones y la resiliencia a nivel mundial.(Nkwunonwo et al., 2020).

Figura 24. -
Clasificación esquemática de metodologías de modelado de inundaciones.



Traducción propia. Fuente: (Nkwunonwo et al., 2020)

Algunos modelos unidimensionales son: HEC-RAS (Army Corps of Engineers,1995), ISIS-1D (CH2M HILL,2008) y Newer MIKE 11 (DHI, 1997); por su parte los bidimensionales: ISIS 2-D (CH2M HILL,2009), MIKE 21 (DHI).(Nkwunonwo et al., 2020)

1.7.6 Metodología del CENAPRED

La metodología para la elaboración de mapas de riesgo por inundaciones en zonas urbanas(Salas Salinas, 2011) publicada por la Subdirección de Riesgos por Inundación del Centro Nacional de Prevención de Desastres detalla que la metodología utilizada es la de HEC-RAS 1-D para flujos constantes.

Inicialmente se trabaja con los datos de elevaciones y trazos del cauce del escurrimiento en cuestión para posteriormente exportarlo a HecRAS. Le herramienta Hec-GeoRAS “*facilita la elaboración de mapas de inundación que muestran los límites de la Zona de inundación y los tirantes de la misma, creados con los resultados de la simulación que se exporta desde HecRAS*”(Salas Salinas, 2011).

Figura 25. -
Geometría de un cauce a ser simulado en HEC-RAS.

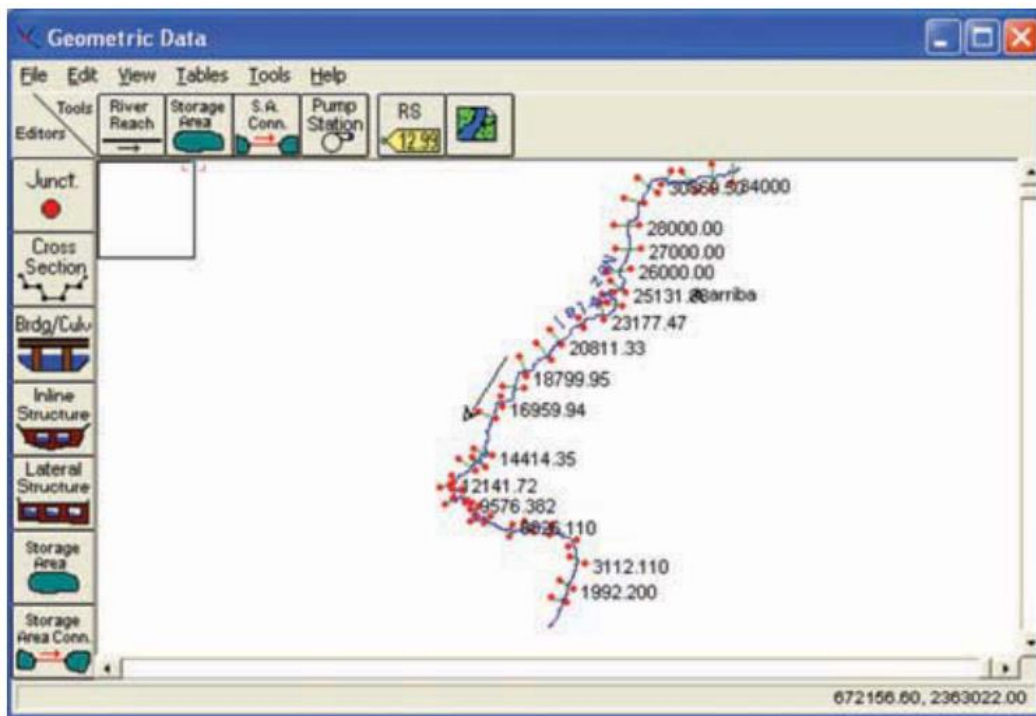


Imagen tomada de “Metodología para la elaboración de mapas de riesgos por inundación en zonas urbanas” (Salas Salinas, 2011).

Tabla 2.-
Descripción de características de modelado por HEC-RAS

Autor/ fecha	Nombre del modelo y dimensión	Supuesto principal	Marco matemático	Soluciones numéricas	Accesibilidad	Fortalezas	Limitantes
Army Corps Of Engineers/ 1995	Hidráulico 1-D	básicamente, el modelo resuelve la ecuación unidimensional de la energía para flujo constante. Sin embargo, puede resolver la ecuación unidimensional de aguas poco profundas completa para flujos inestables.	Ecuación de energía unidimension al para resolver la fricción y la contracción.	Solución implícita de diferencias finitas.	De libre acceso. Sin embargo, la asistencia está limitada para los miembros de la ACOE.	Documentación extensa, adecuada para una amplia gama de calidad de datos, fácilmente adaptable y fácil de configurar.	Inestabilidad del modelo y limitación en entornos que requieran modelado multidimensional

Se observa en la tabla información concisa sobre las características y los alcances del modelado de inundaciones utilizando método de HEC-RAS 1-D.
Fuente: (Nkwunonwo et al., 2020)

II. Metodología

El siguiente procedimiento está basado en el documento “*Metodología para la elaboración de mapas de riesgos por inundación en zonas urbanas*” elaborada por (Salas Salinas, 2011) y publicado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres y en el “*Curso pro investigación en inundaciones*” (García Carrera, 2018) que se impartió en el mes de marzo de 2018 en las instalaciones de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología de la Universidad Autónoma de Baja California, Campus Tijuana.

II.1 Cuenca del Río Tijuana

Para definir las características más importantes de la Cuenca del Río Tijuana es imprescindible apoyarse en el “Atlas de la Cuenca del Río Tijuana” (Wright & Vela, 2005) es por eso que la información descrita en la presente sección se ha detallado con base en el documento.

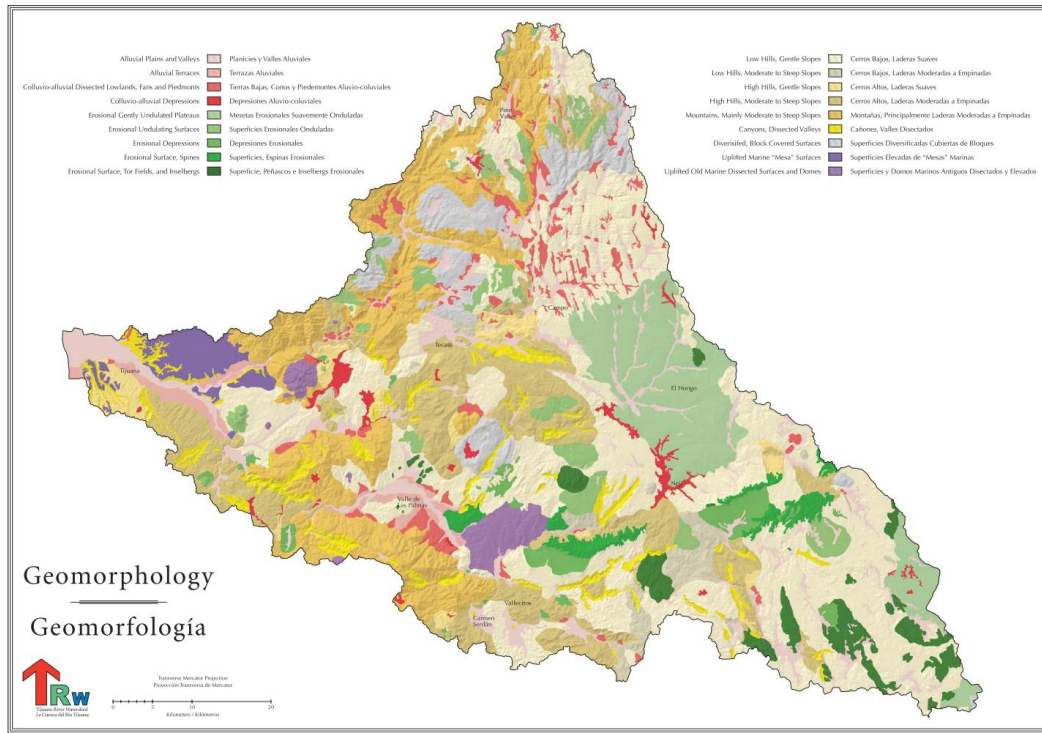
Prácticamente toda la ciudad de Tijuana se encuentra de la Cuenca del Río homónimo a excepción de algunas partes de la zona oeste, pero lo que resulta interesante es que el corazón financiero de la Ciudad de Tijuana se encuentra en una de las partes más bajas y cercanas al desemboque de todos los escurrimientos.

Figura 26. -
Localización de cuenca a analizar.



Cuenca del Río Tijuana en la región transfronteriza Tijuana-San Diego. Fuente: Google Earth.

Figura 27. -
Geomorfología de la Cuenca del Río Tijuana.



Fuente: Atlas de la Cuenca del Río Tijuana, (Wright & Vela, 2005)

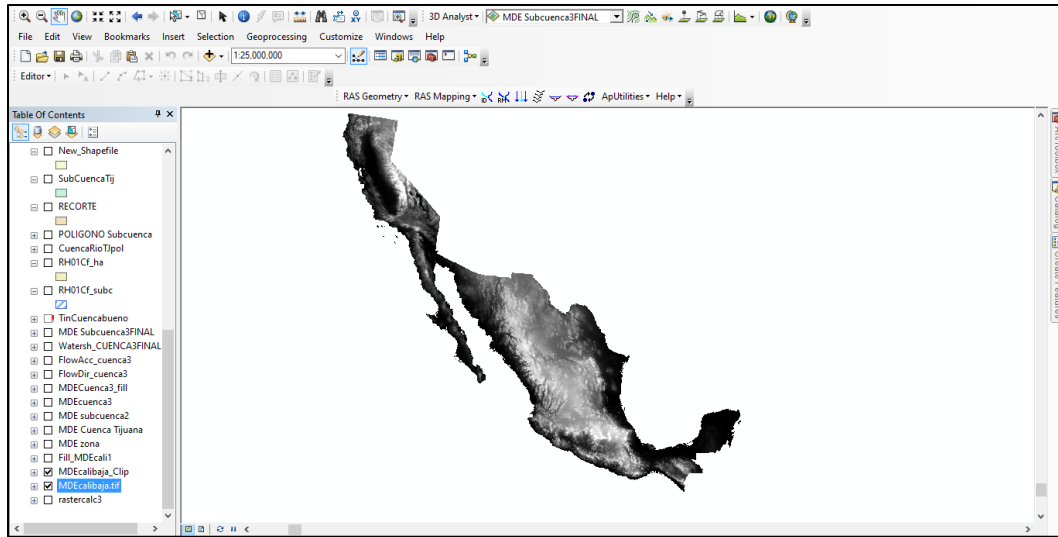
Si bien, el Río Tijuana es la conjunción de una larga lista de escurrimientos que vienen desde el noreste en Mount Laguna en Estados Unidos y del sureste del río San Pedro que inicia en Ensenada, en términos prácticos debido a la infraestructura existente al norte cómo al sur (Presa Barret y Presa Abelardo L. Rodríguez, respectivamente) consideramos necesarios hacer un replanteamiento la cuenca a analizar para ésta investigación debido a que ante una fuerte avenida de lluvias (sí y solo sí ambas infraestructuras se comportan de manera óptima y bajo sus capacidades de retención) los escurrimientos aguas arriba de sus cortinas se verán obstaculizados para continuar hacia el desfogue natural de la cuenca.

Para lo anterior fue necesario trabajar con el Sistema de Información Geográfica (GIS, por sus siglas en inglés) *ArcMap 10.5TM de ArcGIS®*.

II.2 Delimitación del área de subcuenca a estudiar

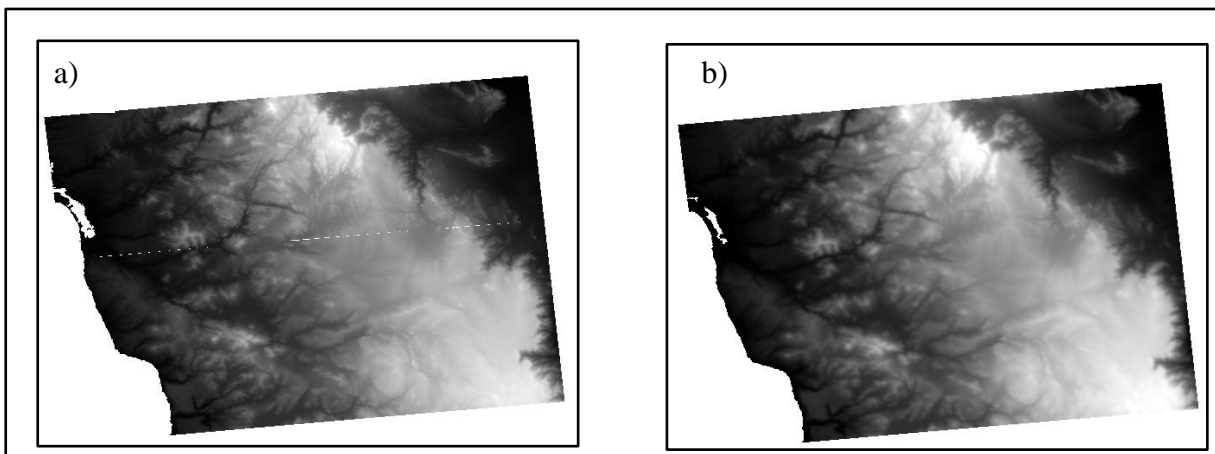
Es necesario comenzar con los Modelos Digitales de Elevación (MDE) para determinar con exactitud la cuenca y en su caso, subcuencas que conforman los principales escurrimientos que alimentan el gasto del Río Tijuana. Debido a que una tercera parte de la Cuenca del Río Tijuana está en territorio estadounidense, particularmente en el estado de California, es necesario unir la información de ambos gobiernos en un solo MDE por medio de la herramienta “Mosaic to New Raster” para poder continuar con el trabajo (*figura 27*). Sin embargo, al ser conjuntos de datos distintos es normal encontrar una disparidad en las secciones donde se presenta la unión como claramente se puede notar en la *figura* a justo a lo largo de la línea fronteriza entre las dos naciones. Para corregir esas diferencias se usa la herramienta “Raster Calculator” dándonos como resultado final un solo archivo ráster uniforme. (*figura 28 b*),

Figura 28. -
MDE de California y de México.



Modelos Digitales de Elevación el estado de California de Estados Unidos y de la República Mexicana.

Figura 29. -
Comparación de MDE antes y después.

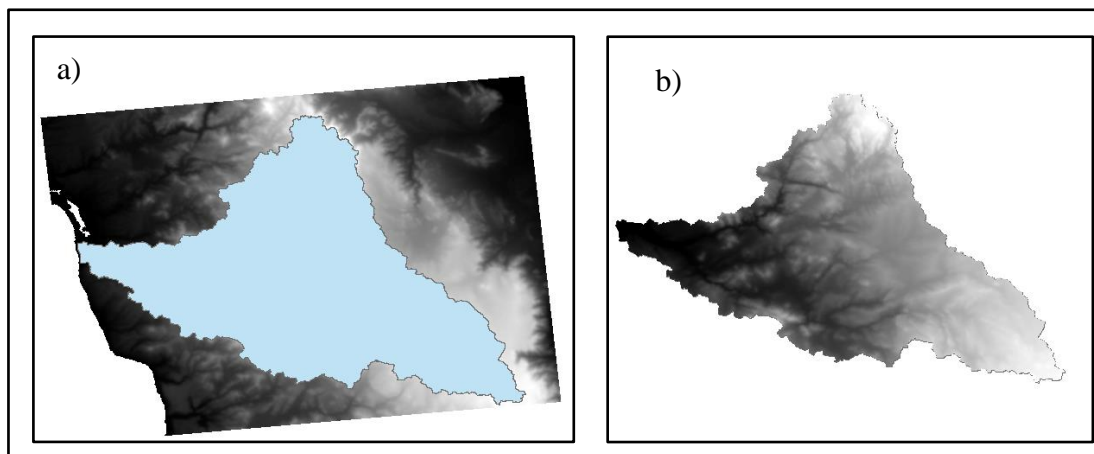


a) Se observa la línea divisoria de los dos MDE justo en la línea fronteriza, en donde hay una ausencia de datos; b) Los datos fueron generados por medio de una interpolación de ambos modelos con el fin de eliminar espacios vacíos. Elaboración propia.

Los datos de elevación con los que se cuentan por lo general son proporcionados en celdas de dimensiones definidas que en su conjunto (o en algunos casos en su totalidad) cubren ampliamente el área que se busca estudiar y sus alrededores. Para optimizar el procesamiento de

datos es necesario contar con un modelo de dimensiones exactas al polígono. En este caso siguiendo el orden lógico, conseguir los datos de elevación de la Cuenca del Río Tijuana es lo indicado (por medio de la herramienta “clip”) (*figura 29 a y b*) para posteriormente focalizarse aún más en una subcuenca contenida dentro de la principal, recordemos que esto considerando las presas Abelardo L. Rodríguez, Barret e incluso El Carrizo. Para realizar esta tarea de una manera más precisa es recomendable identificar de manera preliminar los principales escurrimientos de la cuenca en cuestión para tener una mejor visualización. Una herramienta muy útil para determinar parte de la subcuenca en el lado mexicano fue la plataforma SIATL(INEGI, 2010), la cual nos permitió delimitar los límites de la subcuenca desde las cortinas de la presa A.L.R. hasta la frontera con Estados Unidos (*figura 30 a, b, c y d*).

Figura 30. -
Delimitación de MDE de Cuenca del Río Tijuana.

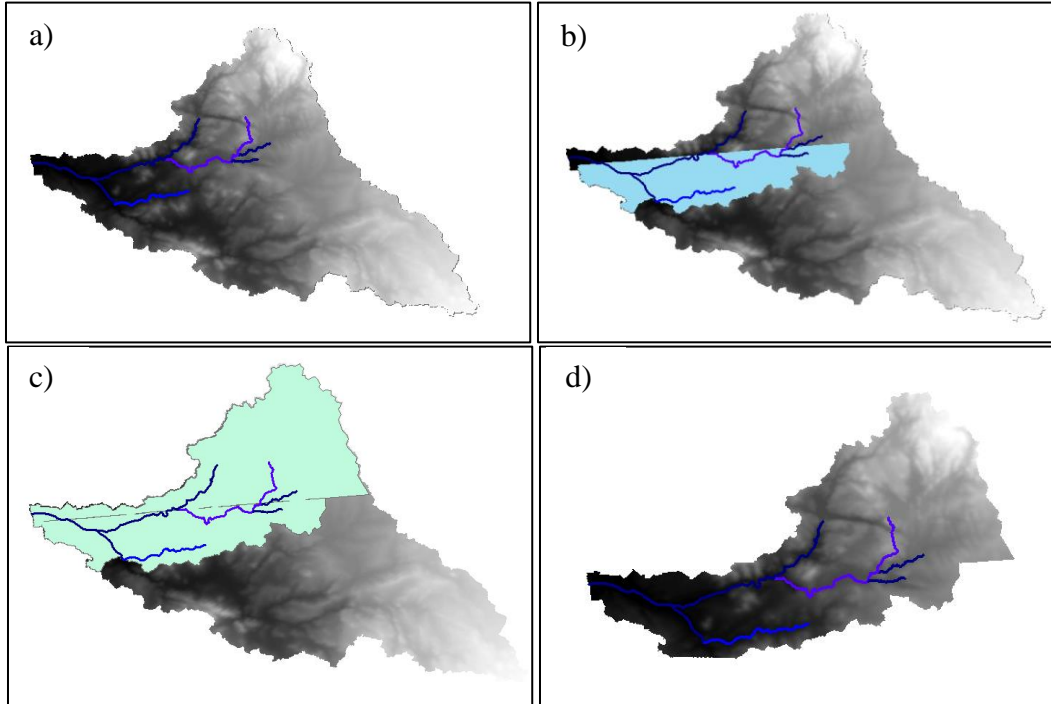


a) Polígono de la Cuenca del Río Tijuana sobre el MDE de la región; b) Obtención del MDE de la Cuenca del Río Tijuana.
Elaboración propia.

En la (*figura 30 c*) se observa cómo se traza una línea recta desde el polígono generado por SIATL (*figura 30 b*) hasta intersectar el contorno de la cuenca. Esto obviamente no implica que la subcuenca tenga ese contorno, pero nos servirá para tener un área más específica de trabajo durante

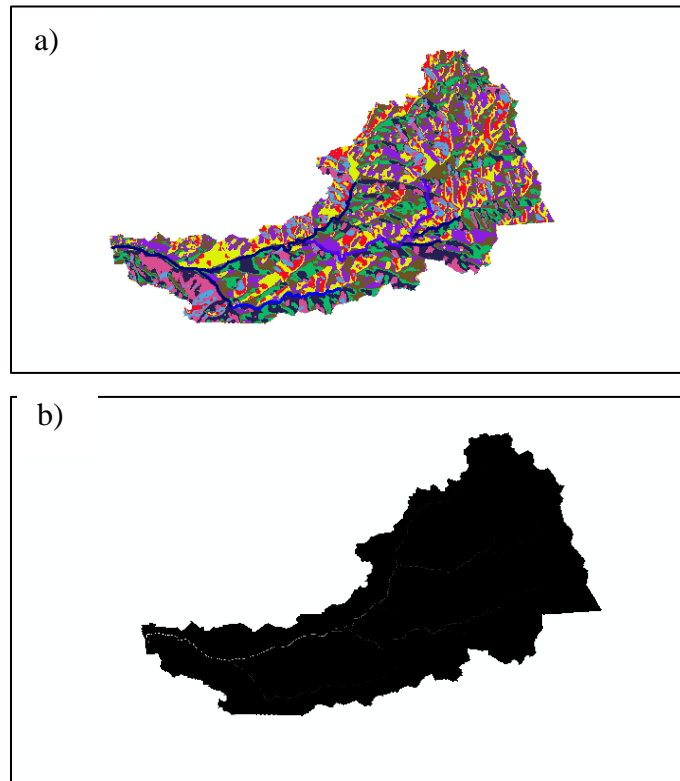
el proceso de la delimitación exacta de la subcuenca con las herramientas de *ArcMap*TM.

Figura 31. -
Proceso de identificación de subcuenca.



- a) Identificación de los principales escurrimientos que alimentan el Río Tijuana (desde las cortinas de las presas hacia aguas abajo); b) Se observa de azul la subcuenca en el lado mexicano generada por herramienta SIATL tomando en cuenta escurrimientos que parten desde la cortina de la presa A.L.R. hacia aguas abajo; c) Proposición preliminar de subcuenca;
- d) MDE de la subcuenca preliminar. Elaboración propia.

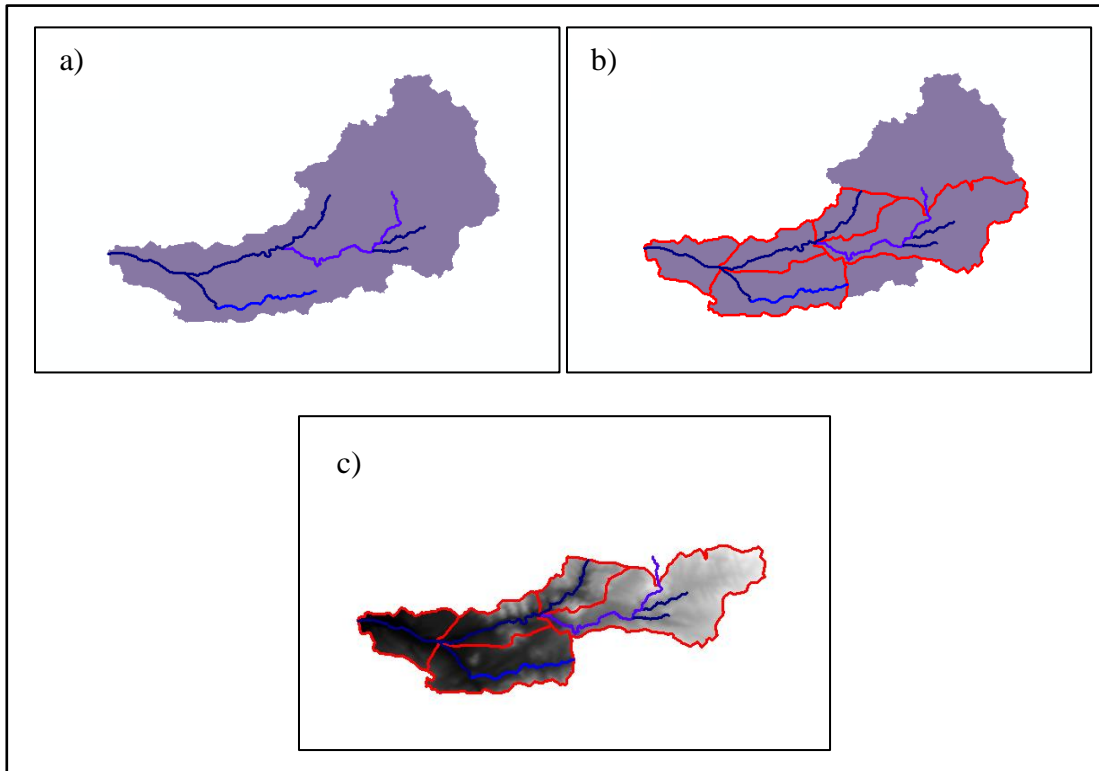
El primer paso para la obtención de la subcuenca exacta es la implementación de la herramienta “*Flow Direction*”, según el CENAPRED una de las claves para definir las características de una cuenca a través de un modelo digital de elevación, se basa en la correcta definición de la dirección del flujo. La opción “*Flow Accumulation*” calcula el flujo acumulado como el total acumulado de las celdas que confluyen hacia cada una de las celdas ubicadas aguas abajo, permitiéndonos visualizar los escurrimientos a través del MDE (*figura 31 a y b*).

Figura 32. -*Flow Direction y Flow Accumulation en subcuenca preliminar.*

a) Flow Direction; b) Flow Accumulation. Elaboración propia.

La delimitación de la subcuenca preliminar la hace el sistema basándose en la información del MDE por medio de la función “Watershed” pero recordando las obstrucciones de escurrimientos en la presa Barret al norte y en la presa El Carrizo al este, se requiere hacer un trazo manual con ayuda de las curvas de nivel o el mismo MDE para identificar de una mejor forma el parteaguas ante tales circunstancias tanto para la subcuenca final (la cual a partir del siguiente párrafo será determinada simplemente como “subcuenca”) como las microcuencas para cada uno de los escurrimientos en ella (*figura 32 a, b y c*). Esto último es primordial realizarlo en este punto pues esta información será necesaria para los cálculos y desarrollo del análisis de inundación, la cual requiere conocer el área de captación de cada uno de los escurrimientos para así calcular sus respectivos gastos.

Figura 33. -
Subcuenca preliminar, final y microcuencas.



a) Subcuenca preliminar determinada por medio de la función “Watershed”; b) Trazos de subcuenca de estudio y microcuencas de cada escurrimiento; c) MDE de subcuenca final. Elaboración propia.

II.3 Caracterización de la subcuenca

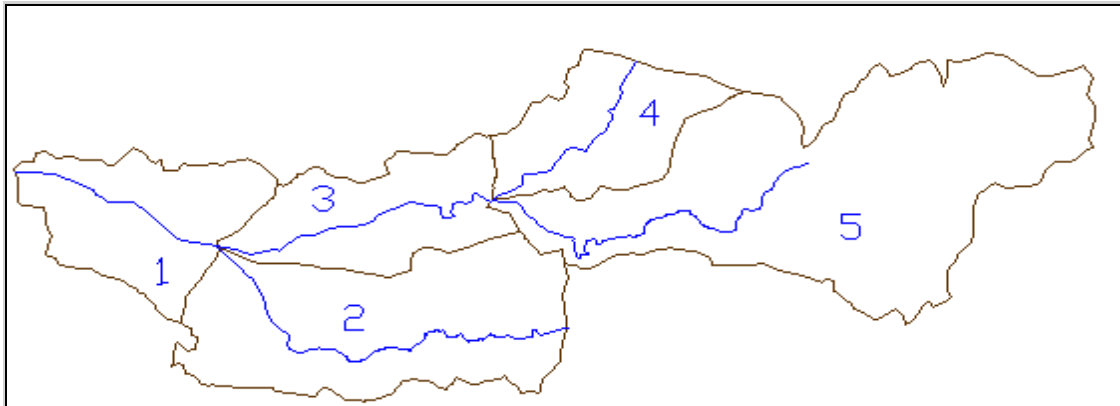
Los escurrimientos de la subcuenca se simplificaron en 5 principales (*figura 33*) y para efectos de esta investigación serán denominados según su punto de origen (*tabla 3*).

Tabla 3.-
Eskurrimientos de subcuenca.

Número de escurrimiento	Origen
5	Campo Lake
4	Barret Dam
3	Alamar
2	Presa el Carrizo
1	Río Tijuana

Elaboración propia.

Figura 34. -
Subcuenca, microcuencas y escurrimientos.



Subcuenca subdividida en microcuena para cada uno de los principales escurrimientos. Elaboración propia.

Tabla 4.-
Área de microcuencas y longitud de escurrimientos.

Microcuena	Área de microcuena (ha)	Longitud del escurrimiento (m)
1	15046.00	15851.00
2	28447.00	35455.00
3	14116.00	24203.00
4	12641.00	17955.00
5	46922.00	33197.00
Sumatoria	117172.00	126661.00

Elaboración propia.

Figura 35. -
Subcuenca y escurrimientos en imagen satelital.



Fuente: Google Earth. Elaboración propia.

Las rugosidades fueron dos distintas, consideradas según Manning, siendo 0.035 para las secciones sin canalización de concreto hidráulico y 0.013 para las secciones del canal del Río Tijuana y Arroyo Alamar.

La determinación de la pendiente es un factor que influye en la consideración del coeficiente de escorrentía “C” y el cálculo del Tiempo de concentración “tc”. Para su cálculo se utilizó la ecuación 2 con apoyo de curvas de nivel cada 20 metros (figura 35).

Ecuación 2.- Pendiente por método de Taylor y Schwarz.

$$S = \left[\frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{l_n}{\sqrt{S_n}}} \right]^2 \dots\dots\dots \text{(Ecuación 2)}$$

Método de Taylor y Schwarz para la obtención de la pendiente.

Donde:

S: Pendiente media del cauce principal, adimensional

L: Longitud total del escurrimiento

L_{1, 2, n}: Longitud de cada segmento

S_{1, 2, n}: Pendiente de cada segmento

Figura 36. -
Procedimiento de cálculo de pendiente promedio.

Cota inicial	Cota final	Longitud	Longitud	Desnivel	Si	(Si) ^{1/2}	li/(Si) ^{1/2}	S	A		P			
(msnm)	(msnm)	(m)	(km)	(m)				PENDIENTE	ÁREA	ÁREA	PERÍMETRO	PERÍMETRO	LONGITUD	LONGITUD
									m ²	km ²	m	km	m	Km
	200							0.006318945	1928040201	1928.04	272274.6886	272.2746886	17955.25	17.96
200	220	2668.23	2.67	20	0.0075	0.0866	30819.0978							
220	240	1065.77	1.07	20	0.0188	0.1370	7780.0378							
240	260	240.01	0.24	20	0.0833	0.2887	831.4119							
260	280	130.60	0.13	20	0.1531	0.3913	333.7373							
280	300	146.88	0.15	20	0.1362	0.3690	398.0453							
300	320	6620.08	6.62	20	0.0030	0.0550	120442.5024							
320	340	3774.86	3.77	20	0.0053	0.0728	51860.4206							
340	360	354.66	0.35	20	0.0564	0.2375	1493.4644							
360	380	216.17	0.22	20	0.0925	0.3042	710.6940							
380	400	578.06	0.58	20	0.0346	0.1860	3107.7314							
400	420	269.08	0.27	20	0.0743	0.2726	986.9871							
420	440	252.53	0.25	20	0.0792	0.2814	897.3368							
440	460	173.63	0.17	20	0.1152	0.3394	511.5755							
460	480	209.54	0.21	20	0.0954	0.3089	678.2509							
480	500	374.73	0.37	20	0.0534	0.2310	1622.0397							
500	520	233.44	0.23	20	0.0857	0.2927	797.5393							
520	540	306.63	0.31	20	0.0652	0.2554	1200.6332							
540	560	340.36	0.34	20	0.0588	0.2424	1404.0731							
		17955.25	17.96				225875.5787							

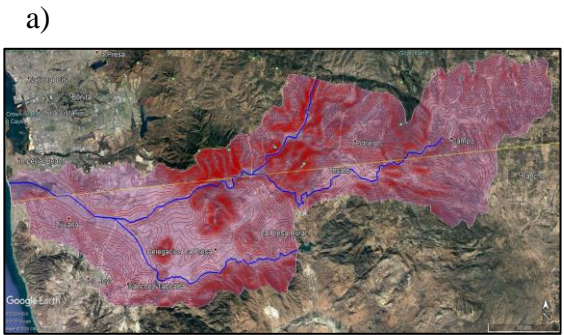


Tabla para el cálculo de la pendiente de un escurrimiento (escurrimiento 4) por Método de Taylor y Schwarz. a) Visualización de curvas de nivel de la subcuenca con escurrimientos tomada de Google Earth. Elaboración propia.

En el caso del coeficiente de escurrimiento se utilizaron las *tablas 5 y 6*.

Tabla 5.-
Coefficientes de escorrentía en zona urbana.

Tipo de superficie	Coeficiente de escorrentía	
	Mínimo	Máximo
Superficies de concreto	0.7	0.95
Parques	0.1	0.25
Superficies asfálticas	0.7	0.95
Zonas industriales densas	0.6	0.9
Zona comercial	0.7	0.95

Información tomada de (Azagra, 2006) referente a coeficientes según (Aparicio, 1999). Elaboración propia.

Tabla 6.-
Coefficientes de escorrentía en terreno natural.

COBERTURA DEL SUELO	TIPO DE SUELO	PENDIENTE (%)				
		> 50	20-50	5-20	1-5	0-1
Sin vegetación	Impermeable	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60
	Semipermeable	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	Permeable	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
Cultivos	Impermeable	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	Semipermeable	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	Permeable	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20
Pastos, vegetación ligera	Impermeable	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45
	Semipermeable	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	Permeable	0.35	0.30	0.25	0.20	0.15
Hierba	Impermeable	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	Semipermeable	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
	Permeable	0.30	0.25	0.20	0.15	0.10
Bosque, vegetación densa	Impermeable	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	Semipermeable	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25
	Permeable	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05

Tomada de (Azagra, 2006) referente a coeficientes según (Benítez et al., 1980).

Tabla 7.-
Resumen de características de microcuencas.

# de escurrimiento	Pendiente promedio S	Coefficiente C de escurrimiento promedio
1	0.0036	0.95
2	0.0053	0.95
3	0.0046	0.95
4	0.122	0.5
5	0.0063	0.55

Pendientes y coeficientes de escurrimiento promedio por escurrimiento. Elaboración propia.

El tiempo de concentración de una cuenca se refiere al periodo de tiempo necesario para que el gasto inicial se estabilice, ante una precipitación de intensidad constante sobre toda la cuenca. Para su cálculo se utilizó la *ecuación 3* del método de Kirpich.

Ecuación 3.- *Tiempo de concentración, método de Kirpich.*

$$t_c = 0.0663 \left[\frac{L}{\sqrt{S_c}} \right]^{0.77} \dots\dots\dots(Ecuación 3)$$

Donde:
 tc= Tiempo de concentración, en horas
 L= Longitud del cauce principal, definido como el mayor recorrido, en kilómetros
 Sc= Pendiente media de la cuenca, adimensional

Tabla 8.-
Tiempo de concentración por microcuenca.

Microcuenca	Tiempo de concentración (horas)
1	4.9
2	7.8
3	6.1
4	4.3
5	5.4

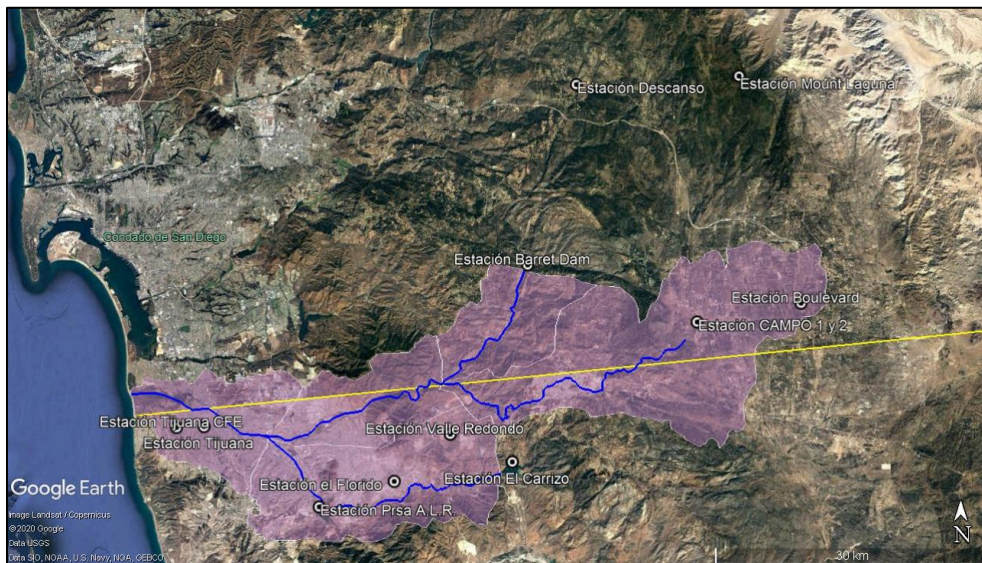
Elaboración propia.

II.4 Determinación de gastos de escurrimiento

II.4.1 Análisis de datos pluviométricos

La red pluviométrica de la región no cuenta con muchas estaciones activas y en pleno funcionamiento que proporcionen información histórica suficiente, en muchos estudios se ha tomado como referencia solamente la de la Presa Abelardo L. Rodríguez la cual cuenta con datos disponibles desde 1929 hasta 2012. Para este estudio se utilizó información de 12 estaciones pluviométricas, 6 del lado mexicano y 6 del lado estadounidense, esto con el fin de complementar la información y tomando en cuenta que dos de los escurrimientos de la subcuenca provienen de los Estados Unidos.

Figura 37. -
Ubicación de estaciones pluviométricas.



Fuente: Google Earth. Elaboración propia.

Tabla 9.-
Periodos de registro por estación.

País	Estación	Periodos de registro
México	Abelardo L. Rodríguez	1929-2012
	El Carrizo	1980-2012
	El Florido	1988-2012
	Tijuana	1948-1984
	Valle Redondo	1934-1937, 1970 y 1974-1990
	Tijuana CFE	1969-1980
	E.U.	Mount Laguna
Barret Dam		1980 y 2012
Campo 1		1981 y 1999-2018
Campo 2		1980-2018
Boulevard 2		1980, 1987, 1993-1994, 2004-2007 y 2015-2017
Descanso		1980-1998 y 2011-2018

Periodos con registros de precipitación de estaciones pluviométricas de la región. Elaboración propia.

Después de un análisis y tomando en cuenta que en las lluvias de 1993 “el mayor impacto fue generado por una precipitación de 50 mm de manera continua en menos de 24 horas”(Ayuntamiento de Tijuana, 2014a), se hace un compendio de las fechas con registros de precipitación mayores a 50 milímetros (*Tablas 10, 11 y 12*).

Además, se puede interpretar un notorio patrón de ciclos hidrológicos en la región, gracias a la gráfica de precipitaciones anuales de la estación pluviométrica de la presa Abelardo L. Rodríguez, como se observa en la (*figura 38*).

Tabla 10.-
Precipitaciones mayores a 50 mm, estaciones México.

Nombre de estación	Precipitación (mm)	Fecha
	53.5	01/11/1965
	76.3	01/01/1967
	55.5	01/12/1967
	63.2	01/01/1980
	65.8	01/03/1983
	51	01/12/1987
	68.5	01/02/1991
Abelardo L. Rodríguez	86.9	01/01/1993
	61.8	01/02/1995
	53.8	01/02/1998
	60	01/02/2004
	90	01/10/2004
	87	01/12/2008
	59.4	01/12/2009
	52.1	01/12/2010
	56	01/02/2011
	65	01/11/1965
Tijuana	53.6	01/12/1967
	54.5	01/03/1968
	80	01/11/1981
	52	01/03/1983
Tijuana CFE	71.2	01/09/1976
	57	01/03/1981
	51.9	01/02/1976
Valle Redondo	74.6	01/01/1978
	58.7	01/02/1978
	83	01/01/1980
	60	01/03/1983
	55	01/02/1991
	52	01/02/2004
El Florido	67	01/10/2004
	63.5	01/12/2004
	63.7	01/12/2008
	52.1	01/12/2010
	77.5	01/01/1980
El Carrizo	50.8	01/03/1995
	56.5	01/02/2004
	55.1	01/10/2004

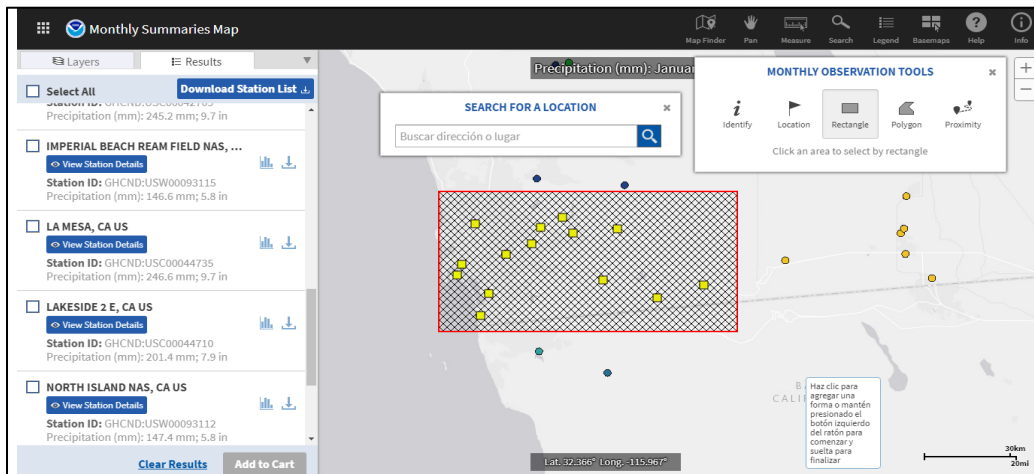
Fuente: CONAGUA-DGE. Elaboración propia.

Tabla 11.-
Precipitaciones mayores a 50 mm, estaciones E.U-1.

Nombre de estación	Precipitación (mm)	Fecha
Mount Laguna	91.44	2004 octubre
	50.8	2004 diciembre
	50.8	2005 febrero
	118.11	2010 enero
	77.47	2010 diciembre
	51.308	2013 julio
	52.07	2014 marzo
	100.076	2016 enero
Campo	67.056	2004 octubre
	50.292	2008 diciembre
	51.562	2010 enero
	58.42	2017 febrero
	50.038	2018 enero
Barret Dam	83.82	1980 enero
	72.136	1980 febrero
Boulevard 2	68.58	1980 enero
	53.34	1980 febrero
	73.66	1993 enero
	57.404	1993 febrero
	96.012	2005 diciembre
	75.946	2006 febrero
	55.118	2007 febrero
	58.42	2017 enero
57.15	2017 febrero	

Fuente: NOAA-EU. Elaboración propia.

Figura 38. -
Consulta de estaciones de E.U.



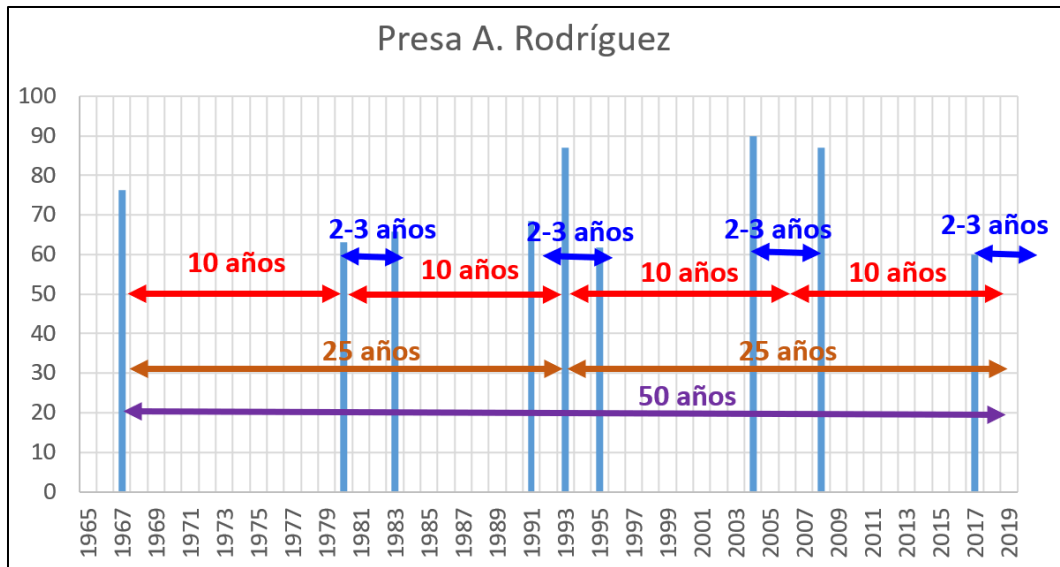
Fuente: Monthly Summaries Map, NOAA, E.U.

Tabla 12.-
Precipitaciones mayores a 50 mm, estaciones E.U-2.

Nombre de estación	Precipitación (mm)	Fecha
Campo II	79.248	1980 enero
	69.088	1980 febrero
	50.8	1982 enero
	51.308	1982 noviembre
	73.914	1983 marzo
	61.468	1983 agosto
	51.816	1986 febrero
	53.34	1986 octubre
	51.054	1988 enero
	94.488	1991 marzo
	94.742	1993 enero
	52.578	1993 febrero
	90.424	1995 enero
	69.342	2004 octubre
	53.34	2004 diciembre
	50.038	2008 enero
	77.216	2010 enero
	51.054	2010 octubre
	65.532	2010 diciembre
	76.708	2011 febrero
69.088	2017 enero	
56.642	2017 febrero	
Descanso Ranger Station	81.788	1980 enero
	100.076	1980 febrero
	66.548	1981 febrero
	68.834	1982 enero
	75.438	1982 febrero
	70.358	1982 marzo
	90.17	1982 noviembre
	63.5	1985 noviembre
	61.468	1986 marzo
	58.42	1986 octubre
	66.548	1987 enero
	74.93	1988 enero
	69.342	1991 febrero
	129.54	1991 marzo
	57.15	1992 enero
	119.634	1993 enero
	56.642	1993 febrero
	97.79	1995 enero
	95.25	1995 febrero
	107.696	1995 marzo
51.562	1996 noviembre	
86.106	1997 enero	
97.79	1998 febrero	
60.96	1998 marzo	
76.454	2011 febrero	
86.106	2017 enero	
96.012	2017 febrero	

Fuente: NOAA-EU. Elaboración propia.

Figura 39. -
Eventos extraordinarios por año.



Se muestran en la gráfica la cantidad de precipitación máxima en milímetros registrada en 24 horas según el año (para eventos extraordinarios) registrados en la estación de la Presa Abelardo L. Rodríguez. Es notorio un periodo de 25 años.

Elaborada M.I. Jesús Salvador García Carrera.

II.4.2 Determinación de gastos de escurrimiento

Con el fin de identificar el periodo de retorno a utilizar en el estudio del modelo de inundación nos basamos en el documento “*Términos de Referencia Para la Elaboración de Atlas de Peligro y/o Riesgos 2018*”(SEDATU, 2018), para estudios hidrológicos en cuencas aforadas y en cuencas no aforadas, en relación a eventos de inundaciones a analizar con base a modelos de lluvia-escurrimiento que permita estimar los caudales máximos, deben realizarse para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 250 y 500 años.

Tomando en consideración los patrones observados en la (figura 38) se ha decidió elegir el Periodo de Retorno de 25 años para la actual investigación.

Con información proporcionada por el M.I. Jesús Salvador García Carrera, del Instituto Nacional de Electricidad y Energía Limpias, se logró calcular la precipitación de diseño en función del periodo de retorno utilizando el método de distribución de Gumbel.

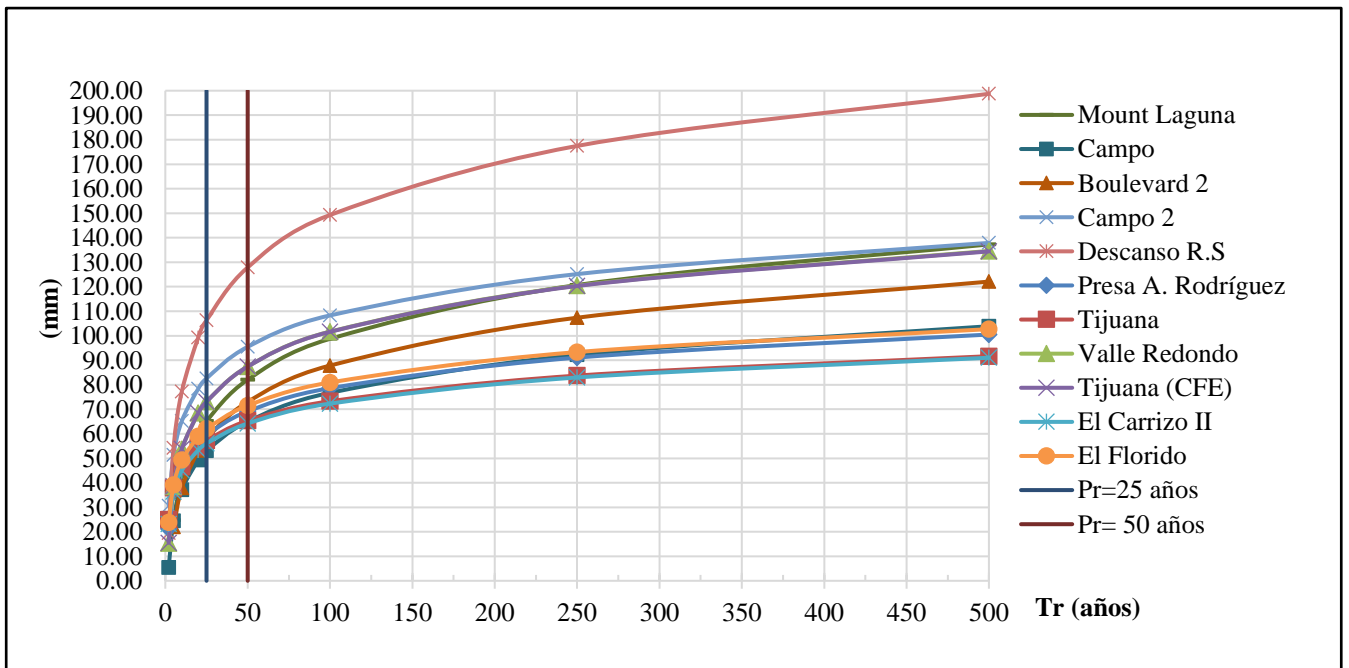
La distribución Gumbel “es la distribución estadística más utilizada en la actualidad para el cálculo de la precipitación para un periodo de retorno específico”(García, 2013). Esta ley de distribución de frecuencias se utiliza para el estudio de valores extremos.

Ecuación 4.- Distribución de Gumbel

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\mu)}} \dots\dots\dots(Ecuación 4)$$

Donde:
 x: es el valor de la variable aleatoria
 α y μ: son parámetros de ajuste
 F(x): representa la probabilidad de que un valor dado de x no sea superado

Figura 40. -
 Curva de precipitación de diseño en función del periodo de retorno (EST. MÉXICO Y E.U.)



Elaborada con información del M.I. Jesús Salvador García Carrera, INEEL, 2019.

Tabla 13.-
Precipitaciones de diseño.

Microcuenca	Estación asignada	Precipitación de diseño (mm)
1	Tijuana	57.3
2	Presa A.L.R.	59.59
3	Valle Redondo	73.1
4	Descanso R.S.	106.3
5	Campo 1	53.12

Precipitaciones de diseño para un periodo de retorno de 25 años, calculadas por el método de distribución de Gumbel.
Elaboración propia.

Para el cálculo del gasto o caudal máximo se utilizará el método racional *ecuación 5*, el cual es uno de los métodos más utilizados para la estimación del caudal máximo asociado a determinada precipitación de diseño, pero primero es necesario que se calcule la Intensidad de la precipitación y esta se obtiene por medio de la *ecuación 4*.

Ecuación 5.- Intensidad de precipitación.

$$I = \frac{P}{tc} \dots\dots\dots (Ecuación 5)$$

Donde:
I: Intensidad de lluvia en mm/h
P: Precipitación de diseño para un periodo de retorno dado en milímetros.
tc: Tiempo de concentración de la cuenca en horas.

Ecuación 6.- Gasto o caudal.

$$Q = \frac{C * I * A}{360} \dots\dots\dots (Ecuación 6)$$

Donde:
Q: Gasto o caudal en m3/seg
C: Coeficiente de escorrentía, adimensional
I: Intensidad de lluvia, mm/hr
A: Área de la cuenca en hectáreas

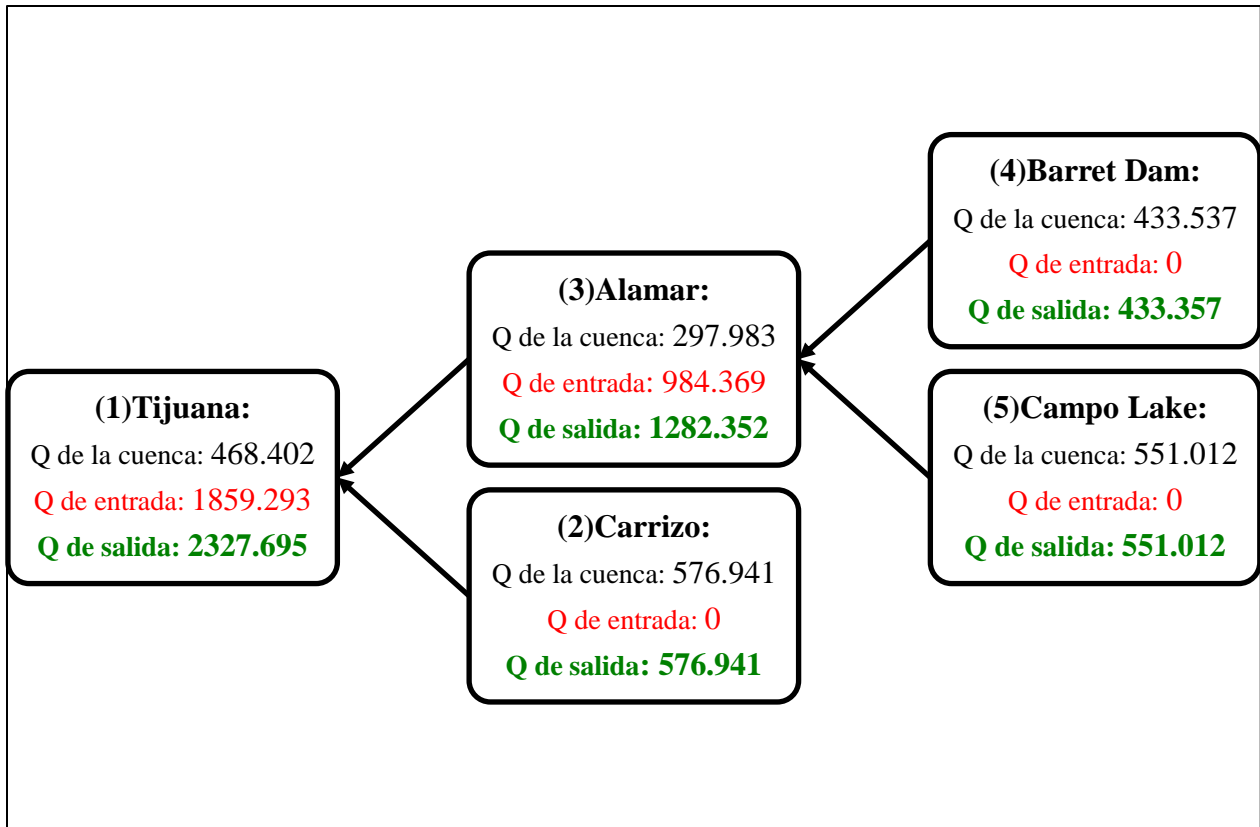
Tabla 14.-
Gastos de escurrimiento por microcuenca.

Microcuenca	Gasto (m3/s)
1	468.402
2	576.941
3	297.983
4	433.537
5	551.012
Gasto total	2327.875

Gastos de escurrimiento generados en cada microcuenca para un periodo de retorno de 25 años. Elaboración propia.

Es importante destacar que los gastos mostrados en la *Tabla 14* son exclusivamente los generados por los escurrimientos pertenecientes a cada microcuenca. En los casos de las microcuencas 1 y 3, éstas reciben gastos adicionales provenientes de aguas arriba de la red de estudio (*figura 40*) por lo que esos aumentos deben de ser considerados al momento de hacer el análisis de inundación.

Figura 41. -
Diagrama del flujo de los escurrimientos.



Flujo y comportamiento de los caudales de cada microcuenca para un periodo de retorno de 25 años. Unidades en m³/s.

Elaboración propia.

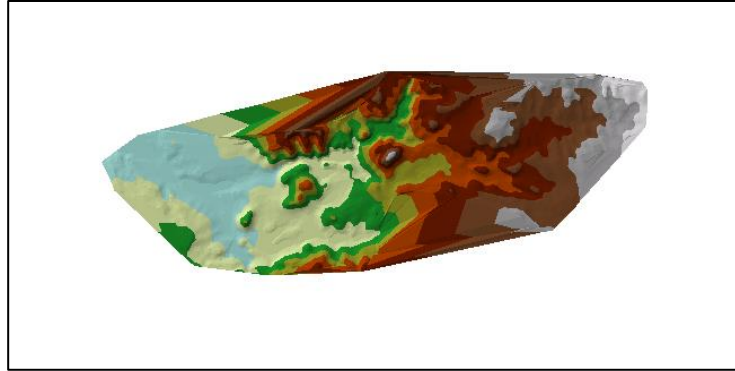
II.4.3 Modelo digital de inundación

Se ha decidido utilizar el Método de HEC-RAS I-D debido a que así es como lo plantea el CENAPRED en el documento “*Metodología para la elaboración de mapas de riesgos por inundación en zonas urbanas*” elaborado por (Salas Salinas, 2011).

Para esto es necesario volver al Software *ArcMap*TM de *ArcGIS*® en donde se debe partir del archivo ráster del Modelo Digital de Elevación el cual se deberá convertir a formato TIN con la herramienta “Raster to TIN”, esto nos permitirá comenzar los trazos del río y sus componentes para ser exportado posteriormente a HEC-RAS.

Figura 42. -

Archivo de elevación TIN de la subcuenca.



Modelo Digital de Elevaciones convertido a formato TIN. Elaboración propia.

Como se cuenta con 5 escurrimientos principales, para poder evaluar la geometría y comportamiento de cada uno de ellos debemos trazarlos individualmente para posteriormente ser unidos en un solo archivo en HEC-RAS.

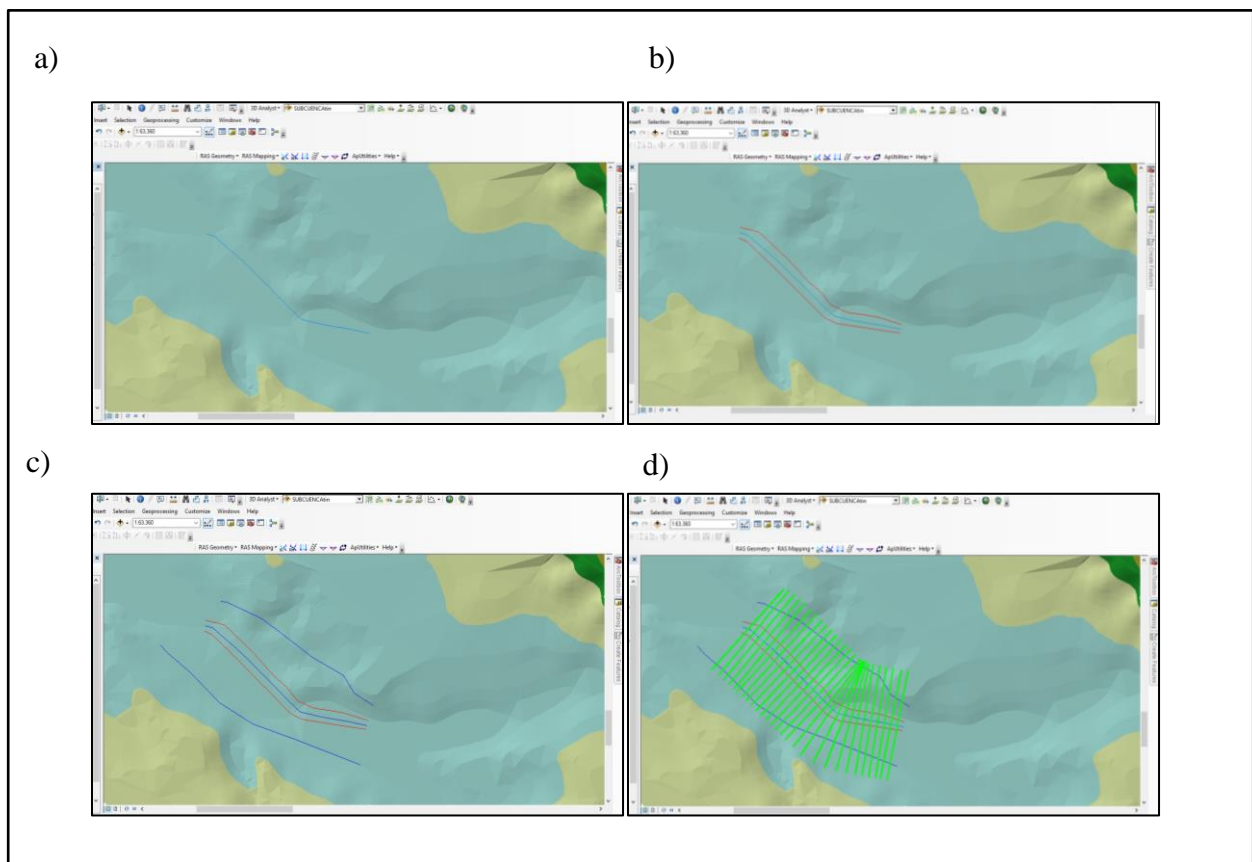
Se desarrollan las características con la extensión “RAS Geometry” tales como “River” el cual consiste en la línea del cauce principal, “Banks” utilizada para delimitar los márgenes de este, “FlowPaths” empleada para delimitar la posible área de inundación en ambos sentidos de forma paralela al río, “XS CutLines” son las líneas que proyectarán la sección de corte para visualizar el área transversal al eje del río estas no guardan ninguna información de elevaciones, solo funcionan como guía para el software al momento de generar los atributos tridimensionales (*figuras 42 a, b, c y d*).

Para almacenar la información tridimensional de los trazos (elevaciones y perfiles transversales) se utilizan las herramientas: “River 3D” que toma el trazo del río y le otorga datos de elevación en base al archivo TIN de la cuenca; “XS CutLines 3D” toma las posiciones de las líneas de corte antes especificadas pero en esta ocasión adopta los datos de elevación pudiendo

generar un perfil de corte en el que se observa la geometría de la sección del encausamiento; la característica "Reach" utilizada para clasificar el tipo de escurrimiento que estás trabajando.

Contando con todos los elementos especificados podemos decir que nuestra geometría se encuentra lista para ser exportada a HEC-RAS en donde se deberá verificar que los trazos se hayan realizado de la manera correcta antes de iniciar con el modelado.

Figura 43. -
Trazado de geometría del Río Tijuana.

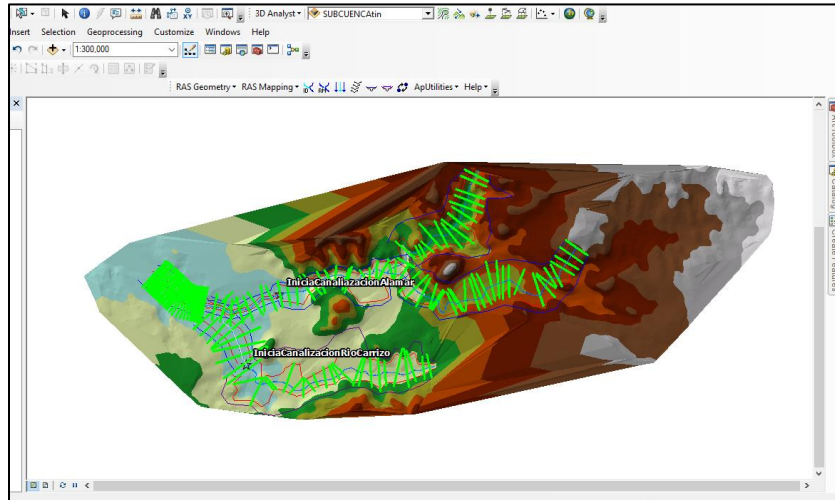


a) Trazo de cauce principal del (escurrimiento 1); b) Delimitación de "River Banks" del río (líneas rojas); c) Trazo de "FlowPaths" el cuál es una propuesta del área hasta donde podría llegar la inundación (líneas azul oscuro); d) Trazos de "XS Cut Line" líneas bajo las cuales se hará un corte transversal para poder ver el perfil del río en diferentes secciones (líneas verdes).

Elaboración propia.

En el software HEC-RAS lo primero que se debe de hacer es verificar que todos los perfiles de corte sobre los ríos se hayan trazado correctamente y de no ser así corregirlo. Esto con el fin de evitar que el programa tenga errores al momento de iniciar el modelado.

Figura 44. -
Conjunto de geometrías.



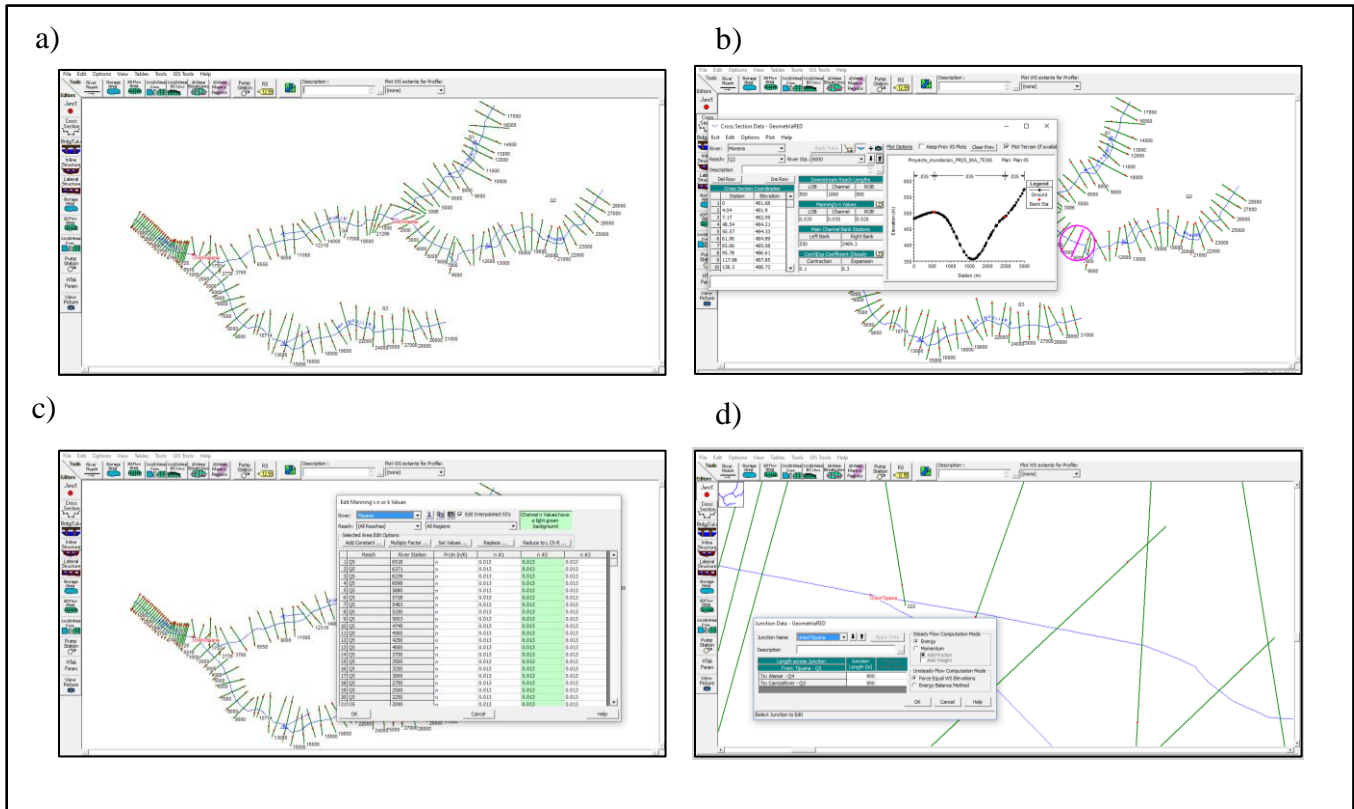
Se observan las geometrías de los 5 escurrimientos después de seguir los pasos mencionados en cada uno de los mismos. Esta información está lista para ser exportada a HEC-RAS. Elaboración propia.

Para canales naturales, debido a la zona y las características que estos ostentan, se les otorga el valor $n=0.035$, y para canales de concreto como lo son las canalizaciones del Río Tijuana en sus tres etapas y el arroyo Alamar un valor de $n=0.015$ (figura 44 a, b y c).

En la geometría del proyecto en el HEC-RAS se agregan de manera individual los trazos con sus características importadas hasta que se logra unificar toda la red hidrográfica a estudiar. Es importante que en las zonas donde hay uniones de cauces como lo son la del escurrimiento 4 y 5 con el 3 y la del escurrimiento 3 con el 1 (ver figura 40) se añada la característica de “Junction” para que el mismo sistema pueda comprender que es una unión de gastos y estos mismos sigan

sumándose (figura 44 d) hasta llegar al desemboque de la cuenca en el Estuario del Río Tijuana del mismo nombre.

Figura 45. -
Geometría en HEC-RAS.

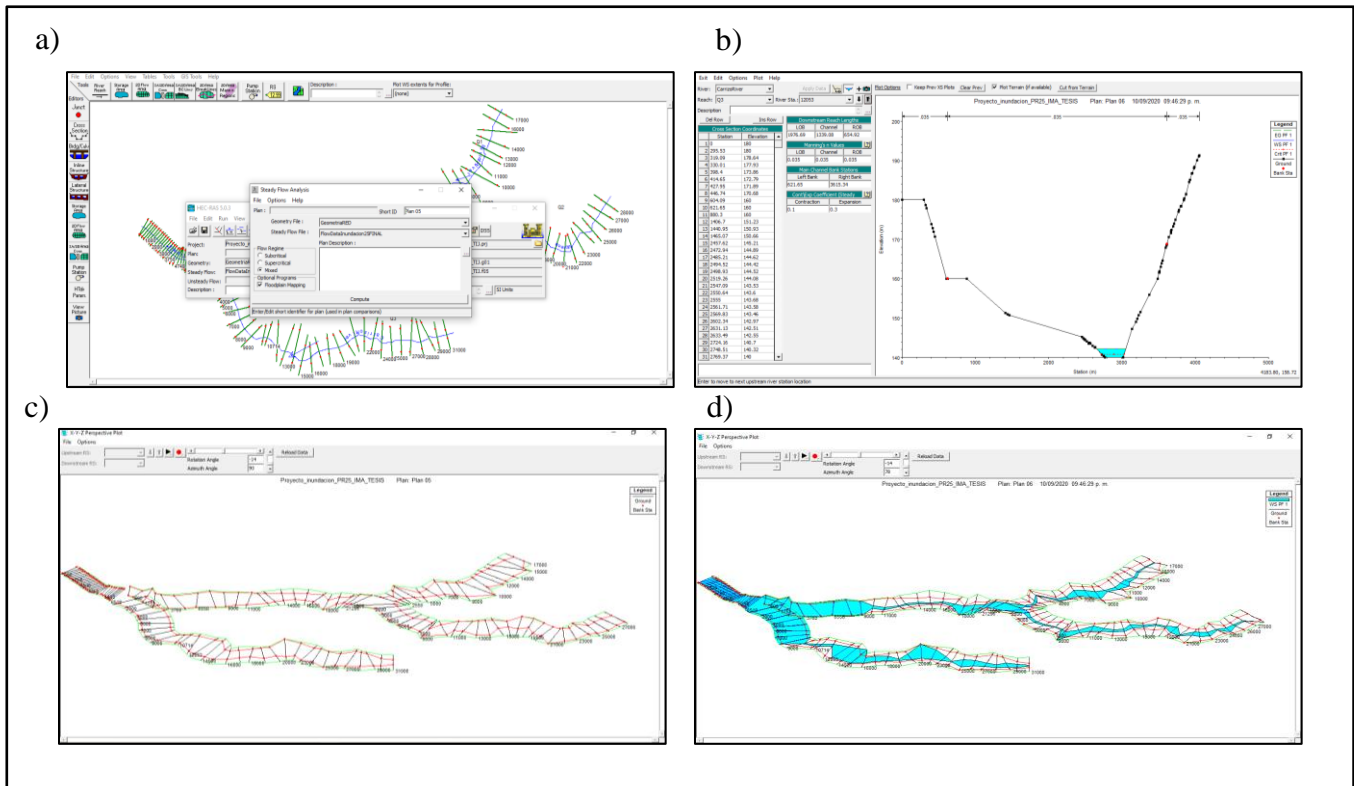


- a) Geometría conjunta de escurrimientos en HEC-RAS; b) Revisión de posición de puntos de bancos de río en sección transversal de escurrimiento 5; c) Asignación de coeficientes de rugosidad de Manning para cada una de las secciones de los escurrimientos según las condiciones físicas de estos; d) Especificación de condición de unión entre dos escurrimientos “Junction”.

Como se mencionó en secciones anteriores del presente escrito, este análisis será un modelo de inundación en 1 dimensión (HEC-RAS I-D) por lo que deberemos proporcionar la información de los gastos de escurrimiento y las pendientes promedio de cada cauce al software en la sección de “Edit Steady FlowData”. Es de vital importancia que se verifique en todo momento que las unidades del sistema sean las del Sistema Internacional (SI).

La opción de “Steady Flow Analysis” se encargará de computar toda la información y generar el modelo de inundación. Para visualizar los resultados basta con acceder a la sección de geometría y revisar los cortes transversales, los cuales muestran los tirantes de agua al colorearse de azul el área inundada. También otra forma de visualizar los resultados es en la sección “View 3D Multiple Cross Section Plot” la cual te permite observar desde diferentes ángulos y de forma tridimensional la magnitud de la inundación (figura 45 a, b, c y d).

Figura 46. -
Análisis de inundación en HEC-RAS.



a) Sección “Steady Flow Analysis” donde se inicia el análisis de inundación; b) Perfil de esrrimiento 2 con presencia de tirante de agua; c) Vista tridimensional de la red antes del análisis de inundación; d) vista tridimensional de la red después del análisis de inundación. Elaboración propia.

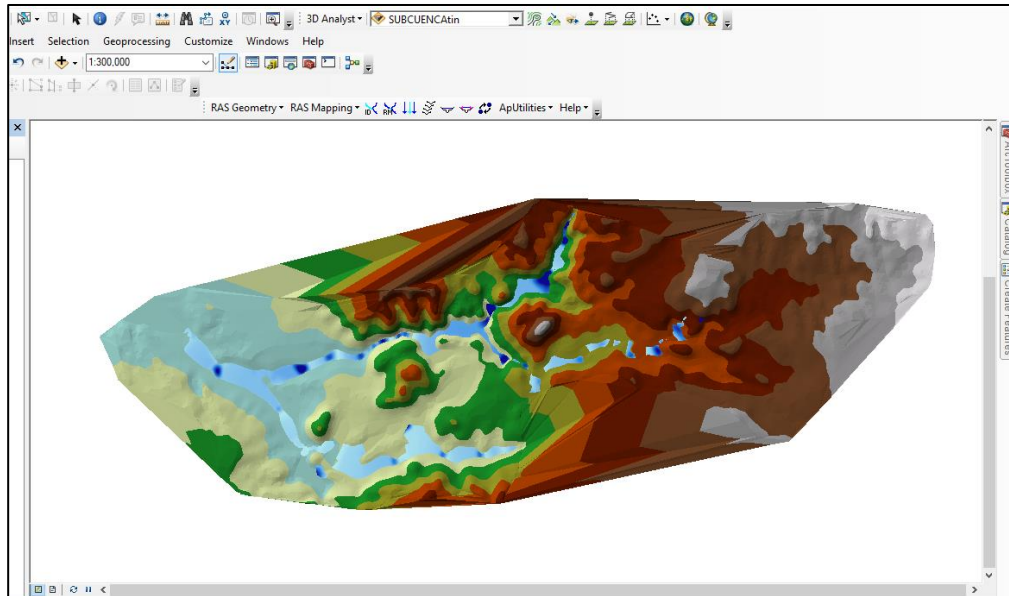
Se exporta la información generada por HEC-RAS con la herramienta “Export GIS data” la cual puede ser recibida por la extensión de *ArcMap*TM, HEC-GEO-RAS y es capaz de proyectarla en el Sistema de Información Geográfica para la generación de mapas de peligro.

En *ArcMap*TM se crea un nuevo archivo TIN basado en la información tridimensional de los perfiles de cada río pues es a partir de este con el que se podrá generar la superficie de inundación con sus respectivos tirantes en un archivo TIFF (*figura 46*). Es esencial verificar la coincidencia de las curvas de nivel utilizadas con las actuales elevaciones de la ciudad de Tijuana, esto es debido a que la acelerada urbanización y el desarrollo de infraestructura pueden crear algunas discrepancias en la inundación generada, pues en zonas donde antes se encontraba intacta la falda de un cerro hoy puede que existan cortes o alteraciones, producto de una obra civil o incluso algún movimiento de tierra.

El archivo TIFF generado debe ser revisado en busca de alguna área sin información, de existir una se utilizará la herramienta “Map Algebra” la cual interpola los valores para llenar la mayoría de los vacíos con información y completar el modelo (tal como se hizo al momento de unir los MDE de California y México al inicio de la metodología). Debido a la baja calidad en la que se tornó el MDE por diversos factores, en la presente investigación no se tomarán en cuenta los valores de los tirantes que arroja el sistema y simplemente las zonas donde en teoría los tirantes serían mayores serán consideradas como áreas de mayor riesgo y viceversa. En la sección de resultados se entrará más a detalle en el tema.

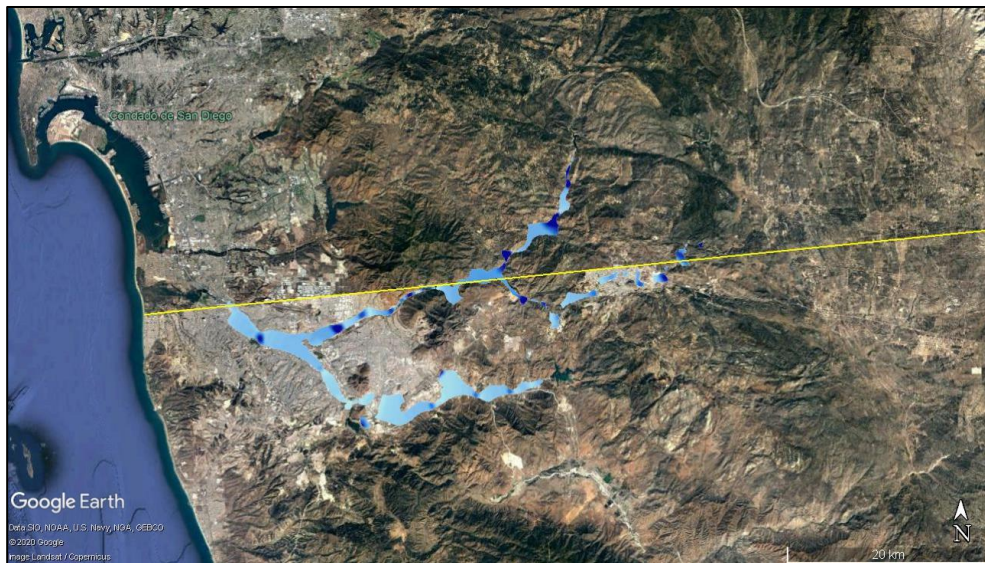
La exportación de la capa del modelo desde *ArcMap*TM a *Google Earth* nos permitirá comprobar que hemos editado de manera correcta y podemos visualizar de diferentes perspectivas la inundación en la zona urbana de la ciudad (*figura 47*).

Figura 47. -
Modelo de inundación en ArcMap.



Modelo generado con la extensión Ras Mapping de HEC-GEO-RAS. Elaboración propia.

Figura 48. -
Modelo de inundación en Google Earth.



Modelo de inundación proyectado en *Google Earth*. Elaboración propia.

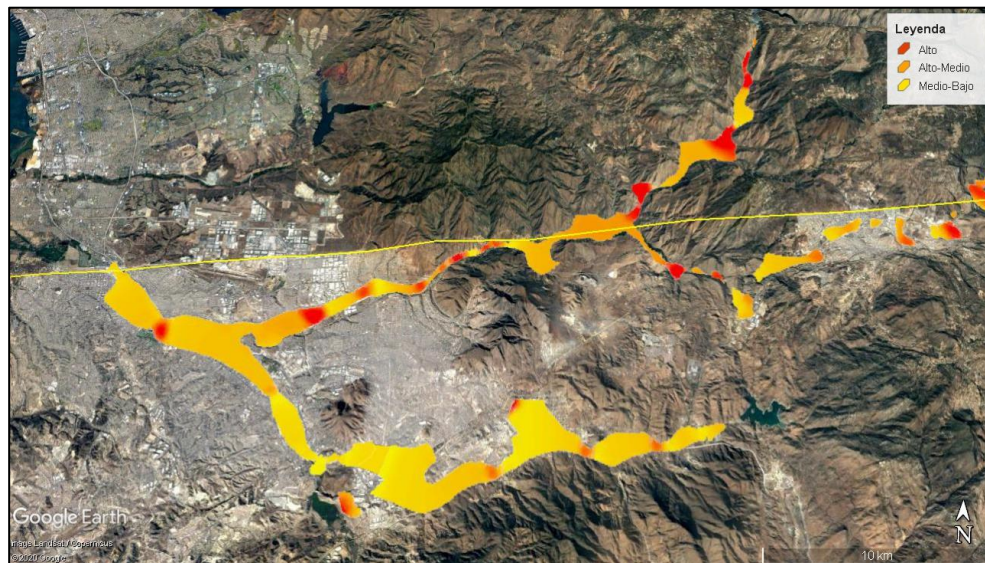
II.4.4 Determinación del Riesgo

Tomando en cuenta los conceptos establecidos por el CENAPRED que se tratan en el marco teórico es posible delimitar los parámetros para medir los componentes del riesgo y así poder cuantificarlo, ya se cualitativa o cuantitativamente.

II.4.4.1 Peligro

El peligro está relacionado con la intensidad y magnitud del evento, para el caso de una inundación podemos interpretar el conjunto de las dos en el concepto de severidad de esta. El modelo de inundación obtenido, con su gama de colores puede ser interpretado como los niveles de severidad (peligro) de inundación para el periodo de retorno dado en las inmediaciones de los escurrimientos.

Figura 49. –
Peligro/severidad por inundación.



Niveles de severidad de inundación. Elaboración propia.

II.4.4.2 Vulnerabilidad

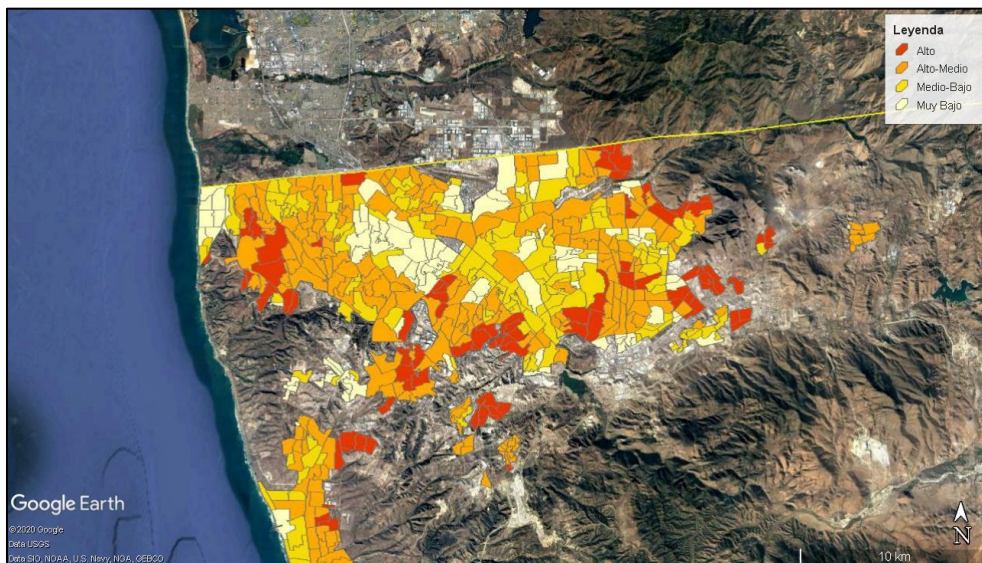
La vulnerabilidad será medida en función del Índice de Marginación de cada AGEB (CONAPO, 2010) que atraviesa el área de inundación. Según la metodología del Consejo

Nacional de Población para calcular este índice se toman en cuenta diversas variables como las siguientes:

- Condición de alfabetismo
- Nivel educativo
- Vivienda
- Drenaje
- Agua
- Energía eléctrica
- Material de pisos
- Localidad y su tamaño
- Población ocupada
- Ingresos por trabajo

Por mencionar algunos.

Figura 50. –
Marginación en Tijuana.



Índices de marginación por AGEB en Tijuana. Fuente:(CENAPRED & CONAPO, 2020)

Se puede establecer una relación entre los datos de peligro y los de vulnerabilidad con el fin de obtener polígonos de áreas con mayor riesgo de verse afectadas por el fenómeno hidrometeorológico. Puede que en un área de alta marginación se ve afectada por un peligro mínimo, por lo que podríamos considerar un peligro medio, por otro lado, un área de baja marginación pero con un alto peligro por inundación puede ser considerada de igual forma de riesgo medio. Con esas consideraciones se hicieron ajustes a la matriz de riesgo clásica y se obtuvo como resultado la *Tabla 15a y 15b*.

Tabla 15. –
Matriz de riesgo modificada.

a)

		Severidad/peligro		
		Baja	Media	Alta
Vulnerabilidad del área afectada	Muy baja			
	Baja			
	Media			
	Alta			

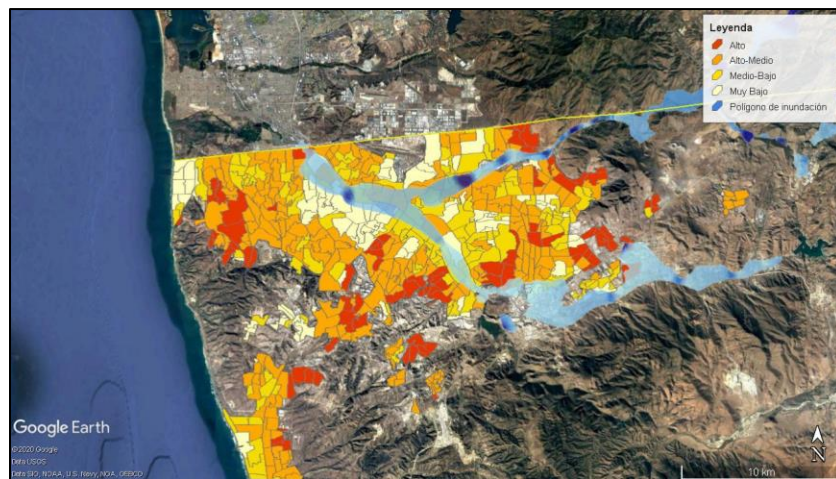
b) Donde:

Riesgo muy alto	
Riesgo alto	
Riesgo medio	
Riesgo bajo	
Riesgo muy bajo	

Tablas para determinar el nivel de riesgo considerando el peligro y la vulnerabilidad. Elaboración propia.

Como se puede observar en la *figura 50* la herramienta de *Google Earth* nos permitió sobreponer las capas para así determinar la relación que hay entre peligro y vulnerabilidad a lo largo de los escurrimientos en la zona urbana de Tijuana

Figura 51. –
Áreas afectadas e índice de marginación.

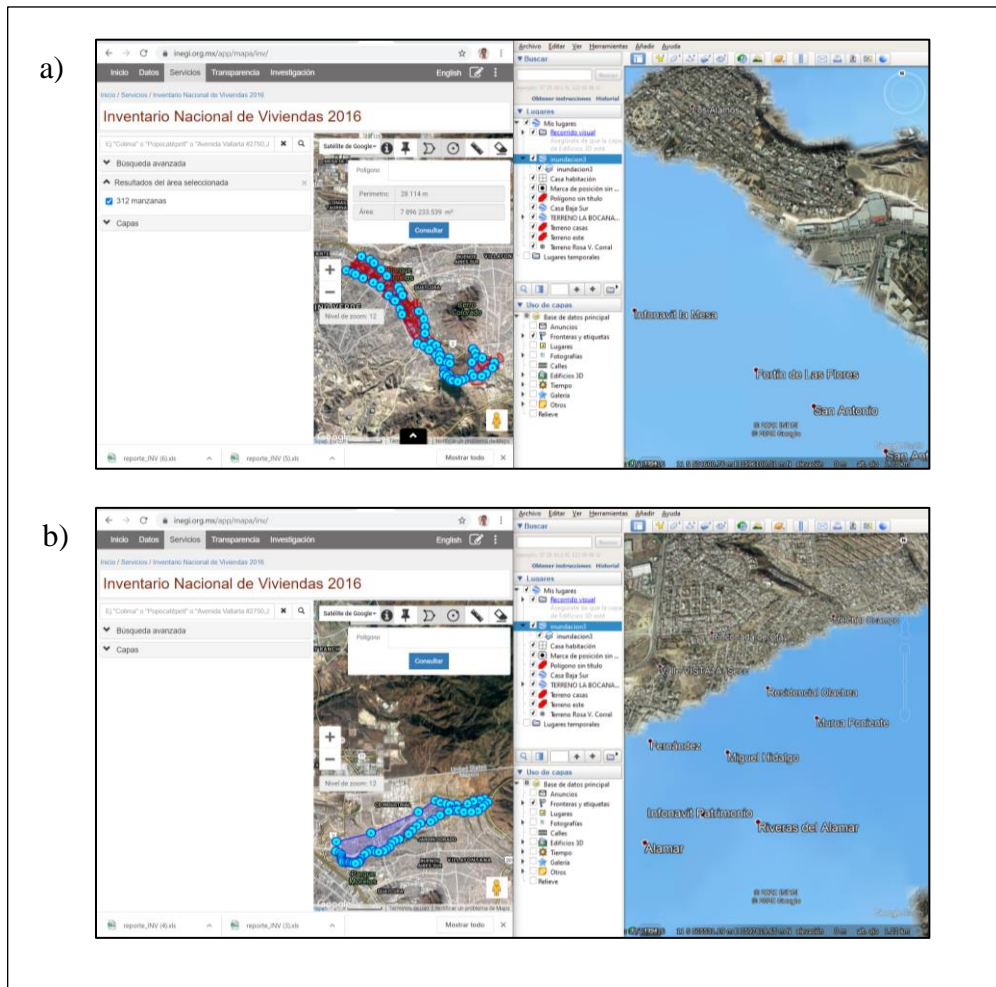


Sobreposición de capas de índices de marginación por AGEB y modelo de inundación, en ese orden. Elaboración propia.

II.4.4.3 Exposición

La exposición ante el fenómeno será determinada en función de la cantidad y las características demográficas de la población expuesta ante toda la inundación dentro del área urbana de Tijuana. Para esto se hace uso de la plataforma Mapa Digital de México (INEGI, 2015b), con información del Inventario Nacional de Viviendas (INEGI, 2016) como se muestra en los ejemplos de las *figuras 51 a y b*.

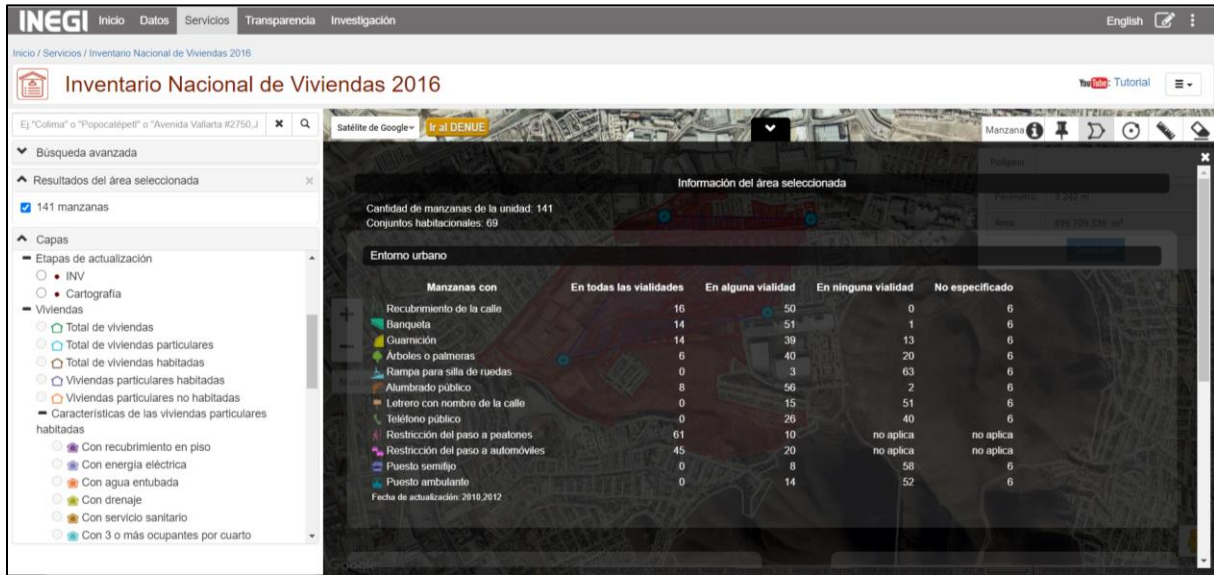
Figura 52. –
Uso del Inventario Nacional de Viviendas.



Trazado de área de influencia de la inundación en Inventario Nacional de Viviendas (lado izquierdo) con apoyo del modelo en Google Earth (lado derecho). Elaboración propia.

La plataforma permite la descarga masiva de información sobre el entorno urbano, viviendas, características de las viviendas particulares habitadas e información del área seleccionada.

Figura 53. –
Información proporcionada por INVI.



Interfaz de presentación de información de la plataforma del INVI.

III. Resultados

El modelo de inundación generado para un periodo de retorno de 25 años indica que una superficie aproximada 8072 hectáreas del área urbana de Tijuana se verían afectadas. En esa superficie se estima según datos del Inventario Nacional de Viviendas de 2016 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía que se encuentran alrededor de 22 mil 137 viviendas habitadas y habitan 71 mil 434 habitantes de los cuales 1 mil 551 cuentan con alguna discapacidad (*tablas 16 y 17*).

Tabla 16. –
Viviendas afectadas

Viviendas	
Habitadas	22137
Sin recubrimiento en piso	1568
Sin energía eléctrica	843
Sin agua entubada	1210
Sin drenaje	1019
Sin servicio sanitario	884
Con 3 o más ocupantes por cuarto	441

Resultados de consulta del INVI con información del INEGI de 2010, 2012, 2015. Elaboración propia.

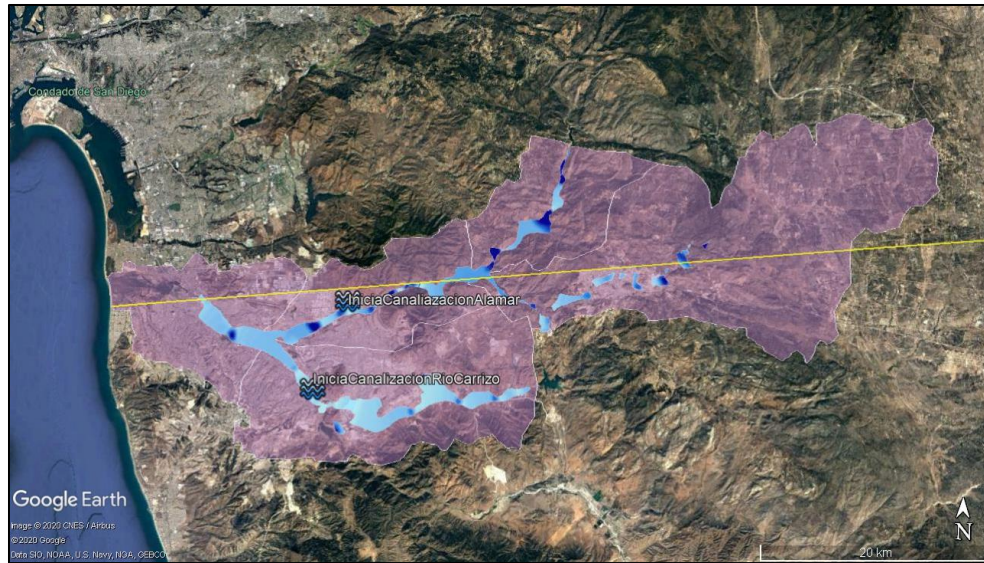
Tabla 17. –
Población afectada de manera directa

Población	
De 0 a 14 años	17621
De 15 a 29 años	19942
De 30 a 59 años	27895
De 60 y más años	5976
Total	71434

Resultados de consulta del INVI con información del INEGI de 2010, 2012, 2015. Elaboración propia.

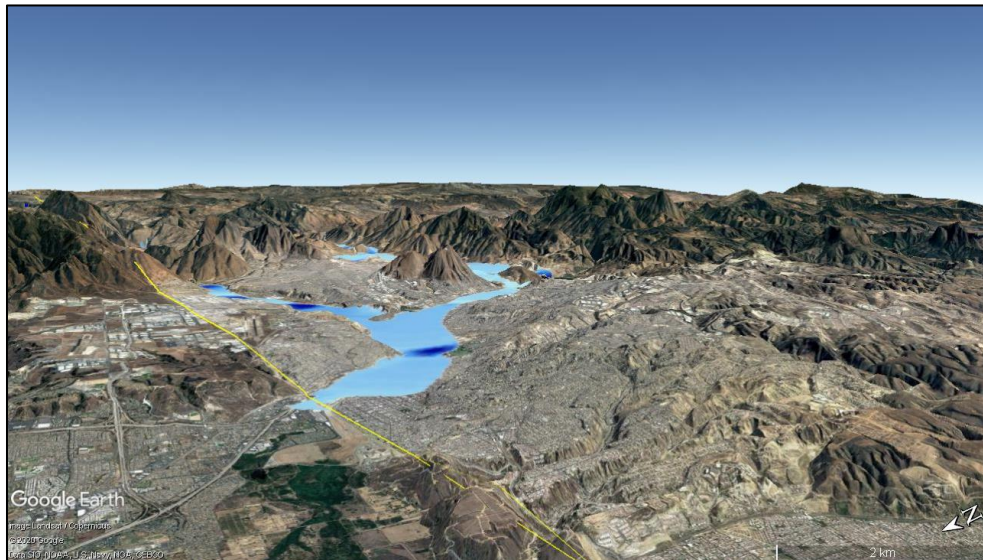
El modelo digital de inundación presenta en diversas partes de su extensión dentro de la zona urbana áreas que en teoría presentarían tirantes muy altos de presentarse un fenómeno hidrometeorológico de esas características.

Figura 54. –
Modelo de inundación sobre subcuenca.



Modelo de inundación proyectado sobre el área de la subcuenca en la ciudad de Tijuana. Se observan las áreas de color azul más oscuro las secciones en donde teóricamente se presentarán tirantes de agua mayores al resto de colores más claros.
Elaboración propia.

Figura 55. –
Vista aérea en ángulo de modelo de inundación - a.



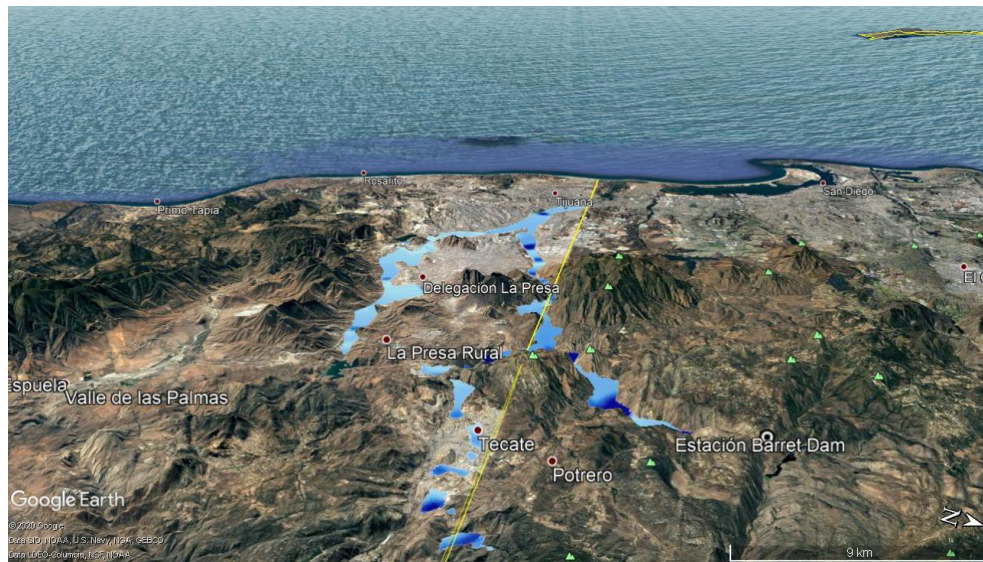
Vista del modelo de inundación desde navegación aérea. Imagen tomada sobre el Estuario del Río Tijuana (E.U.) en dirección sureste. El relieve aumentado en 300% para una mejor perspectiva.

Figura 56. –
Vista aérea en ángulo de modelo de inundación - b.



Vista del modelo de inundación desde navegación aérea. Imagen tomada sobre la Presa el Carrizo en dirección noroeste. El relieve aumentado en 300% para una mejor perspectiva.

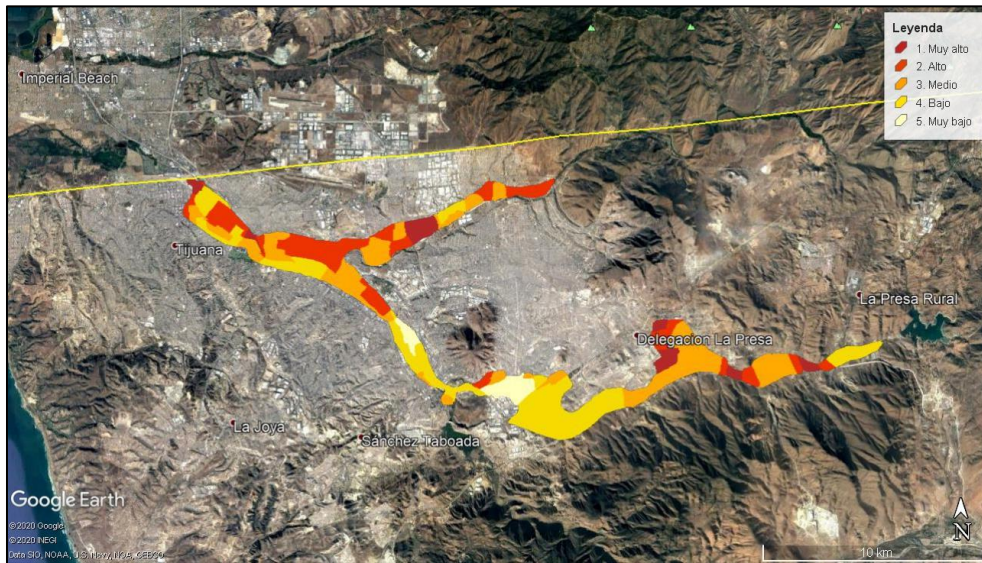
Figura 57. –
Vista aérea en ángulo de modelo de inundación - c.



Vista del modelo de inundación desde navegación aérea. Imagen tomada sobre la Campo Lake (E.U.) en dirección suroeste. El relieve aumentado en 300% para una mejor perspectiva.

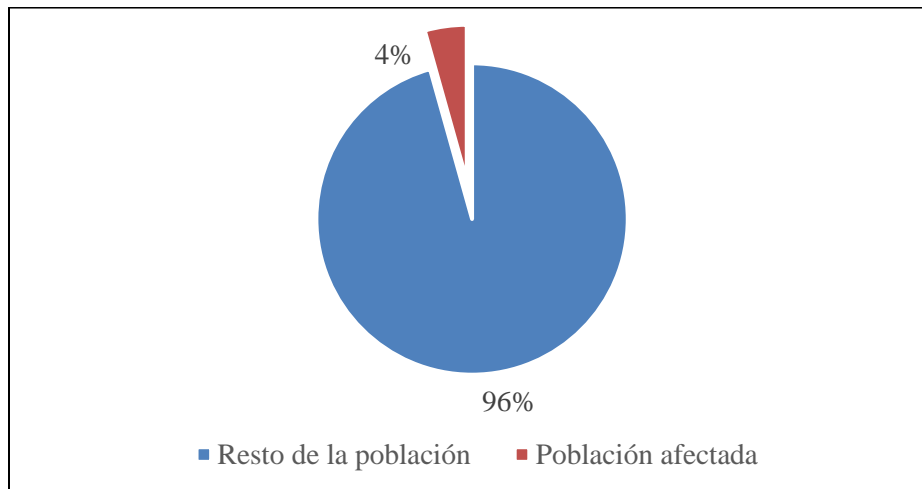
Considerando la marginación de cada AGEB que atraviesa el modelo y la severidad de la inundación en la misma, se determinó el mapa de riesgo por inundación en las inmediaciones de la red hídrica que alimenta el Río Tijuana dentro de la zona urbana para un periodo de retorno de 25 años.

Figura 58. –
Mapa de riesgo por inundación en Tijuana.



Mapa de riesgo por inundación. Elaboración propia.

Figura 59. –
Porcentaje de población afectada de manera directa.



Con datos de la encuesta intercensal de 2015(INEGI, 2015a)

IV. Discusiones y conclusiones

Para los efectos de esta investigación debido a las características mayoritariamente cualitativas con las que se contaban podemos proponer que para determinar el Riesgo por Inundación una expresión adecuada sería la *ecuación 6*.

Ecuación 7.- Ecuación de riesgo propuesta

$$\mathbf{Riesgo = Peligro * \acute{I}ndice de Marginaci3n} \dots\dots\dots (\text{Ecuaci3n 7})$$

El modelo digital de inundaci3n generado con un periodo de retorno de 25 a\~nos concuerda con las zonas de mayor severidad a inundarse seg\~un(CENAPRED & CONAPO, 2020) (*figura 59*).

Figura 60. –
Severidad de inundaci3n seg\~un CENAPRED.



Comparaci3n de modelo de inundaci3n vs. Mapa de severidad por inundaci3n del CENAPRED.

De acuerdo con los antecedentes se conoce que lluvias que superan los 50 mm en un periodo de 24 horas generan problemas por inundaci3n en calles, avenidas, m\~argenes de los r\~ios y esto conlleva, a problemas de movilidad, de dotaci3n de servicios y pone en riesgo a los ciudadanos.

El modelo que resultó de esta investigación puede ser mejorado en su precisión si se toman datos de elevaciones más actualizados y de mayor resolución que se han puesto a disposición del público recientemente en las plataformas del INEGI.

A pesar de que el periodo de retorno considerado en la presente investigación es globalmente bajo, según (Bocco et al., 1993b), quien reflexionaba lo mismo en las conclusiones de su documento “*Evaluación del impacto de las inundaciones en Tijuana (Enero de 1993). Uso integrado de percepción remota y sistemas de información geográfica*” en el año de 1993 “*el impacto más severo fue causado por una precipitación que puede repetirse, en promedio, cada tres años, con una probabilidad del 70%*”. Esa información compromete fuertemente a la ciudad, su infraestructura, sus planes de contingencia y sobre todo su planeación urbana, es necesario atender el tema a cabalidad y con prontitud.

La ciudad de Tijuana es sumamente vulnerable a los eventos hidrometeorológicos debido a su topografía accidentada y a que se pueden presentar precipitaciones muy intensas en cortos periodos de tiempo. Como dice (Ojeda Revah & a. G. Á., 2000) “Las consecuencias de las inundaciones se agravan debido a que dentro de la ciudad existen áreas con formaciones geológicas de sedimentos marinos que presentan derrumbes potenciales y suelos arcillosos grises que se expanden cuando son humedecidos por las lluvias”.

Las reflexiones sobre los desastres provocados por eventos hidrometeorológicos en la ciudad no son nuevas y por lo general todas van en la misma línea, hay una falta de interés por parte de la comunidad en mitigar y solucionar las consecuencias que se viven por una mala planeación, la responsabilidad recae en todos. Considero que buscar palabras distintas a las muchas otras que ya han expresado investigadores en torno a esta problemática sería sólo hacer más larga la lista de las muchas otras interpretaciones que hay a un peligro latente, tan antiguo como la ciudad misma, veo que la mejor forma de concluir este escrito es recordando las palabras del ejecutivo

federal, el Lic. José López Portillo en enero de 1978 “ *Aprovechemos este drama (lluvias de 1978) para hacer previsiones más enérgicas, no olvidemos que torrentes y cañones son eso, torrentes y cañones, hagamos un esfuerzo de responsabilidad conjunta, apoyado en las instituciones que nuestras leyes permiten para prever daños en el futuro, hagamos un esfuerzo sustancial para aprovechar la enseñanza de esta tragedia para que no vuelva a ocurrir*”(López Portillo, 1978).

V. Referencias bibliográficas

- Ahrens, D. (2000). An introduction to weather, climate and the environment. *Meteorology Today*, sixth edit (Brooks-Cole, California, USA.).
- Aparicio, M. (1999). *Fundamentos de Hidrología de Superficie* (p. 210). Limusa, México.
- Archivo Histórico de Tijuana. (2016). *Inundación Tijuana 1916*. Instituto Municipal del Arte y Cultura, Tijuana.
- Ayuntamiento de Tijuana. (2014a). *Atlas de riesgos naturales del Municipio de Tijuana, 2014*. 53.
- Ayuntamiento de Tijuana. (2014b). *Publicación en red social Facebook*.
https://www.facebook.com/AlcaldiaTijuana.22/photos/basw.AbrdempJ1_spB41a0Vk4tYQLuO6wOmmwIdMYFpy2H2JsRIsfBqG_0SVqSsWE6Id8qFmMjgUGAB7eYHK7SEtbgmVuIyDb3iaGfV7X5btAiblQdVzO04LOhYypNs9MQob3b3jeJxosjVeBg9C-hOowvBq098xT9021SkVI-GCe2DFI0A/378081529014366/?opaqueC
- Azagra, A. (2006). Modelo de coeficientes de escorrentía. *Mauco Generalizado*, 28.
http://www.ugich.com/descargas/AECID_Curso1/CALCULO_DE_CAUDALES_DE_AVENIDA.pdf
- Barajas T., H., & Méndez M., E. (n.d.). Consideraciones generales sobre población, desarrollo y medio ambiente, el caso de Tijuana, Baja California. *Estudios Fronterizos, Universidad Autónoma de Baja California*, 2.
- Benítez, C., Arias, W., & Quiroz, J. (1980). *Manual de conservación de suelos y aguas*. (p. 498). Ministerio de Agricultura y Alimentación. Lima (Perú) Chow, V.T. ; Maidment, D.R. & Mays, L.W.; 1988. Applied Hydrology. McGraw-Hill. Nueva York.
- Bocco, G., Sánchez, R. A., & Riemann, H. (1993a). *45 años de datos diarios de precipitación, estación Chula Vista*.
- Bocco, G., Sánchez, R., & Riemann, H. (1993b). Evaluación del impacto de las inundaciones en Tijuana (Enero de 1993). Uso integrado de percepción remota y sistemas de información geográfica. *Frontera Norte*, 5(10), 1993.
- CENAPRED. (n.d.). *Eventos que han generado los mayores daños por inundación en México (1943 - 2004)*.
- CENAPRED. (2014). Conceptos Básicos para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. In *Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de*

- Peligros y Riesgos* (p. 87). Secretaría de Gobernación.
- CENAPRED. (2015). *Impacto socioeconómico de los desastres en México durante 2015*. 18.
- CENAPRED. (2016). *Descripción de los fenómenos hidrometeorológicos*. 215.
- CENAPRED. (2018). *Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana 2016*. www.gob.mx/sspc?idiom=es
- CENAPRED. (2019). *Inundaciones* (1st ed.). Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana.
- CENAPRED, & CONAPO. (2020). *Atlas Nacional de Riesgos*.
<http://www.atlalnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/visor-capas.html>
- CESPT. (2006). Capitulo II. Antecedentes Históricos: Lluvias en Tijuana. In *Acueductos* (p. 25).
[https://www.cespt.gob.mx/culturaagua/pdf/articulos/Acueductos\(02\).pdf](https://www.cespt.gob.mx/culturaagua/pdf/articulos/Acueductos(02).pdf)
- CONAPO. (2010). *Índices de marginación 2010*.
- CONAPO. (2015). *Proyecciones de Población de los Municipios de México, 2015-2030 (base 1)*. Consejo Nacional de Población. <https://datos.gob.mx/busca/dataset/proyecciones-de-la-poblacion-de-mexico-y-de-las-entidades-federativas-2016-2050>
- Conklin, D. T. (1988). Orígenes de Tijuana. In *Baja California. Textos de su Historia* (pp. 422–428). Instituto de Investigaciones Dr. José María Luis Mora, SEP/Gobierno del Estado de Baja California.
- Coordinación Estatal de Protección Civil Baja California. (2019). *Fenómenos Hidrometeorológicos Guía sobre riesgos para el Estado de Baja California Coordinación Estatal de Protección Civil Baja California*.
<http://www.proteccioncivilbc.gob.mx/Doctos/GuiaHidrometeorologicaBC1.pdf>
- Dedina, S. (1995). The political ecology of transboundary development: land use, flood control and politics in the Tijuana River Valley. *J Borderland Stud* X, 89–110.
- Desconocido. (1993). *Tijuana lluvias de 1993*. <https://www.youtube.com/watch?v=T1tDIPVTdzA>
- Dirección de Información y Relaciones Públicas del Gobierno de Baja California. (n.d.). *La respuesta de un pueblo*. Baja Films Producciones y Publicidad.
<https://www.youtube.com/watch?v=DCSb5emprSM>
- García, A. J. (2013). *Análisis De Distribuciones Estadísticas Alternativas a Las Tradicionales Para La Optimización De Los Caudales De Cálculo Empleados En Los Estudios Hidrológicos*. 222. <https://core.ac.uk/download/pdf/72043241.pdf>
- García Carrera, J. S. (2018). *Curso Pro Investigación en inundaciones*. Universidad Autónoma

de Baja California.

- Global Health Organization. (2020). *FLOODS - Technical Hazard Sheet - Natural Disaster Profile*. <https://www.who.int/hac/techguidance/ems/floods/en/>
- Guevara O., E., Quaas W., R., & Fernández V., G. (2014). Lineamientos generales para la elaboración de atlas de riesgos. In *Conceptos Básicos para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos* (pp. 14–15).
- IMPLAN Tijuana. (2010). *Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población Tijuana, B.C.*
- INEGI. (1990). *Censo de Población y Vivienda 1990*.
- INEGI. (2010). *Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas*.
antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/
- INEGI. (2015a). *Encuesta Intercensal*.
<http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/bc/poblacion/default.aspx?tema=me&e=02>
- INEGI. (2015b). *Mapa Digital de México V5.0*.
http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/docs/musua_mdmlinea.pdf
- INEGI. (2016). *Inventario Nacional de Viviendas 2016*.
- López Portillo, J. (1978). *Declaración a medios*.
<https://www.youtube.com/watch?v=DCSb5emprSM>
- Nkwunonwo, U. C., Whitworth, M., & Baily, B. (2020). A review of the current status of flood modelling for urban flood risk management in the developing countries. *Scientific African*, 7, e00269. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00269>
- NOAA. (n.d.). Schematic diagram of El Niño. *El Niño Theme Page*.
<https://www.pmel.noaa.gov/elniño/schematic-diagrams>
- Ojeda Revah, L., & a. G. Á. (2000). La reforestación de Tijuana, Baja California como un mecanismo de reducción de riesgos naturales. *Estudios Fronterizos, Universidad Autónoma de Baja California, 1*, 9–31.
- Ordaz, M. (1996). Algunos conceptos del análisis de riesgo. *Revista Prevención, No. 14*(Centro Nacional de Prevención de Desastres, México), 6–11.
- Rodríguez Esteves, J. (2008). Elementos para la construcción social del riesgo climático en el noroeste de México: el caso de las lluvias en Tijuana, Baja California. In *Aires y lluvias*.

- Antropología del clima en México* (p. 638).
- Romo-Aguilar, M. de L. (1996). *Riesgos Naturales y Vulnerabilidad Social en Tijuana*. 155.
[https://www.colef.mx/posgrado/wp-content/uploads/files/Tesis_MAIA_Ma de Lourdes Romo Aguilar.pdf](https://www.colef.mx/posgrado/wp-content/uploads/files/Tesis_MAIA_Ma_de_Lourdes_Romo_Aguilar.pdf)
- Salas Salinas, M. A. (2011). *Metodología para la elaboración de mapas de riesgos por inundación en zonas urbanas* (Versión e).
- San Diego Digital Archives. (2020). *San Diego River at Old Town, 1916 Flood*. City of San Diego Government.
- San Diego Red. (2016). *100 Years Ago a Flood Almost Wiped Tijuana Off the Map*.
- SEDATU. (2018). *Términos de Referencia para la Elaboración de Atlas de Peligros y Riesgos*.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/300387/Te_rminos_de_Referencia_Atlas.pdf
- Tanaka, T., Kiyohara, K., & Tachikawa, Y. (2020). Comparison of fluvial and pluvial flood risk curves in urban cities derived from a large ensemble climate simulation dataset: A case study in Nagoya, Japan. *Journal of Hydrology*, 584(September 2019), 124706.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124706>
- Tijuana en el Tiempo. (2019). *Las lluvias de 1993 en Tijuana, la tormenta olvidada*.
<https://www.youtube.com/watch?v=oQjFZGXQkfM>
- Torres, M. A. (2020). *Experiencias en la evaluación del riesgo por fenómenos hidrometeorológicos*. Centro de Educación Continua en Ingeniería Civil.
https://www.youtube.com/watch?v=wcuj94TAK_E
- Winckell, A., Le Page, M., & Vela, R. (2005). Cincuenta años de la historia pluviométricas en Tijuana. *El Colegio de La Frontera Norte/Instiut de Recherche Pour Le Développement*, 81.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Wright, R. D., & Vela, R. (2005). *Tijuana River Watershed atlas*. San Diego States University, Colegio de la Frontera Norte.

VI. Glosario

Atlas de riesgos: Sistema integral de información geográfica sobre los agentes perturbadores y sistemas afectables, resultado de un análisis espacial y temporal sobre la interacción entre los peligros, la vulnerabilidad y el grado de exposición que pudieran afectar a una o varias zonas en el Estado.

Desastre: Al resultado de la ocurrencia de uno o más agentes perturbadores severos y o extremos, concatenados o no, de origen natural o de la actividad humana, que cuando acontecen en un tiempo y en una zona determinada, causan daños y que por su magnitud exceden la capacidad de respuesta de la comunidad afectada

Fenómeno Hidrometeorológico: Agente perturbador de origen natural que se genera por la acción de los agentes atmosféricos, tales como: ciclones tropicales, lluvias extremas, inundaciones pluviales, fluviales, costeras y lacustres; tormentas de nieve, granizo, polvo y electricidad; heladas; sequías; ondas cálidas y gélidas; y tornados.

Peligro: Probabilidad de ocurrencia de un agente perturbador potencialmente dañino de cierta intensidad, durante un cierto periodo y en un sitio determinado.

Riesgo: Daños o pérdidas probables sobre un agente afectable, resultado de la interacción entre su vulnerabilidad y la presencia de un agente perturbador.

Clima: Es el estado más frecuente de la atmósfera en un lugar determinado, y comprende los extremos y todas las variaciones en un periodo mínimo de 30 años.

Meteorología: Ciencia que estudia la atmósfera, comprende el estudio del tiempo y el clima y se ocupa del estudio físico, dinámico y químico de la atmósfera terrestre.

Localidad: Todo lugar que esté habitado.

Cauce: Se refiere a la zona más baja del terreno por donde normalmente escurre el agua que se precipita en las zonas aledañas.

Coefficiente de escurrimiento: Porcentaje de la lluvia convertida en escurrimiento. Su dimensión varía entre 0 y 1. Es inversamente correlacionado con la capacidad de filtración (por ejemplo, superficies impermeables tienen el más alto coeficiente de escurrimiento y viceversa).

Cortina: Estructura que tiene por objetivo interponerse al paso de la corriente para crear un almacenamiento o aprovechar parte de su escurrimiento hacia otro sitio.

Cuenca: Área que aporta el agua precipitada hasta un determinado punto sobre una corriente, a través de un sistema de corrientes. Está delimitada por el parteaguas.

Gasto: Es la cantidad de escurrimiento que pasa por un sitio determinado en un cierto tiempo, también se conoce como caudal. Este concepto se usa para determinar el volumen de agua que escurre en un río.

Intensidad de precipitación: Es la cantidad de lluvia que se precipita en cierto tiempo (altura de precipitación por unidad de tiempo). Sus unidades son mm/h, mm/día, etc.

Inundación: Evento que, debido a la precipitación, oleaje, marea de tormenta, o falla de alguna estructura hidráulica que provoca un incremento en el nivel de la superficie libre del agua de los ríos o el mar mismo, genera invasión o penetración de agua en sitios donde “usualmente” no la hay.

Periodo de retorno: Es el tiempo que, en promedio, debe transcurrir para que se presente un evento igual o mayor a una cierta magnitud. Normalmente, el tiempo que se usa son años y la magnitud del evento puede ser el escurrimiento, expresado como un cierto gasto, una lámina de precipitación o una profundidad de inundación (tirante). Se subraya que el evento analizado no

ocurre exactamente en el número de años que indica el periodo de retorno, ya que éste puede ocurrir el próximo o dentro del periodo especificado.

Presa: Obra de infraestructura hidráulica que ayuda a evitar o mitigar los daños provocados por una inundación, almacenando los escurrimientos generados en la cuenca y dejándolos salir de una manera controlada para no ocasionar daños aguas debajo de la misma.

Precipitación: Proceso por el cual el vapor de agua que forma las nubes se condensa, formando gotas de agua que al alcanzar el tamaño suficiente se precipitan, en estado líquido como lluvia o sólido como nieve o granizo, hacia la superficie terrestre. La precipitación pluvial se mide en milímetros (Ahrens, 2000).

Tirante: Elevación de la superficie del agua sobre un punto en el terreno.

Vulnerabilidad: La vulnerabilidad es la medida de la susceptibilidad de un bien expuesto a ante la ocurrencia de un fenómeno perturbador. De dos bienes expuestos uno es más vulnerable si, ante la ocurrencia de fenómenos perturbadores con la misma intensidad, éste sufre mayores daños (Ordaz, 1996).