



**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

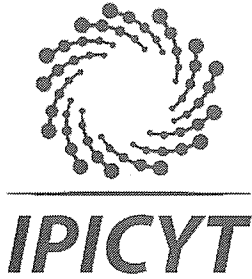
**Respuesta hidrológica en zonas urbanas ante
eventos severos de tormenta aplicando modelación
numérica e información SAR: Caso Los Mochis**

Tesis que presenta
Rodrigo Dávila Ortiz

Para obtener el grado de
Maestro en Geociencias Aplicadas

Director de la Tesis:
Dr. José Tuxpan Vargas

San Luis Potosí, S.L.P., 16 de diciembre de 2019



Constancia de aprobación de la tesis

La tesis ***“Respuesta hidrológica en zonas urbanas ante eventos severos de tormenta aplicando modelación numérica e información SAR: Caso Los Mochis”*** presentada para obtener el Grado de Maestro en Geociencias Aplicadas, fue elaborada por **Rodrigo Dávila Ortiz** y aprobada el dieciséis de diciembre del dos mil diecinueve por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Dr. José Tuxpan Vargas
Director de la tesis

Dr. José Noel Carbajal Pérez
Miembro del Comité Tutorial

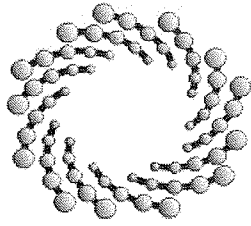
Dr. José Alfredo Ramos Leal
Miembro del Comité Tutorial



Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en el Laboratorio de Geomática y Modelación Numérica de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección del Dr. José Tuxpan Vargas

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología 634424 y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.



IPICYT

Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 051 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Maestría en Geociencias Aplicadas está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 16 días del mes de diciembre del año 2019, se reunió a las 14:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

Dr. José Alfredo Ramos Leal	Presidente	IPICYT
Dr. Juan Alberto Velázquez Zapata	Secretario	COLSAN
Dr. Josue de Lara Bashulto	Sinodal	IPICYT
Dr. José Tuxpan Vargas	Sinodal	IPICYT

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

MAESTRO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

sustentó el C.

Rodrigo Dávila Ortiz

sobre la Tesis intitulada:

Respuesta hidrológica en zonas urbanas ante eventos severos de tormenta aplicando modelación numérica e información SAR: Caso Los Mochis

que se desarrolló bajo la dirección de

Dr. José Tuxpan Vargas

El Jurado, después de deliberar, determinó

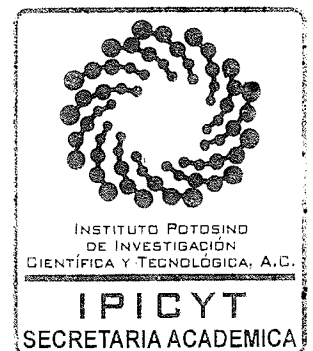
APROBARLO

Dándose por terminado el acto a las 15:20 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición del interesado y para los fines que al mismo convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 16 días del mes de diciembre de 2019.

Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez
Jefa del Departamento del Posgrado

Dr. Marcial Bonilla Marín
Secretario Académico



*Dedicado a mis personas favoritas:
Ma. Del Carmen Ortiz y Santy Dávila*

Agradecimientos

A mis padres Isaías Dávila y Carmen Ortiz por todo su amor, cariño y apoyo. Gracias por darme las herramientas para salir adelante, este y todos mis logros se los debo a ustedes.

A mi hermano Héctor por siempre estar ahí para apoyarme. Eres un gran hermano

Al Dr. José Tuxpan, por su guía, confianza y gran apoyo durante todo este trayecto, sin dudas, he aprendido mucho bajo su asesoría.

Al Dr. Juan Alberto, por sus sabios consejos y apoyo durante los últimos 5 años, pero en especial gracias por tu amistad

Al Dr. José Alfredo Ramos Leal por sus comentarios y retroalimentación, que han sido de gran ayuda para el enriquecimiento de este trabajo de investigación

Al Dr. Josué De Lara Bashulto, por sus comentarios y observaciones para la mejora de esta Tesis

A Cynthia por su apoyo durante este proceso

A Paola Vianey por siempre escucharme y darme ánimos para seguir

A todos

¡Gracias Totales!

Contenido

Constancia de aprobación de la tesis	ii
Créditos institucionales	iii
Acta de examen	iv
Dedicatorias	v
Agradecimientos	vi
Lista de tablas	ix
Lista de figuras	x
Abreviaturas	xv
Resumen	xvi
Abstract	xvii
Capítulo 1. Generalidades	18
1.1. Introducción	20
1.2. Justificación	20
1.3. Hipótesis	21
1.4. Objetivos	21
1.4.1. Objetivo general	21
1.4.2. Objetivos específicos	21
Capítulo 2. Marco Conceptual	22
2.1. Inundaciones	22
2.2. El problema de las inundaciones en un contexto social	23
2.3. Análisis de inundaciones	24
2.4. Modelos de inundación	25
2.4.1. Modelos 1D	26
2.4.2. Modelos 2D	26
2.4.3. Modelos 3D	28
2.5. Modelos de enrutamiento hidrológico	29
2.6. Modelos de enrutamiento hidráulico	31
2.7. Observación y monitoreo de inundaciones mediante sensores remotos	36
2.7.1. Datos ópticos multiespectrales	37
2.7.2. Imágenes SAR	38
Capítulo 3. Descripción de la Zona de Estudio	40
3.1. Localización y vías de comunicación	41
3.2. Fisiografía	42
3.3. Hidrografía	43
3.4. Edafología	44
3.5. Clima	46
3.5.1. Unidades climáticas	46
3.5.2. Características de las variables climatológicas observadas	47

3.6. Uso de suelo y vegetación	50
3.7. Infraestructura hidráulica	51
3.7.1. Red de canales	54
3.7.2. Red de drenes	56
3.7.3. Red de colectores pluviales	59
3.8. El problema de las inundaciones en los Mochis	60
Capítulo 4. Materiales y Métodos	64
4.1. Planteamiento metodológico	64
4.2. Información meteorológica	65
4.3. Modelo hidrológico-hidráulico bidimensional FLO-2D	71
4.3.1. Funcionamiento del modelo FLO-2D	72
4.3.2. Operación del modelo FLO-2D	73
4.3.3. Estabilidad numérica del modelo	75
4.3.4. Complementos y ventajas del modelo	76
4.3.5. Validación del modelo	76
4.4. Generación de datos del modelo	78
4.4.1. Topografía	78
4.4.2. Coeficiente de rugosidad N de Manning	80
4.4.3. Factores de reducción de área y factores de reducción de anchura	84
4.4.4. Red de drenes y canales	86
4.4.5. Infraestructuras hidráulicas	89
4.5. Información satelital	90
4.5.1. Adquisición datos Sentinel 1 y Sentinel 2	91
4.5.2. Correcciones y preprocesamiento	93
4.6. Umbralización	96
Capítulo 5. Discusión y Resultados	99
5.1. Identificación de zonas inundadas con productos satelitales ópticos	99
5.2. Identificación de zonas de inundación con imágenes de RADAR	101
5.3. Simulación numérica de inundaciones con el modelo FLO-2D	102
5.3.1. Resultados de la simulación de la Depresión Tropical 19-E: Nivel Cuenca	104
5.3.2. Resultados de la simulación de la Depresión Tropical 19-E: Los Mochis, Sin.	107
5.3.3. Escenarios de inundación	111
Capítulo 6. Conclusiones	120
Trabajo Futuro	122
Referencias	124

Lista de tablas

Figura	Página
Tabla 1. Términos de la ecuación de onda dinámica	37
Tabla 2. Listado de las principales inundaciones que se ha presentado en el Municipio de Ahome, Sinaloa en los últimos 30 años. Elaborada con base en fuentes hemerográficas recopilados por el Sistema de Inventario de Desastres DesInventar (Corporación OSSO & LA RED, 1994) y el Atlas de Riesgo de los Mochis (IMPLAN, 2012a).	63
Tabla 3. Clases incluidas en el muestreo que se realizó para el clasificador de superficies. En la columna derecha se muestran los valores de coeficiente de rugosidad de Manning para cada una de las clases	83
Tabla 4. Productos satelitales utilizados en este trabajo de investigación	95
Tabla 5. Set de experimentos para simulación de inundaciones	105

Lista de figuras

Figura	Página
Figura 1. Representación unidimensional del flujo utilizando una serie de secciones transversales y los dominios 1D y 2D del modelo. Fuente: Davies & Mehta (2015)	26
Figura 2. Elementos de continuidad (a) y balance de fuerzas (b) para una sección de río. Sección trasversal de río para formulación de continuidad 1-D (c). Fuente: Bedient et al. (2007); Julien (2018).	29
Figura 3. Localización de la zona de estudio. Se observa el límite de la zona urbana de Los Mochis, Sinaloa, además, se incluyen los atributos más importantes de la zona, límite de la cuenca RH10Fb y sus corrientes de agua, red de canales y drenes y colectores pluviales. Elaborado con base en información de INEGI (2010, 2013)	40
Figura 4. Principales carreteras y puntos de acceso para Los Mochis, Sinaloa. Recuperado de: H. Ayuntamiento de Ahome (2014)	41
Figura 5. Cuenca del Río Fuerte y el sistema de presas y derivadoras que alimentan el Distrito de Riego 75	43
Figura 6. Mapa con la distribución espacial de los tipos de suelo que se presentan en la zona de estudio. Elaborado con base en información de INIFAP & CONABIO (2001)	45
Figura 7. Unidades Climáticas presentes en la zona de estudio, según el sistema de clasificación climática Köppen modificado por García (2004). Adicionalmente, se incluye la estación meteorológica Los Mochis (25116) la cual fue usada para la caracterización de las variables climatológicas observadas. Elaborado con base en información de INEGI (2008)	47
Figura 8. Precipitación (a) y temperatura promedio (b) media mensual estimados para el periodo 1964-2012 en la estación meteorológica Los Mochis (25116). Elaborado con base en información del SMN (CLICOM, 2016)	48
Figura 9. Precipitación anual acumulada estimada para el periodo 1964-2012 en la estación meteorológica Los Mochis (25116). Elaborado con base en información del SMN (CLICOM, 2016)	49
Figura 10. Mapa de la distribución espacial de uso de suelo y cobertura vegetal en la zona de estudio. Elaborado con base en INEGI (2017) y SEDENA (2015)	50
Figura 11. Mapa que muestra la distribución de la red de colectores pluviales (líneas rojas), canales principales (líneas azules) y secundarios (líneas cian) y sus secciones subterráneas o entubadas (líneas amarillas), drenes superficiales (líneas verdes claro) y los drenes que han sido entubados (líneas verdes oscuro), además, las principales plantas potabilizadoras en la zona urbana de Los Mochis, Sin	52

Figura 12. Compuertas sobre el Canal Sublateral 23+700 (13) que regulan el flujo de entrada en el Canal Ramal 2+700. Obtenida de Street View de Google Maps (diciembre de 2009).	55
Figura 13. Estado actual del Dren Juárez (a) y la propuesta de proyecto para su desvío hacia el Dren Buenaventura a través de los drenes Bayoneta y Cerillos (b). El proyecto comienza con la obstrucción de flujo del Dren Juárez en el puente de la Carretera Federal No. 15 “México Nogales” y su interconexión con el Dren Bayoneta (c) y termina con la descarga de agua residual de riego a 280 m de la línea de costa de Bahía Santa María (d). Fuente: H. Ayuntamiento de Ahome (2012)	57
Figura 14. Intersección entre el Dren Álamo (23) y el Dren Juárez (24). El área comprendida entre esta confluencia y el Canal Sublateral 23+700 (13) y sus alrededores, es un punto crítico, ya que, en época de lluvias suelen presentarse inundaciones por el desborde de estas infraestructuras hidráulicas	58
Figura 15. Fotografías captadas durante inundaciones históricas en la ciudad de Los Mochis, Sinaloa, durante el año 1928 (izquierda) y la más reciente en septiembre de 2018 (derecha). Esta última vinculada a la Depresión Tropical 19-E. Fuente: El Debate (2018b, 2018d)	61
Figura 16. Zonas inundables de riesgo alto (azul marino), medio (azul cielo) y bajo (blanco) en Los Mochis, Sinaloa según el Atlas de Riesgos Naturales en la ciudad de Los Mochis 2011. Recuperado de IMPLAN, (2012a)	63
Figura 17. Planteamiento metodológico para la zonificación de áreas de inundación propuesto en este proyecto de investigación	64
Figura 18. Ubicación de la estación meteorológica Camajoa (en amarillo) con respecto del centro urbano de los Mochis (en rojo)	66
Figura 19. Precipitación registrada durante la Depresión Tropical 19-E, en los días 19 y 20 de septiembre de 2018 en la estación meteorológica Camajoa. Se estima que la lluvia acumulada al final del evento fue de 125.8 mm. Elaborado con base en datos de INIFAP (2018).	67
Figura 20. Curvas IDF, estimadas para la generación de tormentas sintéticas en la zona de estudio	69
Figura 21. Hietograma de una tormenta de diseño con una duración de 2 horas y un periodo de retorno de 100 años estimada para la zona de estudio	70
Figura 22. Celda del modelo FLO 2-D, la cual puede transitar flujo a celdas aledañas a través de 8 direcciones	71
Figura 23. Esquematación de los procesos físicos simulados por FLO-2D. Recuperado de: FLO-2D Software Inc. (2017)	72
Figura 24. Esquematación de la descarga de flujo a través de los elementos espacialmente mallados. Recuperado de: FLO-2D Software Inc. (2017)	73
Figura 25. Esquematación del proceso de simulación de inundaciones con la paquetería FLO-2D (FLO-2D Software Inc., 2017)	74

Figura 26. Elevación del dominio espacial 1 (Cuenca RH10Fb) y el dominio espacial 2 (Zona Urbana de Los Mochis). Elaborado con base en información de INEGI (2013, 2017b)	76
Figura 27. Superposición de distribuciones entre dos clases para un elemento X (un pixel), situación común en los clasificadores de máxima verosimilitud, el cual se soluciona implementado el teorema para toma de decisiones de Bayes. Los círculos concéntricos que aparecen en cada clase, se conocen como líneas de isoprobabilidad. Fuente: Valero Medina & Alzate Atehortúa (2019)	83
Figura 28. Raster de salida del proceso de clasificación con el algoritmo MLC. En la figura fueron incluidos el polígono de la zona urbana de la ciudad de Los Mochis, Sin (contorno negro) y los puntos de muestreo tomados para la generación de firma espectral para cada clase. Las clases generadas fueron para asfalto, concreto, suelo desnudo (terracería), vegetación (zonas con árboles y pasto) y zonas de cultivo.	84
Figura 29. Esquematización del proceso de generación de valores ARF y WRF para la simular el efecto de un edificio	85
Figura 30. Mapa de manzanas y calles dentro de la zona urbana de los Mochis usado para la generación de los valores ARF y WRF	86
Figura 31. Ejemplos de las principales fuentes de información a partir de las cuales se caracterizó la red de drenes y canales, en estas se incluyen a) mapas de red de canales y drenes emitidos por IMPLAN (2012a, 2012b), b) imágenes capturadas a través de Street View, c) planos y especificaciones técnicas recolectados en Manifestaciones de Impacto Ambiental, archivos gubernamentales y proyectos hidráulicos y d) fotografías recuperadas de diversos sitios de la web (medios informativos, portales educativos, etc)	87
Figura 32. Estructura básica de canal trapezoidal con sus componentes, talud (Z), base de fondo (b), base superior (T) y altura de flujo (T)	88
Figura 33. Ejemplos de tipos de entrada de alcantarillas. Fuente: Schall et al. (2012)	89
Figura 34. Ejemplos de tipos de alcantarilla en la zona de estudio. Alcantarilla de caja (a: recuperado de Street View; agosto 2015) y alcantarilla de tubería triple (b; López, 2018) en el Dren Álamo, Los Mochis	90
Figura 35. Modos de adquisición de productos Sentinel 1. Fuente: ESA (2019).	92
Figura 36. Diagramas de flujo para el pre-procesamiento de las imágenes multiespectrales Sentinel-2 (A) y las imágenes SAR Sentinel-1 (B).	94
Figura 37. Firma espectral del agua clara de un río en comparación con el agua turbia de un río con una concentración de 99 mg/l solidos suspendidos, la cual presenta características espectrales similares al agua presente en zonas inundadas. Las barras de color azul, verde y roja, representan la resolución espectral de las bandas el espectro visible del sensor Sentinel-2A MSI. Fuente: Malinowski et al. (2015)	97

Figura 38. Composición RGB de Los Mochis Sinaloa, obtenida a través de imágenes Satelitales ópticas de la plataforma SENTINEL-2A durante los días 19 y 21 de septiembre de 2018	99
Figura 39. Vista área de Los Mochis Sinaloa durante el 21 de septiembre de 2019. En azul se aprecian las zonas cubiertas por agua como producto la tormenta tropical 19-E estimadas a través de técnicas de percepción remota pasiva.	100
Figura 40. Mascara para la identificación de zonas cubiertas por agua (blanco) en Los Mochis Sinaloa (polígono morado) durante el 22 de septiembre de 2019. a través de técnicas de percepción remota activa	101
Figura 41. Altura de Flujo Máxima registrada durante la simulación del evento: Tormenta Tropical 19-E en la subcuenca RH10Fb	104
Figura 42. Altura de Flujo Final registrada durante la simulación del evento: Tormenta Tropical 19-E en la subcuenca RH10Fb	105
Figura 43. Velocidad de Flujo Máxima registrada durante la simulación del evento: Tormenta Tropical 19-E en la subcuenca RH10Fb	105
Figura 44. Velocidad de Flujo Final registrada durante la simulación del evento: Tormenta Tropical 19-E en la subcuenca RH10Fb	106
Figura 45. Altura de flujo máxima registrada durante la simulación del evento: Tormenta Tropical 19-E en la zona urbana de Los Mochis, Ahome, Sinaloa	108
Figura 46. Altura de flujo máxima registrada durante la simulación del evento: Tormenta Tropical 19-E en la zona urbana de Los Mochis, Ahome, Sinaloa	108
Figura 47. Altura de Flujo Final registrada durante la simulación del evento: Tormenta Tropical 19-E en la zona urbana de los Mochis, Ahome, Sinaloa.	109
Figura 48. Velocidad de Flujo Máxima registrada durante la simulación del evento: Tormenta Tropical 19-E en la zona urbana de los Mochis, Ahome, Sinaloa.	110
Figura 49. Velocidad de Flujo Máxima registrada durante la simulación del evento: Tormenta Tropical 19-E en la zona urbana de los Mochis, Ahome, Sinaloa	110
Figura 50. Esquemmatización del criterio TOL, parámetro de estabilidad numérica utilizado por FLO-2D para determinar a partir de que volumen, el agua de precipitación se convierte a escorrentía. Extraído de: FLO-2D Software Inc. (2017b, p.)	112
Figura 51. Resultados de la simulación del escenario Tr: 10_3 hrs en la zona urbana de los Mochis, Ahome, Sinaloa. El conjunto de mapas corresponde a: A Profundad máxima de flujo, B: Velocidad máxima, C: Profundidad Final y D: velocidad final	114
Figura 52. Resultados de la simulación del escenario Tr: 10_6 hrs en la zona urbana de los Mochis, Ahome, Sinaloa. El conjunto de mapas corresponde a: A Profundad máxima de flujo, B: Velocidad máxima, C: Profundidad Final y D: velocidad final	115
Figura 53. Resultados de la simulación del escenario Tr: 100_2 hrs en la zona urbana de los Mochis, Ahome, Sinaloa. El conjunto de mapas	116

corresponde a: A Profundad máxima de flujo, B: Velocidad máxima, C: Profundidad Final y D: velocidad final

Figura 54. Resultados de la simulación del escenario Tr: 100_3 hrs en la zona urbana de los Mochis, Ahome, Sinaloa. El conjunto de mapas corresponde a: A Profundad máxima de flujo, B: Velocidad máxima, C: Profundidad Final y D: velocidad final 118

Figura 55. Resultados de la simulación del escenario Tr: 100_6 hrs en la zona urbana de los Mochis, Ahome, Sinaloa. El conjunto de mapas corresponde a: A Profundad máxima de flujo, B: Velocidad máxima, C: Profundidad Final y D: velocidad final 119

.

Abreviaturas

CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CENAPRED	Centro Nacional de Prevención de Desastres
IMPLAN	Instituto Municipal de Planeación (de Ahome)
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
INIFAP	Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias
OMM	Organización Meteorológica Mundial
SCT	Secretaría de Comunicaciones y Transportes
SEDENA	Secretaría de la Defensa Nacional
SEMAR	Secretaría de Marina
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SMN	Servicio Meteorológico Nacional

Resumen

Respuesta hidrológica en zonas urbanas ante eventos severos de tormenta aplicando modelación numérica e información SAR: Caso Los Mochis

En años recientes, las inundaciones se han convertido en el fenómeno natural con mayor afectación a nivel mundial provocando severas pérdidas económicas. En el caso de México debido a sus características fisiográficas posee un alto grado de vulnerabilidad ante eventos hidrometeorológicos. Es por ello, que en este trabajo de investigación se enfoca en estudiar el comportamiento de inundaciones urbanas considerando modelación numérica empleando alta resolución espacial e integrándola con infraestructura superficial bajo diferentes periodos de retorno. Para la zona de estudio se eligió la ciudad de Los Mochis, Sinaloa y como evento particular el ocurrido el 19 de septiembre de 2018 debido a la depresión tropical 19-E evento que causó un grave daño a la ciudad.

Se empleó el modelo hidráulico-hidrológico bidimensional FLO-2D alimentado por información meteorológica, información vectorial de superficie terrestre, así como de datos satelitales de sensores pasivos y activos de la zona de estudio. Los datos meteorológicos se obtuvieron de tres fuentes de información, estaciones climáticas de CLICOM y de INIFAP, además de isoyetas de precipitación de la SCT. Con estos datos se calcularon escenarios de precipitación e hietogramas de entrada para la generación de patrones de lluvia en periodos de retorno de 2,5 10 y 100 años para la ciudad de Los Mochis, Sinaloa. La caracterización e identificación del tipo y uso de suelo se realizó mediante las capas vectoriales obtenidas por el INEGI, SEDENA y SIALT. Como herramienta de soporte se emplearon datos provenientes de plataformas satelitales para la identificación de zonas de inundación.

La modelación se realizó bajo dos dominios a nivel cuenca y a nivel local (Cd. de Los Mochis). Los resultados obtenidos identifican que la ciudad de Los Mochis no se ve afectada significativamente por escurrimientos regionales y que los eventos de inundación que se presentan son debido a factores más locales. Se identificaron también que precipitaciones superiores a 90 mm pueden ser causa de inundaciones moderadas en la ciudad. Sin embargo, se detectó que la infraestructura urbana maximiza el efecto de inundación provocando la acumulación del fluido en diversas zonas de la ciudad.

Las técnicas empleadas e integradas en modelos de alta resolución permiten recrear satisfactoriamente eventos de inundación, permitiendo generar mapas de peligro que pueden ser utilizados para procesos de gestión y planificación urbana.

PALABRAS CLAVE. Mapas de peligro, inundaciones urbanas, lluvias extremas, FLO-2D

Abstract

Hydrological response in urban areas to severe storm events using numerical modeling and SAR information: Los Mochis case

In recent years, floods have become the natural phenomenon with the greatest impact worldwide causing severe economic losses. In the case of Mexico, due to its physiographic characteristics, it has a high degree of vulnerability to hydrometeorological events. It is for this reason, that in this research work it focuses on studying the behavior of urban floods considering numerical modeling using high spatial resolution and integrating it with surface infrastructure; under different return periods. For the study area, the Los Mochis City, Sinaloa was chosen and as a particular event occurred on September 19, 2018 due to the tropical depression 19-E event that caused serious damage to the city.

The two-dimensional hydraulic-hydrological model FLO-2D fed by meteorological information, land surface vector information was used; as well as satellite data of passive and active sensors in the study area. The meteorological data were obtained from three sources of information, CLICOM and INIFAP weather stations; in addition to SCT precipitation isohyets. With these data, precipitation scenarios and input hyetographs were calculated for the generation of rain patterns in return periods of 2.5, 10 and 100 years for the city of Los Mochis, Sinaloa. The characterization and identification of the type and use of land was carried out by means of the vector layers obtained by the IINEGI, SEDENA and SIALT. As a support tool, data from satellite platforms were used to identify flood zones.

The modeling was carried out under two domains at the basin level and at the local level (Los Mochis). The results obtained identify that the Los Mochis is not significantly affected by regional runoff and that the flood events that occur are due to local factors. It was also identified that rainfall greater than 90 mm can cause moderate flooding in the city. However, it was detected that urban infrastructure maximizes the effect of flooding causing the accumulation of fluid in various areas of the Cd.

The techniques used and integrated in high resolution models allow to successfully recreate flood events. Allowing to generate hazard maps that can be used for urban planning and management processes.

KEYWORDS. Hazard maps, urban floods, extreme rains, FLO-2D

Capítulo 1. Generalidades

1.1 Introducción

De acuerdo con el reporte realizado por la Organización Meteorológica Mundial, se han registrado 8,835 desastres a nivel global entre los años 1970 a 2012, sólo las inundaciones constituyen el 44% de estos eventos (Golnaraghi, Etienne, Guha-Sapir & Below, 2014), siendo así el desastre más frecuente y generalizado alrededor del mundo. En ese mismo reporte, se señalan otras importantes cifras, por ejemplo, 14% de las muertes registradas y 33% del total de pérdidas económicas reportadas durante estos desastres se atribuyen directamente a la presencia de inundaciones, mientras que un 40% de las pérdidas humanas y 55% de pérdidas económicas, se relacionaron a la incidencia de tormentas extremas (Golnaraghi *et al.*, 2014). Por su parte, de acuerdo al *International Disaster Database* (EM-DAT; Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2019) cerca de 800 millones de personas fueron afectadas por inundaciones durante la última década (2006-2015), mientras que las pérdidas económicas se estimaron por encima de los 0.3 billones USD (Domeneghetti, Schumann, & Tarpanelli, 2019).

Bajo este contexto, se han desarrollado diversas herramientas para mejorar nuestro entendimiento sobre los procesos involucrados en los fenómenos de inundaciones, y métodos para poder predecirlos (Teng *et al.*, 2017a). Avances recientes, han presentado mejoras significativas en el estudio, monitoreo y simulación de inundaciones. Sin embargo, nuestro conocimiento y capacidad de modelización de estos eventos, aún sigue siendo limitada, esto se relaciona principalmente con la disponibilidad de mediciones y datos auxiliares (Domeneghetti *et al.*, 2019). Es por esa razón, que el estudio y desarrollo de nuevos enfoques y metodologías para el análisis y simulación de inundaciones, así como la exploración de nuevas fuentes de información y alternativas para realizar mediciones, constituyen un área del saber en continuo crecimiento.

Por su parte, México debido a sus características físicas y geográficas, tiene un alto grado de vulnerabilidad ante eventos hidrometeorológicos extremos (Conde *et al.*, 2016). En ese sentido, las inundaciones han constituido una problemática histórica en nuestro país, teniendo como ejemplos importantes desastres como la inundación del 2007 en Villahermosa, Tabasco (Perevochtchikova & de la Torre, 2010) o la inundación de 1998 en Guasave, Sinaloa (Palafox Ávila, 2006). Por lo tanto, esfuerzos significativos se han realizado para la identificación y delimitación de zonas potencialmente inundables dentro del territorio nacional (*e.g.*; Salas Salinas & Jiménez Espinosa, 2004; Uribe-Alcántara, Montes-León & García-Celis, 2010), así como en la elaboración de planes operativos para la mitigación y control de inundaciones (*e.g.*, Organismo de Cuenca Pacífico Norte, 2017; Organismo de Cuenca Pacífico Norte de la CONAGUA & SEMARNAT, 2016). No obstante, esta práctica no es generalizada en todo el territorio mexicano, ya que existen zonas con alto grado de vulnerabilidad a presentar desastres por inundación, las cuales no cuentan con estudios pertinentes donde se identifiquen las áreas de mayor riesgo ante estos desastres.

Por ejemplo, la ciudad de Los Mochis es una zona con un alto grado de vulnerabilidad a eventos hidrometeorológicos severos relacionados a precipitaciones extremas (IMPLAN, 2012a), donde, la interacción entre las características físicas del medio y las condiciones socio-económicas dan como resultado una zona altamente riesgosa.

Ante este panorama, el alcance del presente estudio es la implementación de un modelo de inundación urbana de alta resolución en la zona urbana de Los Mochis, en el cual se incorporen elementos determinantes en el comportamiento hidráulico de la zona, como el efecto de calles y manzanas, además, de la determinación de zonas anegadas a través de elementos de percepción remota.

El manuscrito está organizado de la siguiente manera: el capítulo 1, contiene la justificación, hipótesis y objetivos de esta investigación. En el capítulo 2, se desarrolla el marco conceptual acerca de los modelos de inundación y dos de sus principales enfoques: la representación espacial del flujo en las tres dimensiones y

según el tipo de enrutamiento bajo el cual el modelo simulará la llanura de inundación. Además, se aborda de forma sucinta, la observación y monitoreo de inundaciones mediante sensores remotos. La descripción de la zona de estudio se presenta en el capítulo 3. Mientras que en el capítulo 4 se muestra el planteamiento metodológico para la zonificación de inundación propuesto en este trabajo de investigación, además, se describen los materiales y métodos empleados. Los resultados relevantes de la modelación hidráulica de inundaciones y la delimitación de zonas anegadas son analizados y discutidos en el capítulo 5. Finalmente, en el capítulo 6 se abordan las conclusiones finales, así como algunas recomendaciones.

1.2 Justificación

Tan solo en los últimos quince años, se han presentado cuatro desastres por inundación en Los Mochis, Sinaloa, los cuales han generado severas afectaciones a la población. Frente a esta problemática, surge la necesidad de generar estudios que permitan delimitar zonas con alto grado de vulnerabilidad ante este tipo de eventos. Bajo ese contexto, el presente trabajo de investigación se enfocará en la implementación de un modelo bidimensional de inundaciones con un alto grado de detalle, en el cual se permita la integración de información proveniente de diversas fuentes para incrementar su certidumbre.

1.3 Hipótesis

La infraestructura y el crecimiento urbano sin la planeación adecuada son factores que aumentan el riesgo a presentar Inundaciones urbanas a consecuencia de lluvias extremas, como la ocurrida en la ciudad de Los Mochis en septiembre del 2018. Una alternativa para prevenir esta problemática e identificar zonas vulnerables consiste en la generación de escenarios hipotéticos empleando modelación numérica e información satelital.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Identificar el peligro asociado por inundación a consecuencia de lluvias extremas en la Cd. de Los Mochis Sin., acoplando características superficiales del terreno con modelos de lluvia, y un modelo numérico de simulación hidráulica de inundaciones.

1.4.2 Objetivos específicos

- Realizar un análisis histórico de eventos severos de tormenta en la ciudad de Los Mochis.
- Caracterizar la tormenta de septiembre de 2018 registrada en Los Mochis.
- Caracterizar la ciudad de Los Mochis e identificar su infraestructura de drenaje.
- Modelar el evento ocurrido en septiembre de 2018 y estimar/comparar zonas de inundación mediante información satelital SAR (Calibración de modelo).
- Diseñar, generar y evaluar un set de experimentos bajo múltiples condiciones de precipitación para la identificación de zonas vulnerables.

Capítulo 2. Marco Conceptual

2.1 Inundaciones

CENAPRED indica que “de acuerdo con el glosario internacional de hidrología (OMM/UNESCO, 1974), la definición oficial de inundación es: aumento del agua por arriba del nivel normal del cauce”, entendiendo nivel normal como la elevación de superficie de agua en que no se presentan afectaciones de ningún tipo (Salas Salinas & Jiménez Espinosa, 2004). Bajo este contexto, el fenómeno de las inundaciones constituye un problema muy complejo, donde interactúan múltiples factores que generan diversos tipos de afectaciones, que pueden ir desde un nivel local a uno regional. En otras palabras, el fenómeno de inundaciones no puede ser definido solamente como la consecuencia de un evento natural específico, por el contrario, su estudio requiere de un análisis profundo y detallado de sus principales causas y a las formas en que estas relacionan entre sí.

El fenómeno de las inundaciones, son probablemente el desastre natural más devastador, generalizado y frecuente para las sociedades humanas (Herath & Wijesekera, 2019; Teng *et al.*, 2017), aunado a esto, en las últimas tres décadas, hemos sido testigos de un aumento en la incidencia de estos eventos, (Freer *et al.*, 2013) lo cual se relaciona estrechamente a los cambios en las variables climáticas asociados al cambio climático, así como a la pérdida de cobertura vegetal debido al crecimiento urbano desmedido. Trabajos como el de Neupane & Kumar (2015) pronostican que la escala y la intensidad de los eventos de inundaciones aumentarán en el futuro.

Como se ha mencionado, aunque el riesgo a sufrir inundaciones varía mucho en función de las condiciones físicas del medio, esta problemática está ampliamente generalizada en todo el mundo. En un informe realizado por las Naciones Unidas se indica que desde el año 1995 hasta el 2015, las inundaciones representaron el 47 por ciento de todos los desastres relacionados con el clima (Anees *et al.*, 2016).

En México, se estima que las inundaciones originan un promedio de 100 muertes por año (Campos Aranda, 2015).

Ante este panorama, la investigación del fenómeno de inundaciones a través de los años, ha constituido un esfuerzo global (Teng *et al.*, 2017), en el que numerosos investigadores han abordado esta problemática a partir de diferentes enfoques y disciplinas valiéndose de herramientas cada vez más sofisticadas y confiables.

Desde un punto de vista físico, recientemente se han realizado importantes avances en los campos de la predicción climática y la simulación hidrológica (Kim, Choi & Han, 2019), así como mayores capacidades de procesamiento y avances en la ciencia computacional (*e.g.*, computo en paralelo, flujos de trabajo distribuidos, el uso de Unidades Gráficas de Procesamiento; Teng *et al.*, 2017), nuevos enfoques de simulación hidrológica como la implementación de algoritmos de inteligencia artificial (*e.g.*, Redes Neuronales Artificiales; Berkahn, Fuchs & Neuweiler, 2019) y *Machine Learning* (*e.g.*, *Naive Bayes Tree*; Khosravi *et al.*, 2019), y la incorporación de imágenes del terreno en alta resolución (*e.g.*, imágenes SAR, datos LiDAR; Teng *et al.*, 2017) en los modelos hidrológicos, éstos han representado mejoras sustanciales a la simulación de inundaciones, aunado a eso, con la llegada de los satélites meteorológicos, ahora es posible generar simulaciones hidrológicas en tiempo *cuasi* real, utilizando imágenes de precipitación en malla (*e.g.*, GOES-R, CHIRPS, etc; Funk *et al.*, 2015; NASA & GOES-R Series Program Office, 2019) para alimentar modelos hidrológicos e identificar zonas con alto potencial de inundarse (*e.g.* Wu *et al.*, 2014).

2.2 El problema de las inundaciones en un contexto social

A pesar de que el análisis de los factores sociales relacionados a la presencia de inundaciones no está comprendido dentro de los alcances de esta investigación, es importante resaltar su importancia, ya que, una práctica común en el análisis de desastres es el atribuirlos única y exclusivamente a la presencia de un evento

hidrometeorológico extremo. Está práctica, además de ser errónea, con frecuencia llega a ser usada como discurso político.

La realidad con respecto a las inundaciones (y a algunos otros tipos de catástrofes) es mucho más compleja que un solo evento anómalo, es un desastre producto de la interacción de diversos factores físicos y socio-económicos como la carencia de un sistema de drenaje adecuado, un deficiente ordenamiento del territorio, intereses económicos, etc.

Para el caso de Los Mochis, (tal como se especificará en capítulos posteriores) la distribución espacial de su urbanización, así como el diseño y disposición de su infraestructura hidráulica, juega un papel fundamental en las condiciones de riesgo por inundación, los cuales, ligados a la incidencia de lluvias por encima de la media en la ciudad y sus zonas aledañas, han propiciado la presencia de importantes desastres con severos impactos en la sociedad y daños estructurales.

Un análisis más profundo sobre la relación entre inundaciones y la construcción social de espacios riesgosos, puede ser consultada en los trabajos de Bautista Sosa (2017) y Calderón Aragón (2001).

2.3 Análisis de Inundaciones

El análisis de inundaciones consiste en el estudio sistematizado y detallado sobre las variables y condiciones involucradas en el fenómeno de inundación, con el fin de poder generar modelos que nos permitan comprender los procesos involucrados y predecir algunas de sus variables de corriente y planicie de inundación, como la profundidad y velocidad de flujo, permanencia y distribución espacial de zonas anegadas, entre otras (Teng *et al.*, 2017).

Existe una amplia gama de herramientas que pueden ser aplicadas en el análisis de inundaciones, por ejemplo, estudios de eventos históricos, recolección de testimonios, levantamientos de campo, métodos *in situ*, pruebas en laboratorio, etc.

Todos estos métodos son elementos importantes para el estudio y análisis de inundaciones, sin embargo, su limitación de escala impide estimar variaciones espaciales y temporales en grandes extensiones de terreno. Bajo este contexto, la modelación numérica ha sido una importante herramienta utilizada en estudios de inundación, ya que permite visualizar y simular el comportamiento dinámico de sistemas físicos, mediante la simplificación de una realidad compleja (Anees *et al.*, 2016; Chourushi, Lodha & Prakash, 2019).

La aplicación de modelos numéricos en análisis de inundaciones, ha sido un enfoque de investigación en crecimiento y una práctica ampliamente difundida con diversas aplicaciones, por ejemplo, trabajos sobre mapeo de zonas con riesgo a inundarse (*e.g.*, Grimaldi, Petroselli, Arcangeletti & Nardi, 2013), evaluación de daños ante escenarios de inundación (*e.g.*, Bhuiyan & Dutta, 2012), pronóstico de inundaciones en tiempo real (Arduino, Reggiani & Todini, 2005), integración de sistemas de percepción remota (Smith, 1997), diseño de redes de drenaje (Niazi *et al.*, 2017), etc.

2.4 Modelos de Inundación

Existe una gran cantidad de tipos de modelos hidrológicos enfocados al análisis de inundaciones, por ejemplo, modelos globales, espacialmente distribuidos, por eventos, continuos, físicos, estocásticos, determinísticos, conceptuales, de caja negra, etc. (Bedient, Huber & Vieux, 2007). Sin embargo, en este trabajo de investigación se hablará solo de dos enfoques de clasificación; el primero con base en la representación espacial del flujo en las tres dimensiones, teniendo así modelos unidimensionales (1D), bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D; Anees *et al.*, 2016; Teng *et al.*, 2017) y el segundo con respecto a las técnicas de enrutamiento que utiliza el modelo para predecir las variaciones en el hidrograma de entrada durante su tránsito por la cuenca, río o reservorio. Según el tipo de enrutamiento, los modelos de inundación puede dividirse en hidrológicos o hidráulicos (Bedient *et al.*, 2007).

2.4.1 Modelos 1D

En el campo de la hidráulica, la unidimensionalidad es una suposición que se puede asumir en diversos casos, ya sea, porque no es necesario una solución más detallada o porque el flujo sigue predominantemente una tendencia 1D, por ejemplo, en ríos rectos y uniformes o en una estructura hidráulica como canales, drenes, tuberías, etc (Teng *et al.*, 2017).

Los modelos de inundación 1D se basan en esquemas numéricos relativamente simples pero eficaces (principios de conservación de masa y *Momentum*, ecuación de Manning, etc; Molero Melgarejo, 2019). Estos modelos, consideran el flujo como unidimensional a lo largo de la línea central del canal del río (Figura 1). Para la modelación de la llanura de inundación, se considera que su flujo forma parte del escurrimiento del canal unidimensional central en una dirección paralela, y se utiliza una velocidad media de una sección transversal para representar variaciones en el caudal y velocidad de flujo (Teng *et al.*, 2017). Estos modelos probablemente son los más extensamente utilizados debido a su sencillez y amplia difusión (Molero Melgarejo, 2019).

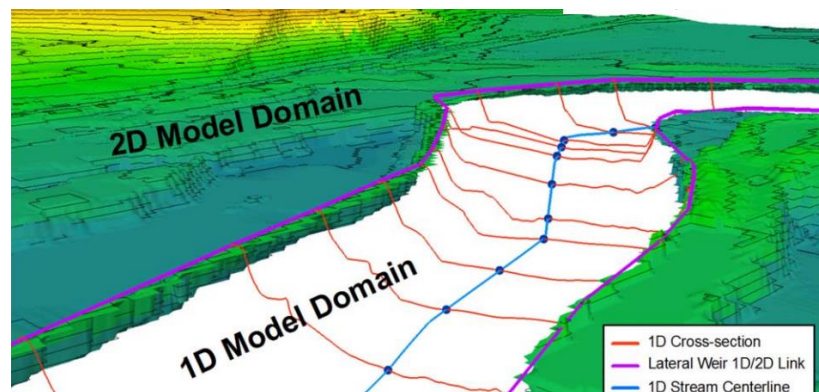


Figura 1. Representación unidimensional del flujo utilizando una serie de secciones transversales y los dominios 1D y 2D del modelo. Fuente: Davies & Mehta (2015).

2.4.2 Modelos 2D

Los modelos 2-D, simulan el flujo en la llanura de inundación en un espacio bidimensional el cual ha sido discretizado a través de un mallado estructurado

(celdas rectangulares), no estructurado (celdas triangulares) y más recientemente a través de mallas flexibles, las cuales se construyen con una resolución espacial más fina alrededor de áreas complejas para reflejar cambios sutiles en la topografía; y una resolución más gruesa para áreas de poca variación espacial con el fin de optimizar el coste computacional (Teng *et al.*, 2017).

En los modelos bidimensionales, la tercera dimensión (profundidad de flujo) es superficial en comparación con las otras dos dimensiones, estos modelos suelen basarse en las ecuaciones de Saint-Venant y Navier-Stokes (Anees *et al.*, 2016; Chow, 1959; Cunge, Holly & Verwey, 1980) adaptadas para flujos en dos dimensiones. Al tratarse de Ecuaciones Diferenciales Parciales (EDP) no lineales, estas carecen de una solución analítica, por lo que es necesario resolverlas empleando métodos numéricos.

Dependiendo del esquema de discretización numérica, los modelos se pueden clasificar en métodos de elementos finitos, diferencias finitas y volúmenes finitos (Teng *et al.*, 2017). En los métodos de elementos finitos, el dominio se divide en subdominios no-intersectantes, en este caso, son dominios espaciales de tamaño finito con formas geométricas simples, formando un mallado fino de elementos finitos (Sjodin, 2016). Los esquemas de diferencias finitas consideran un punto en el espacio donde se toma la representación continua de las ecuaciones y se reemplaza por un conjunto de ecuaciones discretas (Sjodin, 2016). Por su parte, los métodos de volúmenes finitos, de forma similar al esquema de elementos finitos, descomponen el dominio, ya sea espacial o de forma, en elementos finitos y pequeños, en este caso en volúmenes de control, en los cuales, se aplicarán las leyes de conservación de *Momentum* y continuidad (Sjodin, 2016). Estos métodos son cada vez más populares y son considerados la forma más eficiente para el desarrollo de esquemas bidimensionales de alta resolución (Molero Melgarejo, 2019; Teng *et al.*, 2017).

De acuerdo con la discretización en el tiempo, los modelos se pueden dividir en implícitos (el método numérico avanza al siguiente paso de tiempo una vez se haya resuelto todo el dominio) y explícitos (se puede resolver cada elemento de la malla

independientemente al resto del dominio en cualquier paso de tiempo). En la actualidad, los esquemas explícitos tienen una mayor aceptación en los modelos de inundación más recientes, debido a que son más simples de paralelizar (Teng *et al.*, 2017). No obstante, por cuestiones de estabilidad numérica (FLO-2D Software Inc., 2017a), estos están sujetos a la condición Courant Friedrichs-Lewy, condición de convergencia para resolver ecuaciones diferenciales parciales. Como consecuencia de esta condición, en modelos de malla discretizada los intervalos de tiempo deben ser inferiores que el tiempo necesario para que la onda atraviese los puntos de la malla adyacentes (Courant, Friedrichs & Lewy, 1967).

En la actualidad existe una amplia gama de paqueterías de software especializadas en la simulación numérica de inundaciones en dos dimensiones; trabajos como los de Anees *et al.* (2016), Dhami & Pandey (2019), Dimitriadis *et al.* (2016) y Néelz & Pender (2013) han realizado notables esfuerzos para evaluar el desempeño, eficiencia, incertidumbre y coste computacional de estos modelos bajo diferentes condiciones y escenarios.

2.4.3 Modelos 3D

En la simulación de inundaciones, los modelos de flujo en tres dimensiones suponen un importante desafío, sin embargo, estos son considerados dentro de las perspectivas más innovadoras en esta área del saber. En trabajos de investigación se ha propuesto el concepto de hidrodinámica de partículas suavizadas como una alternativa para la simulación de flujo en 3D (Teng *et al.*, 2017), esta metodología fue inicialmente desarrollada para aplicaciones astrofísicas. Además, recientemente se han logrado mejoras significativas en materia de gráficos por computadora, así como en procesamiento y almacenamiento de datos, lo cual podría impulsar notablemente el desarrollo de modelos 3D para escenarios de inundación.

Respecto a los modelos 3D para flujos de canales abiertos, estos ya han sido desarrollados recientemente con buenos resultados, no obstante, de acuerdo con Anees *et al.* (2016) hasta la actualidad no se cuenta propiamente con un modelo general para simulación de llanuras de inundación en tres dimensiones. Por su

parte, Teng *et al.* (2017) afirma que estos ya han sido desarrollados, aunque son pocos y algunos son más bien de tipo 2-D cuasi 3-D, también sugiere que el enfoque de modelación de partículas (modelo Lagrangiano) se perfila como una eficiente opción para la simulación de inundaciones 3-D aún en desarrollo.

2.5. Modelos de enrutamiento hidrológico

Dentro del campo de la hidrología, se entiende el enrutamiento como el conjunto de técnicas y métodos utilizados para predecir la progresión del hidrograma de inundación a través de un cuerpo de agua, cuenca, reservorio, estructura hidráulica, etc. Por consiguiente, la mayoría de los modelos de inundación se basan en técnicas de enrutamiento, las cuales pueden ser divididas en dos categorías principales: enrutamiento hidrológico y enrutamiento hidráulico (Bedient *et al.*, 2007).

Los modelos basados en enrutamiento hidrológico suelen ser más simples, ya que por lo general se basan en un balance de masas entre el flujo de entrada, flujo de salida y el volumen de almacenamiento a través de la ecuación de continuidad, además, comúnmente se involucran relaciones para determinar la tasa de cambio en el volumen de almacenamiento (Bedient *et al.*, 2007).

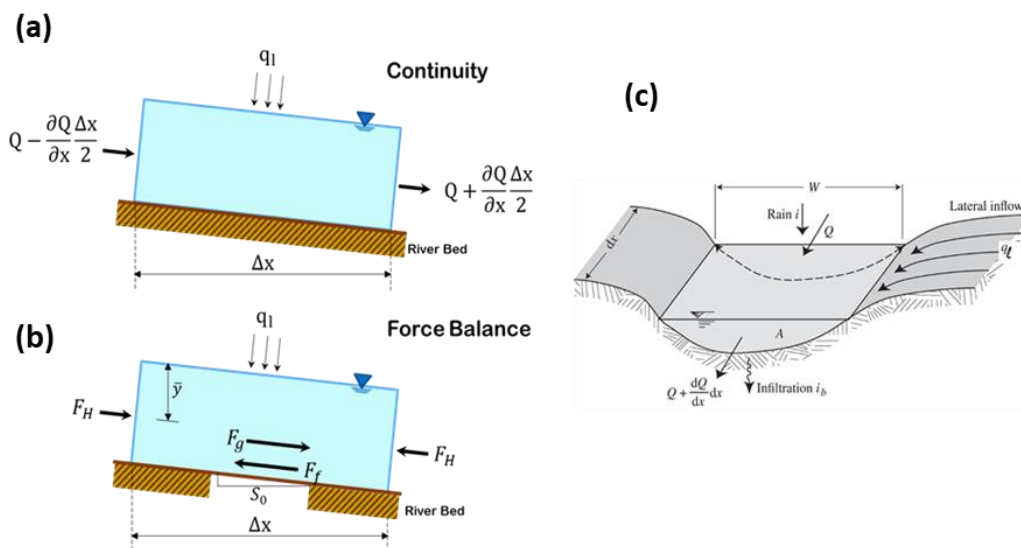


Figura 2. Elementos de continuidad (a) y balance de fuerzas (b) para una sección de río. Sección transversal de río para formulación de continuidad 1-D (c). Fuente: Bedient *et al.* (2007); Julien (2018).

La ecuación de continuidad se basa en la ley de conservación de masas, aplicada a través de un volumen de control \forall . En la Figura 2a, se observan los elementos de la ecuación de continuidad en una sección de río, aquí se puede apreciar que el volumen de control al entrar en la sección genera un flujo de entrada representado por la ecuación 1.

$$Inflow = \left(Q - \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \Delta t + q_l \Delta x \Delta t \quad (1)$$

Para esta ecuación se ha incluido el uso de EDP, debido a que sus soluciones son funciones que dependen tanto de las variaciones con respecto del tiempo (Δt) y respecto al desplazamiento en una dirección (Δx) donde el término q_l representa la tasa de flujo lateral por unidad de desplazamiento en el canal (Figura 2b). A continuación, se muestran las ecuaciones correspondientes al flujo de salida (ecuación 2) y a la tasa de almacenamiento (ecuación 3).

$$Outflow = \left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \Delta t \quad (2)$$

$$Rate\ of\ change\ of\ Store = \frac{\partial A}{\partial t} \Delta x \Delta t \quad (3)$$

Donde, Q representa al caudal del volumen de control y A el área de la sección transversal del río.

Para deducir la ecuación de continuidad, se hace un balance de masa entre las entradas, salidas y almacenamiento y se obtiene:

$$Inflow - Outflow = Rate\ of\ change\ of\ Store \quad (4)$$

$$\left(Q - \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \Delta t + q_l \Delta x \Delta t - \left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \Delta t = \frac{\partial A}{\partial t} \Delta x \Delta t \quad (5)$$

En este punto, es necesario señalar que se asume un flujo estacionario de canal abierto el cual no presenta aportaciones por precipitación o pérdidas por evaporación o infiltración.

Posteriormente, la ecuación se simplifica hasta obtener la ecuación 8.

$$-2 \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \Delta t + q_l \Delta x \Delta t = \frac{\partial A}{\partial t} \Delta x \Delta t \quad (6)$$

$$\left(-\frac{\partial Q}{\partial x} + q_l \right) \Delta x \Delta t = \frac{\partial A}{\partial t} \Delta x \Delta t \quad (7)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0 \quad (8)$$

Para usos prácticos, en la representación 1-D de la ecuación de continuidad se considera que no hay flujo lateral (Julien, 2018), por lo que, la ecuación de continuidad esencial para modelos hidrológicos, se expresa como:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

2.6 Modelos de enrutamiento hidráulico

Estos métodos suelen ser más exactos, pero al mismo tiempo más complejos que el enrutamiento hidrológico, ya que no solo engloban la ecuación de continuidad, sino también la ecuación de conservación de *Momentum* para flujo en canales abiertos (Bedient *et al.*, 2007). El conjunto de este par de ecuaciones diferenciales, se conoce como ecuaciones de Saint-Venant (Chow, 1959; Cunge *et al.*, 1980) y son la base, para un gran número de modelos de inundación. Como previamente se ha mencionado, para resolver estas ecuaciones, se suelen aplicar modelos numéricos computacionales, los cuales mediante esquemas implícitos o explícitos simulan la propagación del flujo a través de espacio previamente discretizado en una rejilla (Bedient *et al.*, 2007).

La ecuación de *Momentum* resulta al igualar las fuerzas externas aplicadas al volumen de control como la fuerza de gravedad (F_G), la presión hidrostática (F_H) y la fuerza de fricción en la superficie del lecho del río (F_f ; Figura 2c). Otras fuerzas como la ejercida por el viento o las fuerzas de contracción/expansión del fluido (Giles, 2017; Julien, 2018), tienen un bajo o nulo efecto sobre el sistema de conservación de *Momentum*, por lo tanto, éstas pueden ser despreciadas. A continuación, se presenta la ecuación que describe la conservación de *Momentum* (ecuación 30) y su deducción a partir del balance de fuerzas en una sección de río que se muestra en la Figura 2c.

Las ecuaciones 10, 11 y 12, corresponden a la fuerza hidrostática (F_H), de gravedad (F_G) y de fricción (F_f) respectivamente, el balance de fuerzas se realiza con la sumatoria de estas (ecuación 13) y la 2° Ley de Newton (ecuación 14).

$$F_H = -\gamma \frac{\partial(\bar{y}A)}{\partial x} \Delta x \quad (10)$$

$$F_G = \gamma AS_0 \Delta x \quad (11)$$

$$F_f = -\gamma AS_f \Delta x \quad (12)$$

$$\Sigma F = F_H + F_G + F_f \quad (13)$$

$$F = ma = m \frac{dv}{dt} \quad (14)$$

$$m \frac{dv}{dt} = F_H + F_G + F_f \quad (15)$$

Donde, γ corresponde al peso específico del agua (ρg), \bar{y} a la distancia desde la superficie del agua hasta el centroide de presión de la sección de río, S_f es la fricción de pendiente, la cual se obtiene a partir de la ecuación del coeficiente de rugosidad N de Manning, S_f la pendiente de lecho, y m la masa del agua.

La masa de agua al recibir aportaciones de caudal laterales (q_l), presenta variaciones en función del desplazamiento (Δx), por lo que puede incluirse dentro del diferencial de la velocidad y resolverse como una ecuación diferencial ordinaria (ecuación 16).

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{d(mv)}{dt} \quad (16)$$

$$\frac{d(mv)}{dt} = m \frac{dv}{dt} + v \frac{dm}{dt} \quad (17)$$

La masa de agua puede representarse como el producto de la densidad del fluido (ρ) y el volumen de control como (\forall) en la ecuación 18, el cual a su vez puede expresarse como el producto del desplazamiento (Δx) por el área de sección transversal (A) en la ecuación 19.

$$m = \rho d\forall \quad (18)$$

$$m = \rho A \Delta x \quad (19)$$

Las variaciones de masa durante el paso del flujo a través de la sección de río, están dadas por las aportaciones de flujo lateral (q_l) por el desplazamiento (Δx), por lo tanto, tratándose de valores de volumen, se incluye el término ρ para transformarlo a unidades de masa (ecuación 20).

$$\frac{dm}{dt} = \rho q \Delta x \quad (20)$$

Al sustituir las ecuaciones 19 y 20 en la ecuación 17, se obtiene la ecuación 21.

$$m \frac{dv}{dt} + v \frac{dm}{dt} = \rho A \Delta x \frac{dv}{dt} + v \rho q \Delta x \quad (21)$$

El diferencial de velocidad por tiempo, puede descomponerse en un EDP en función de tiempo y desplazamiento (ecuación 22).

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \quad (22)$$

Sustituyendo las ecuaciones 21 y 22 en la ecuación 15 se obtiene que:

$$\rho A \Delta x \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \right) + v \rho q \Delta x = F_H + F_G + F_f \quad (23)$$

$$\rho A \Delta x \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \right) + v \rho q \Delta x = -\gamma \frac{\partial(\bar{y}A)}{\partial x} \Delta x + \gamma A S_0 \Delta x - \gamma A S_f \Delta x \quad (24)$$

$$\rho \Delta x \left[A \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \right) + v q \right] = -\gamma \Delta x \left[\frac{\partial(\bar{y}A)}{\partial x} - A S_0 + A S_f \right] \quad (25)$$

$$\rho \left[A \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \right) + v q \right] = -g \rho \left[\frac{\partial(\bar{y}A)}{\partial x} - A S_0 + A S_f \right] \quad (26)$$

$$A \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \right) + v q + g \frac{\partial(\bar{y}A)}{\partial x} = g A (S_0 + S_f) \quad (27)$$

$$\frac{1}{gA} A \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{vq}{gA} + \frac{g}{gA} \frac{A \partial(\bar{y})}{\partial x} = S_0 + S_f \quad (28)$$

En este punto se supone que no hay aportaciones de flujo laterales, por lo tanto, se tiene que $q_l = 0$.

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{vq}{gA} + \frac{\partial(\bar{y})}{\partial x} = S_0 + S_f \quad (29)$$

Después de simplificar la ecuación 29, se puede obtener la ecuación de conservación de *Momentum* propuesta por Saint-Venant (Cunge *et al.*, 1980) para el tránsito de la onda de inundación dinámica completa en una dimensión (ecuación 30), la cual es la base para la mayoría de los modelos de inundación, e.g. FLO-2D (FLO-2D Software Inc., 2017a), HEC-RAS y MIKE 11 (Teng *et al.*, 2017), EPASWMM (Huber, Dickinson & Barnwell, 1988), etc.

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{v \partial v}{g \partial x} - \frac{1 \partial v}{g \partial t} \quad (30)$$

La ecuación de onda dinámica posee cinco términos, los cuales, pueden ser simplificados bajo ciertos supuestos y condiciones de flujo como la uniformidad o la estacionalidad, etc. En ese sentido, existen dos simplificaciones de la ecuación de onda dinámica, las cuales se conocen como ecuación de onda difusiva (ecuación 32) y ecuación de onda cinemática (ecuación 31). Estas suposiciones, junto con el nombre y función de cada término incluido en la ecuación de onda dinámica son enlistados en la Tabla 1.

Tabla 1. Términos de la ecuación de onda dinámica

Término	Descripción
$\frac{\partial y}{\partial x}$	Término de gradiente de presión. La presión hidrostática dada por la altura de tirante (y) varía en función del desplazamiento.
$\frac{v \partial v}{g \partial x}$	Término de aceleración convectiva. Relacionado a variaciones con respecto al espacio, la uniformidad y no uniformidad del flujo.
$\frac{1 \partial v}{g \partial t}$	Término de aceleración local. Relacionado a variaciones con respecto al tiempo, estacionalidad y no estacionalidad del flujo.

Para modelación de flujos en canales estacionarios no confinados (*i.e.*, cuando la velocidad y caudal del flujo no varían en función del tiempo) y uniformes (*i.e.*, velocidades de flujo constantes en magnitud y dirección en cada sección del canal; Anees *et al.*, 2016), el balance de *Momentum* se puede simplificar hasta obtener la Ecuación de Onda Cinemática (ecuación 31), en la cual se ignora la contribución del gradiente de presión y los términos de aceleración, obteniendo una ecuación de flujo que depende solo de la fricción del terreno, a través del coeficiente de rugosidad N de Manning (FLO-2D Software Inc., 2017a).

$$S_0 = S_f \quad (31)$$

Para flujos estacionarios no uniformes, el balance de cantidad de *Momentum*, se simplifica hasta la Ecuación de Onda Difusiva (ecuación 32), en esta se incluye el

término de gradiente de presión con la finalidad de mejorar la simulación en ambientes con topografía compleja. Este término sirve para atenuar la onda de inundación y el cambio de almacenamiento entre la llanura de inundación y el flujo del canal (FLO-2D Software Inc., 2017a).

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} \quad (32)$$

La Ecuación de Onda Dinámica (ecuación 30), aplicable en fluidos no estacionarios y no uniformes, incluye los términos de aceleración, los cuales permiten la simulación en corrientes sinuosas, y con pocas o muy abruptas variaciones en la pendiente.

2.7 Observación y monitoreo de inundaciones mediante sensores remotos

En las últimas décadas, el surgimiento y proliferación de técnicas de detección remota desde varias plataformas aéreas y espaciales, ha supuesto una mejora significativa en los modelos para la comprensión y predicción de inundaciones. En particular, en años recientes, la comunidad científica y especializada ha demostrado cómo las variables censadas a través de sistemas de teledetección, pueden desempeñar un papel clave en la calibración y validación de modelos hidráulicos, además de proporcionar importantes avances en aplicaciones de monitoreo y mapeo de inundaciones en tiempo real (Domeneghetti *et al.*, 2019). Además, nuevos enfoques para la zonificación de áreas inundables han surgido basados en la aplicación de algoritmos de Inteligencia Artificial y Aprendizaje Profundo en datos remotamente censados (*e.g.*, Yang & Cervone, 2019).

Actualmente, se cuenta con una amplia gama de plataformas, las cuales, de manera continua recaban información de diversas variables de nuestro planeta que son empleadas en múltiples trabajos de investigación debido a sus numerosas aplicaciones, entre ellas, el estudio, monitoreo y simulación de inundaciones. Por otro lado, se cuenta con plataformas que monitorean variables meteorológicas

(e.g., *Geostationary Operational Environmental Satellites - R Series*; GOES-R y *Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*; MODIS; NASA & GOES-R Series Program Office, 2019; Parkinson, 2003), que obtienen imágenes ópticas multiespectrales (e.g., Landsat 7 TM+, Landsat 8 OLI, Sentinel-2 MSI, etc), que generan datos del terreno con sensores LIDAR (*Light Detection and Ranging*) e imágenes de SAR (e.g., *Shuttle Radar Topography Mission*; SRTM, Sentinel-1, RADARSAT 2), etc.

2.7.1 Datos ópticos multiespectrales

Las imágenes ópticas multiespectrales, pueden ser definidas de forma general como datos proporcionados por sensores en el rango espectral que van desde el infrarrojo de onda corta, a través del rango visible, hasta el ultravioleta (Njoku, 2014).

Cuando las condiciones atmosféricas permiten la adquisición de datos en el dominio óptico, las inundaciones pueden ser detectadas con un buen nivel de precisión, explotando varias características típicas de cuerpos de agua y superficies de agua continentales con respecto a las áreas secas (Alberto Refice, D'Addabbo & Capolongo, 2018). Lo que ha dado lugar en la actualidad a una gran cantidad de trabajos en donde se explora el uso de productos satelitales ópticos para el mapeo de inundaciones bajo diferentes técnicas, como el *thresholding* (umbralización; e.g., Kordelas, Manakos, Aragonés, Díaz-Delgado & Bustamante, 2018) o algoritmos de clasificación (e.g., van der Sande, de Jong & de Roo, 2003).

Algunos trabajos, incorporan el uso de índices espectrales (*i.e.*, comparaciones cuantitativas entre la respuesta de cada píxel del terreno en diferentes bandas espectrales) en el modelado y mapeo de zonas inundables, especialmente el Índice de Diferencia de Agua Normalizada (NDWI, por sus siglas en inglés), debido a su capacidad de determinar la presencia o no presencia de agua (e.g., Jain, Singh, Jain & Lohani, 2005). Sin embargo, en otros trabajos se han explorado índices espectrales adicionales bajo contextos de inundación (e.g., el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada; NDVI en el trabajo de Mollaei, Davary, Hasheminia, Faridhosseini & Pourmohamad, 2018).

Además de la disponibilidad de los productos satelitales con base en su resolución temporal (el cual varía según la plataforma), el principal obstáculo para el uso de datos ópticos para el monitoreo de inundaciones proviene de su sensibilidad a la presencia de nubes, que generalmente están presentes durante los eventos de inundación. Actualmente, este factor ha sido determinante para la adopción generalizada de datos ópticos en contextos operativos de monitoreo de inundaciones (Alberto Refice *et al.*, 2018).

2.7.2 Imágenes de SAR

El radar de apertura sintética (SAR) es un sistema que permite formar imágenes de radar de alta resolución a partir de datos adquiridos por instrumentos de radar de aspecto lateral transportados por aeronaves o satélites (Curlander & McDonough, 1991). Con el sistema SAR se busca combinar la información obtenida en varios “barridos” de la antena para recrear un solo escaneo virtual.

El uso de imágenes SAR en el análisis y monitoreo de inundaciones, ha supuesto una gran ventaja en comparación con los sistemas multiespectrales ópticos, debido a su mayor poder de penetración, el cual le permite propagarse a través de las nubes (Shen, Wang, Mao, Anagnostou & Hong, 2019) Además, se encontró que esta técnica es especialmente útil para la generación de mapas de inundación, ya que las señales de retorno del radar son normalmente bajas para cuerpos de agua abiertos sin vegetación, debido a la reflexión de la superficie del agua (Teng *et al.*, 2017a). En conjunto, estas características permiten a los sistemas SAR determinar los límites de inundación con un buen nivel de precisión bajo diversas condiciones.

La información sobre las aplicaciones de retrodispersión de SAR para el monitoreo de inundaciones es cada vez más consistente, a medida que aumenta la atención a la detección remota. Gracias a su disponibilidad confiable, los mapas de inundaciones derivados de imágenes SAR parecen prometedores para la integración con modelos hidráulicos, que requieren datos externos adquiridos regularmente para la calibración o evaluación general del rendimiento (Alberto Refice *et al.*, 2018).

Existe en la literatura un gran número de estudios en los que se evalúa el uso de los sistemas SAR en el análisis de inundaciones, por ejemplo, el trabajo de Martinis, Kersten & Twele (2015) en donde se presenta un análisis exhaustivo de diferentes niveles de retrodispersión en zonas de inundación para diferentes tipos de cobertura del suelo, o el de Shen *et al.* (2019) en donde se evaluaron los algoritmos de mapeo de inundación utilizando datos SAR, desarrollados desde 1980 hasta la fecha. Adicionalmente, técnicas de detección más sofisticadas basada en los sistemas SAR han sido aplicadas en investigaciones en materia de inundaciones, teniendo como ejemplos trabajos como el de Özer, Rikkert, van Leijen, Jonkman & Hanssen, (2019) en donde se aplica la técnica de interferometría diferencial para el mejoramiento de un sistema de diques para la protección contra inundaciones, o el de Refice *et al.* (2014) donde se emplea información de coherencia interferométrica para la delimitación de zonas inundadas.

A pesar de que el número de estudios de investigación innovadores y de vanguardia en esta área ha ido aumentando, según Domeneghetti *et al.* (2019), el potencial completo de los datos de detección remota para mejorar el mapeo de inundaciones, el modelado y la predicción aún no se ha alcanzado en su totalidad.

Capítulo 3. Descripción de la Zona de Estudio

3.1 Localización y vías de comunicación

La ciudad de Los Mochis es la cabecera municipal de Ahome, municipio perteneciente al estado de Sinaloa. Actualmente se considera a Los Mochis, como la tercera ciudad más importante del estado debido a su gran producción agrícola (CONAGUA & SEMARNAT, 2017), posicionándola como uno de los emporios agrícolas más grandes del país. La ciudad de Los Mochis cuenta con un área de 61.242 Km² y durante el censo de 2010 se registró una población de 256 623 habitantes (H. Ayuntamiento de Ahome, 2014).

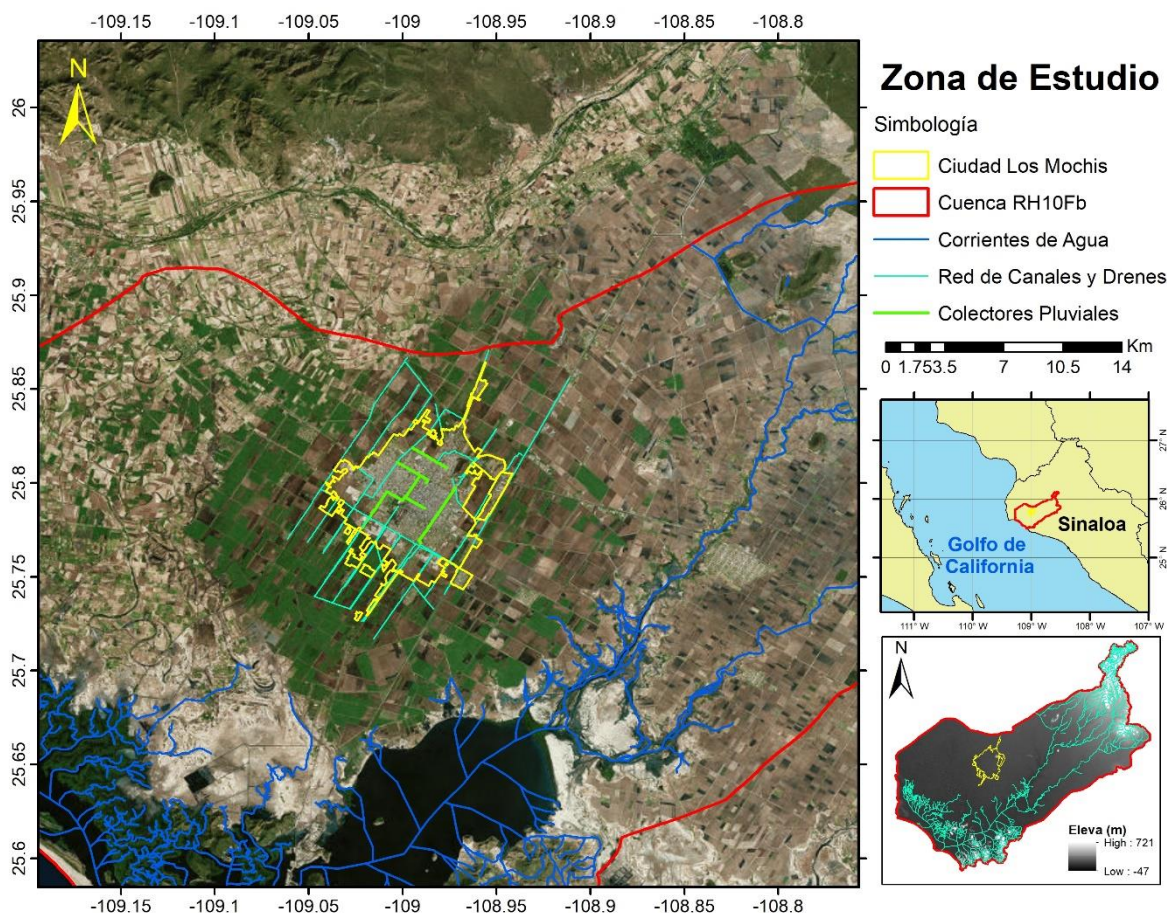


Figura 3. Localización de la zona de estudio. Se observa el límite de la zona urbana de Los Mochis, Sinaloa, además, se incluyen los atributos más importantes de la zona, límite de la cuenca RH10Fb y sus corrientes de agua, red de canales y drenes y colectores pluviales. Elaborado con base en información de INEGI (2010, 2013).

En la Figura 3 se muestra la localización de la zona de estudio, esta forma parte de la cuenca RH10Fb la cual pertenece al sistema Bahía Lechuguilla-Ohuira-Navachiste (INEGI, 2010). En la figura se puede apreciar los principales rasgos de la zona de estudio como las corrientes de agua naturales (las cuales en su mayoría son intermitentes; INEGI, 2010) y la infraestructura hidráulica, además, se observan las zonas de cultivo que rodean a la Ciudad de Los Mochis (contorno amarillo).

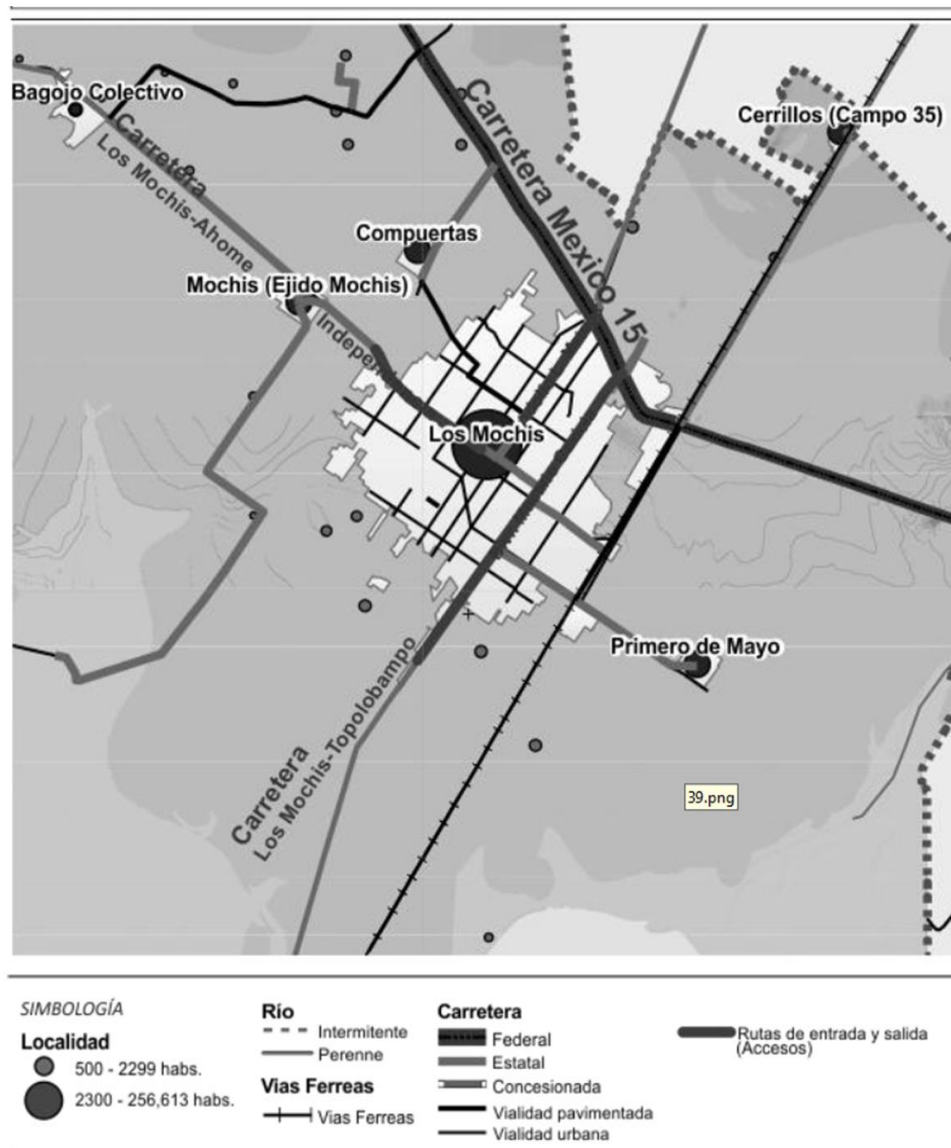


Figura 4. Principales carreteras y puntos de acceso para Los Mochis, Sinaloa. Recuperado de: H. Ayuntamiento de Ahome (2014).

Respecto a los principales ejes carreteros y vías de acceso de Los Mochis, estos se observan en la Figura 4. La ciudad de Los Mochis, tiene la peculiaridad de ser una de las pocas ciudades en el mundo en las que se puede acceder por mar, aire, tren y carretera.

Las principales carreteras que atraviesan los Mochis son, la Carretera Federal México 15 o mejor conocida como “Navjoa - Los Mochis”, la cual atraviesa el sector norte de la ciudad, la carretera estatal “Los Mochis –Topolobampo”, la cual corta la ciudad con una dirección NO-SE y la carretera estatal “Los Mochis-Ahome” la cual atraviesa la ciudad con dirección E-O (Figura 4).

3.2 Fisiografía

La cuenca RH10Fb y por ende la zona urbana de Los Mochis, pertenecen a la Provincia Fisiográfica Llanura Costera del Pacífico (INEGI, 1995), la cual se caracteriza por sus planicies de poca pendiente que descienden hasta el Golfo de California (IMPLAN, 2012a).

De igual forma, esta zona pertenece a la Subprovincia Llanura Costera y Delta de Sonora y Sinaloa la cual tiene como característica principal la presencia de llanuras con ciénegas, playas, dunas y zonas salinas (IMPLAN, 2012a; INEGI, 1995).

La configuración de la cuenca RH10Fb, está dada por los valles agrícolas del Fuerte y del Carrizo, los cuales rodean la ciudad de Los Mochis (Organismo de Cuenca Pacifico Norte de la CONAGUA & SEMARNAT, 2016). La zona urbana de Los Mochis, presenta una topografía predominantemente plana a excepción del Cerro de la Memoria y el Cerro de Las Colinas, los cuales cuentan con una altura aproximada de 80 y 50 m respectivamente (H. Ayuntamiento de Ahome, 2014). Se estima que en Los Mochis, la pendiente promedio es de 0.001 con dirección SE (Zamorano García, 2003), además, según IMPLAN (2012a) en esta urbanización no suele haber extracción de agua proveniente del subsuelo, por lo tanto, los niveles

freáticos se han mantenido constantes, situación por la cual en esta zona los hundimientos por abatimiento de acuíferos no presentan un riesgo para la sociedad.

3.3 Hidrografía

La cuenca RH10Fb – B. Ohuira (clave b), con una extensión de 2469.96 Km², es una subcuenca abierta con descarga al mar, la cual forma parte de la cuenca Bahía Lechuguilla-Ohuira-Navachiste (clave F). En esta cuenca se originan varios escurrimientos de longitud restringida y de poca importancia que derivan su caudal hacia la bahía, cuerpos de agua internos o en alguna infraestructura de riego. La cuenca no pose estaciones de aforo (INEGI, 1995), por lo cual, no cuenta con registros hidrométricos, este sistema pertenece a la Región Hidrográfica de Sinaloa (RH10; INEGI, 2010).

La corriente principal de la subcuenca, es un escurrimiento intermitente, el cual surge en la parte alta de la cuenca y desemboca en la Bahía Ohuira (Figura 3), no obstante, las aportaciones de agua al sistema más importantes, están dadas por la Red de Canales del Distrito de Riego 75, los cuales derivan importantes flujos de agua proveniente del Río Fuerte (Figura 5; H. Ayuntamiento de Ahome, 2014).



Figura 5. Cuenca del Río Fuerte y el sistema de presas y derivadoras que alimentan el Distrito de Riego 75.

Es importante mencionar, que el sistema hídrico de la cuenca RH10Fb se ha visto profundamente alterado por la intensa actividad agrícola en la región, modificando el cauce natural de algunos escurrimientos y los patrones de drenaje del sistema.

En cuanto a la ciudad de los Mochis, el suministro de agua potable se consigue mediante las plantas potabilizadoras “Mochis” e “Ing. Terán Hernández” (Figura 11), las cuales son alimentadas por los canales Hidalgo y Sublateral 23+700 respectivamente.

Con respecto a agua subterránea, la cuenca RH10Fb se ubica sobre los acuíferos 2514 El Carrizo y 2501 Río Fuerte. Por su parte, la ciudad de los Mochis se ubica sobre el acuífero 2501 Río Fuerte, el cual consiste en un acuífero libre en el que la circulación del agua a través del subsuelo tiene lugar de la Sierra Madre Occidental, que comprende la zona de recarga, hacia el Golfo de California.

3.4 Edafología

En la Figura 6, se pueden apreciar los cinco principales tipos de suelo presentes en la zona de estudio. En la zona de mayor elevación topográfica al noroeste de la cuenca, se observa Feozem háplico (Hh) en escasa proporción, suelo que se caracteriza por tener una capa superficial de materia orgánica, la profundidad de estos suelos varía en función del relieve, por lo que, al tener esta zona una topografía con elevadas pendientes, se puede inferir un suelo de poca profundidad (INEGI, 2004). Posteriormente, se presentan Luvisoles órticos (Lo), suelos rojizos o pardos con un alto contenido de arcillas provenientes del subsuelo (INEGI, 2004). La región central de la cuenca, está conformada por Vertisoles crómicos (Vc), suelos que poseen un alto contenido de arcillas expandibles, las cuales hacen que este terreno sea poco permeable, especialmente en condiciones de saturación (INEGI, 2004). Su uso en agricultura es muy extenso, variado y productivo, sin embargo, requiere de un buen drenaje debido al efecto de expansión-contracción de sus arcillas, el cual favorece el agrietamiento del terreno (INEGI, 2004). Junto a los

vertisoles, se observan unidades de Xerosol hálico (Xh), tipo de suelo seco común en las zonas áridas y semiáridas del centro y norte de México, este posee una capa superficial de color claro por el bajo contenido de materia orgánica que sobreyace a un subsuelo rico en arcilla (INEGI, 2004; Ortiz-Villanueva & Ortiz-Solorio, 1990). Por último, en la zona más baja de la cuenca RH10Fb se observa la presencia del tipo de suelo Solonchak órtico (Zo), suelos salinos comunes en lagunas costeras y lechos de lagos (INEGI, 2004) tal como se muestra en la Figura 6, sin embargo, también es común encontrarlos en regiones áridas o semiáridas, principalmente en zonas permanentemente o estacionalmente inundadas. Este suelo puede ser inducido en zonas de riego por el ensaltramiento del terreno como resultado de un deficiente drenaje o un mal manejo del recurso hídrico.

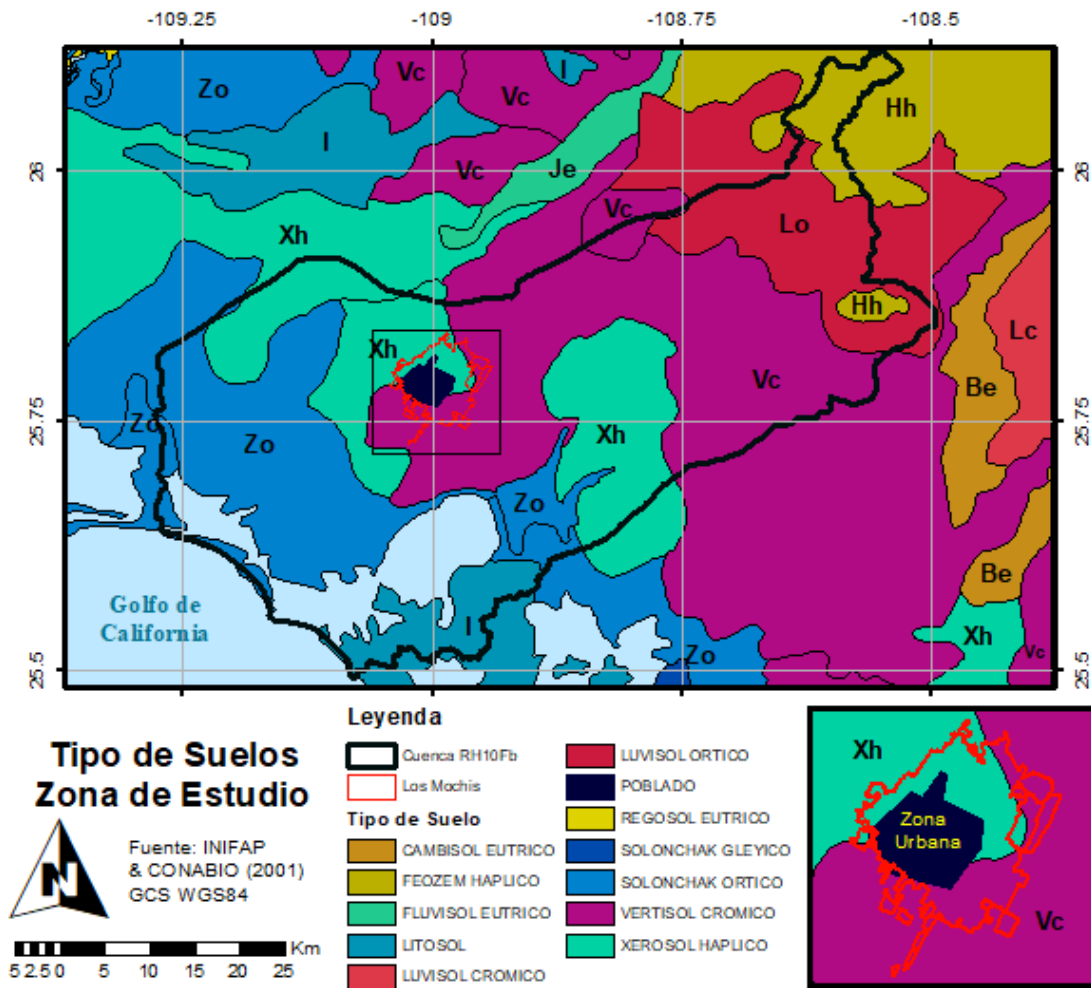


Figura 6. Mapa con la distribución espacial de los tipos de suelo que se presentan en la zona de estudio. Elaborado con base en información de INIFAP & CONABIO (2001).

Desde un punto de vista hidrológico, se puede decir que el terreno sobre que se encuentra el área de estudio (Cuenca RH10Fb y Lo Mochis), es poco permeable ya que los tipos de suelo presentes en esta zona contienen un alto porcentaje de la componente arcilla, aunado a esto, los suelos presentes dentro del polígono de la urbanización, están en su mayoría cubiertos por materiales de construcción que los hacen totalmente impermeables.

3.5 Clima

3.5.1 Unidades Climáticas

En la Figura 7 se muestran las unidades climáticas presentes en la zona de estudio según la clasificación climática de Köppen modificado por García (2004), la cual fue adaptada para las condiciones específicas de México.

En la cuenca RH10Fb, se observa el tipo de clima Semiseco cálido BS1 (h') hw en una pequeña porción de la zona montañosa que se encuentra al oriente de la cuenca. También se observa el clima Seco cálido BS0 (h') hw, y en mayor proporción se aprecia el clima Muy seco cálido BW (h') hw, el cual abarca la mayor parte de la cuenca incluyendo la ciudad de los Mochis y sus alrededores.

El grupo de climas Secos (B) se caracterizan por precipitaciones anuales inferiores a los 800 mm, este grupo se divide en dos grandes subgrupos (mostrados en la Figura 7), estos son el Clima Seco de Estepa (BS) con precipitaciones anuales entre 600 y 400 mm y el Clima Seco de Desierto (BW) con precipitaciones inferiores a los 400 mm. Respecto a la diferenciación entre Clima Seco (0) y Semiseco (1), esta depende del cociente P/T (precipitación anual/temperatura promedio), siendo el BS0 el clima más seco de los climas BS y BS1 el menos seco.

Los tipos de clima presentes dentro de la cuenca RH10Fb, poseen la designación de temperatura de Cálidos ((h') h), esto quiere decir, que su temperatura promedio anual se encuentra por encima de los 22° C. El termino w presente en la

nomenclatura de estos climas, significa que el régimen de lluvias durante el invierno es menor del 5% con referencia a la lluvia acumulada anual.

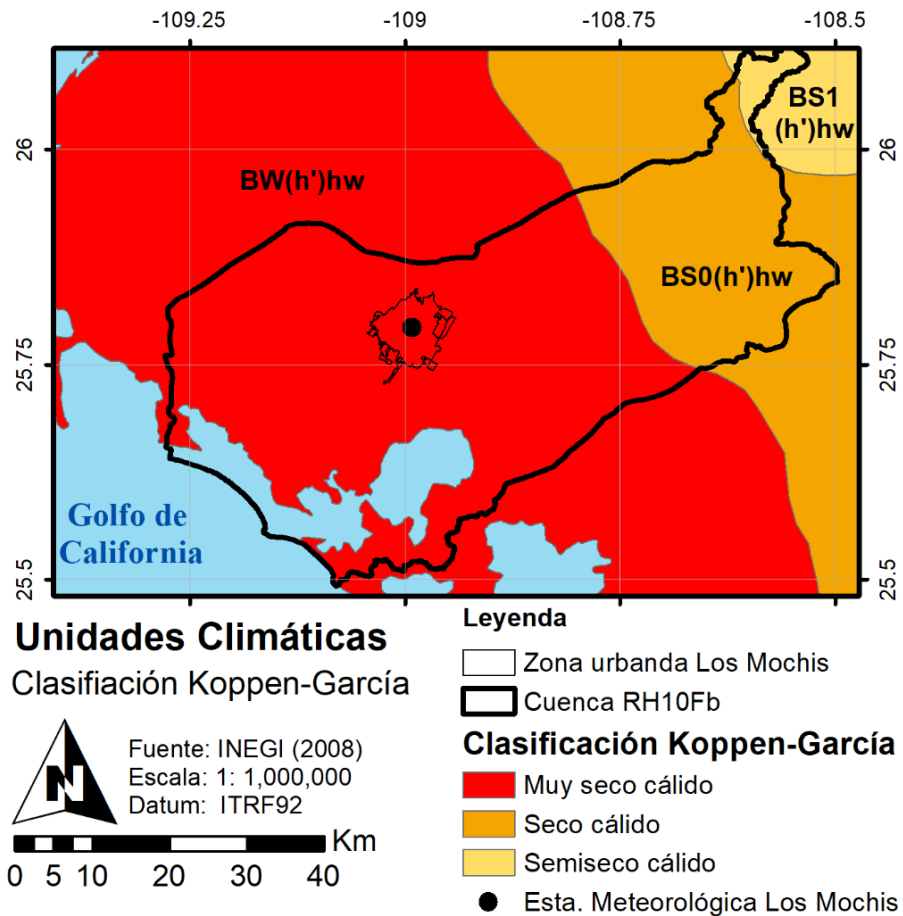


Figura 7. Unidades Climáticas presentes en la zona de estudio, según el sistema de clasificación climática Köppen modificado por García (2004). Adicionalmente, se incluye la estación meteorológica Los Mochis (25116) la cual fue usada para la caracterización de las variables climatológicas observadas. Elaborado con base en información de INEGI (2008).

3.5.2 Caracterización de las variables climatológicas observadas

Para la descripción de las variables climáticas precipitación y temperatura en la ciudad de los Mochis, se calcularon los valores diarios medios en cada mes (Figura 8) en la estación meteorológica Los Mochis (25116; Figura 7) durante el periodo 1964-2012. Debido a la localización de esta estación (25°47'36" N, 108°59'32" O) y a la calidad de sus registros climáticos (extensos y continuos) se seleccionó como referente del régimen de lluvia diaria por mes, así como de temperatura promedio diaria que se presentan dentro de la zona urbana de los Mochis.

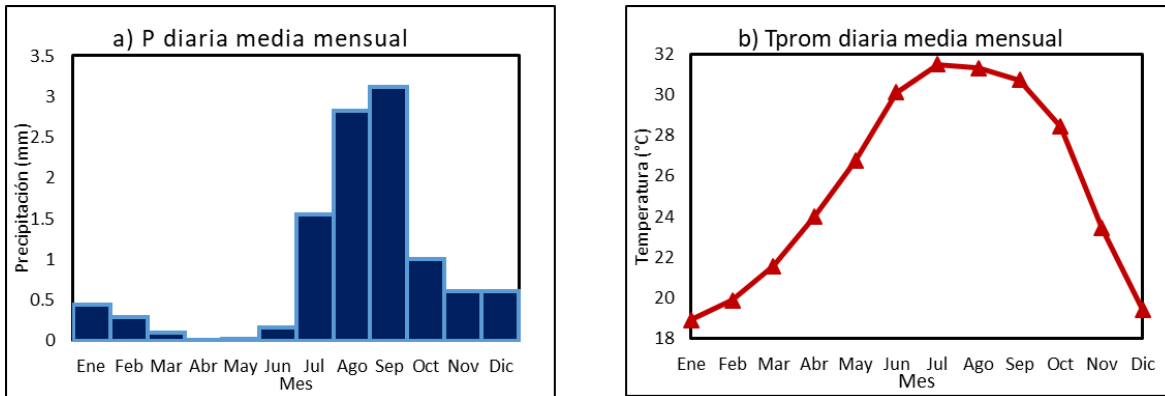


Figura 8. Precipitación (a) y temperatura promedio (b) media mensual estimados para el periodo 1964-2012 en la estación meteorológica Los Mochis (25116). Elaborado con base en información del SMN (CLICOM, 2016).

En el caso de la precipitación (Figura 8a) se observa una marcada época de lluvias la cual inicia en julio y termina durante octubre, en contraste con la época de secas la cual comienza en octubre y finaliza en junio. El comportamiento de este régimen de precipitación, es identificado en algunos reportes técnicos realizados en la zona, en donde se señala que durante la mayor parte del año hay ausencia de lluvias, y que esta se concentra entre los meses de julio y octubre, en los cuales ocasionalmente hay formaciones de tormentas y huracanes de gran intensidad (H. Ayuntamiento de Ahome, 2012a; IMPLAN, 2012a). De igual forma, los datos de precipitación anual acumulada en la estación Los Mochis durante el periodo 1964-2012 (Figura 9) coinciden con las normales climatológicas 1981-2010 en la zona (IMPLAN, 2012a), en donde se reporta una precipitación anual media acumulada de 357.7 mm, mientras que, la precipitación anual media acumulada estimada con datos de la estación meteorológica fue de 335 mm (Figura 9). Esta correspondencia entre los valores de precipitación acumulada durante los periodos 1964-2012 y 1981-2012 puede ser un indicador de que el régimen de precipitación se ha mantenido constante por lo menos en las últimas décadas.

Referente a la relación entre la precipitación y los eventos hidrometeorológicos extremos como huracanes, tormentas tropicales o el fenómeno del Niño-oscilación del Sur, que han generado afectaciones en Los Mochis (ver Tabla 1), se observa que estos se relacionan a años lluviosos estimados con base en la información hidroclimática. Por ejemplo, durante 1984 año en que se presentó el Niño, la

precipitación anual acumulada fue de 683.7 mm (Figura 9), en el año 1996 en que tuvo lugar el Huracán Fausto, la precipitación fue 599.3 mm (Figura 9), otro año particularmente lluvioso fue el 2008 en donde se presentó el Huracán Olaf, la precipitación fue de 595.4 mm (584 mm según IMPLAN, 2012a), por mencionar algunos. Esto es interesante, ya que a pesar de tratarse de una zona con clima Muy Seco cálido BW (h') hw (Figura 7), la presencia de eventos hidroclicmáticos anómalos tienen un importante peso en la climatología del lugar haciendo que en la zona se presente un régimen de lluvias extremo, llegando a ser una condición física del medio altamente riesgosa.

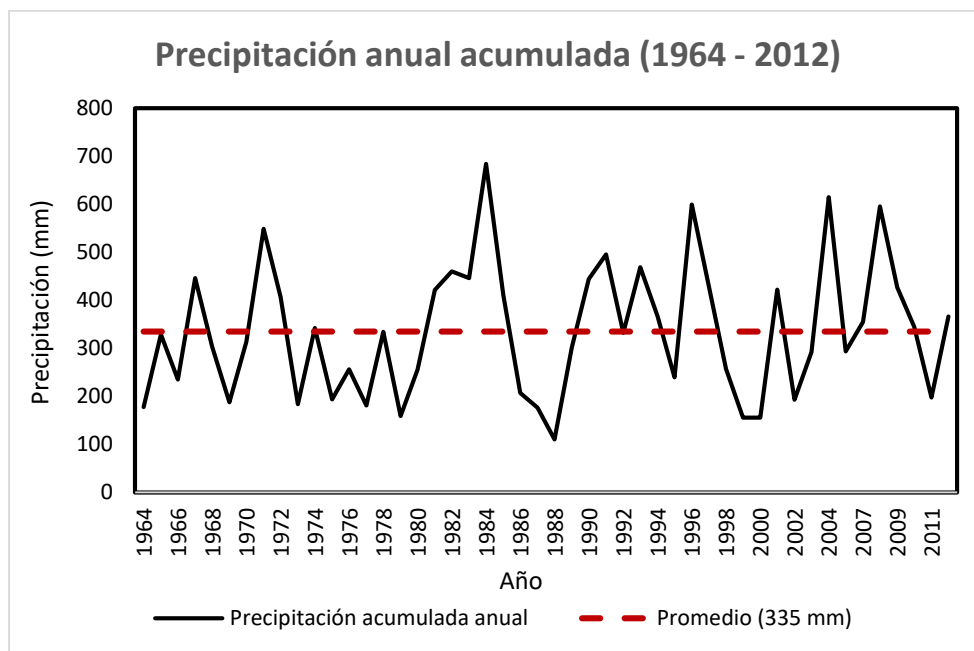


Figura 9. Precipitación anual acumulada estimada para el periodo 1964-2012 en la estación meteorológica Los Mochis (25116). Elaborado con base en información del SMN (CLICOM, 2016).

En la Figura 8 también se puede apreciar la temperatura media mensual en la ciudad. Con una variación entre los 18 y 32° C se observa que la temporada de mayores temperaturas está comprendida entre los meses junio-septiembre muy similar a la precipitación. Por su parte los meses más fríos corresponden a enero, febrero y diciembre.

3.6 Uso de suelo y vegetación

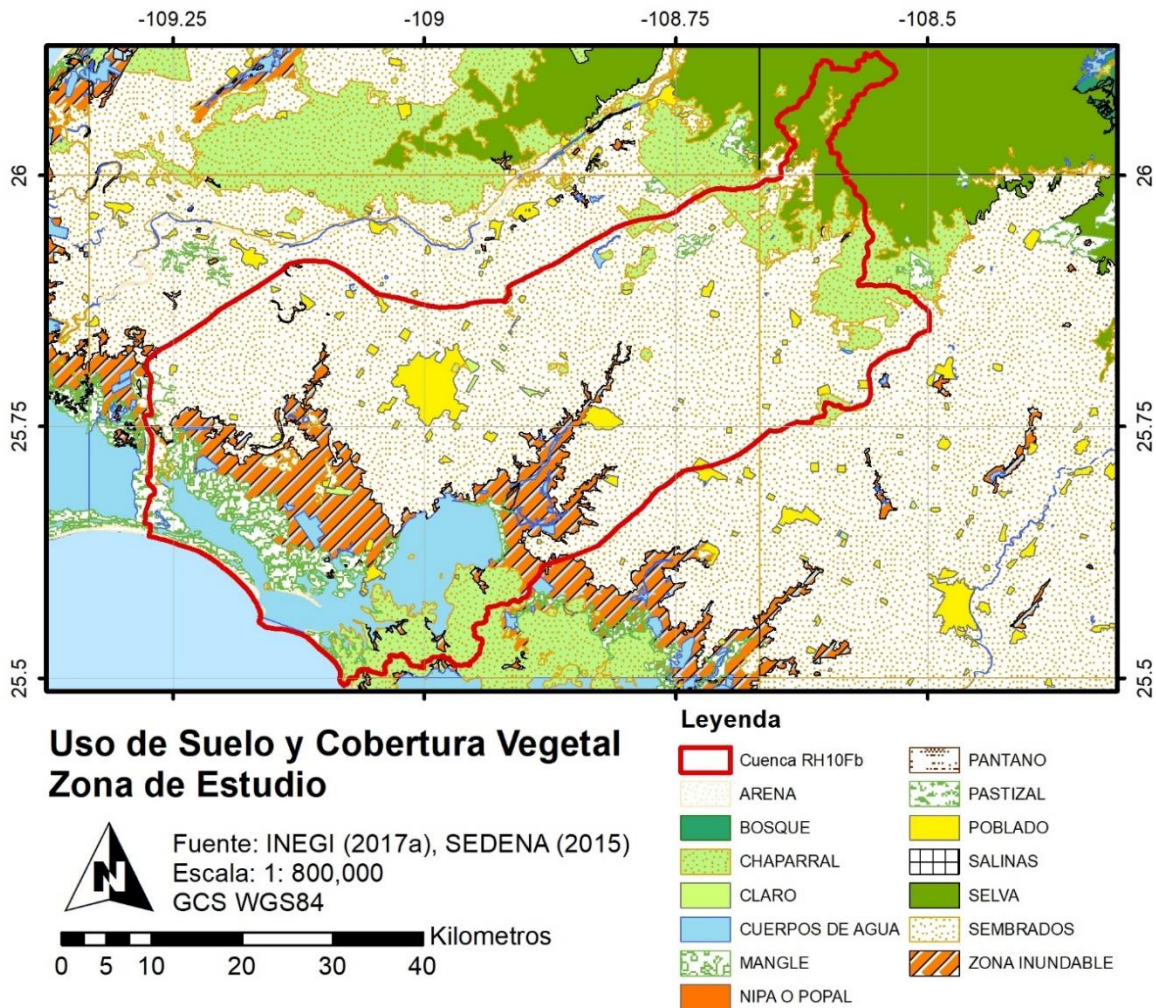


Figura 10. Mapa de la distribución espacial de uso de suelo y cobertura vegetal en la zona de estudio. Elaborado con base en INEGI (2017) y SEDENA (2015).

En la Figura 10, se muestran los principales tipos de cobertura y los usos que se le da al suelo en la zona de estudio, además, se muestran las zonas con alta probabilidad a inundarse según el conjunto de datos vectoriales escala 1: 100 000, cubrimiento nacional de vegetación elaborado y editado por la SEDENA (SEDENA, 2015).

De forma general, se puede apreciar el uso intensivo que se le da al suelo para la agricultura. En ese sentido, la cuenca de estudio está cubierta en su mayor parte por sembradíos. En la zona más alta de la cuenca, se presenta vegetación de

regiones selváticas y de chaparral. Por su parte, la zona urbana (representada por polígonos amarillos) que corresponde principalmente a la zona urbana de Los Mochis, se puede apreciar que está rodeada por las zonas de cultivo pertenecientes al Distrito de Riego 75.

Las áreas con alto riesgo a inundarse, abarcan una considerable extensión de superficie en la zona costera de la cuenca. El anegamiento en estos sitios, se debe principalmente al ascenso de los niveles del mar, los cuales provocan la expansión de los límites de las Bahías Ohuira y Santa María. El suelo predominante en esa zona es el Solonchak órtico (Zo; Figura 6), el cual se caracteriza por sus altas concentraciones de sales. La presencia de dicho suelo podría suponer una relación directa entre inundaciones costeras y el ensalitramiento del terreno.

Zonas con vegetación de Chaparral y Manglares, se observan en la zona más baja de la cuenca. Al tratarse de vegetación halófila, esta resiste altas concentraciones de sales en el suelo (INEGI, 2004).

3.7 Infraestructura hidráulica

Como previamente se ha mencionado en este trabajo de investigación, la ciudad de Los Mochis, se sitúa dentro del Distrito de Riego 75, uno de los principales centros agrícolas del país (Pedroza González & Hinojosa Cuéllar, 2014), en el cual se cultivan principalmente maíz grano, papa y sorgo (CONAGUA & SEMARNAT, 2017).

Con el fin de abastecer de agua a las tierras de cultivo en toda en toda esta zona, se ha diseñado una intrincada red de 2,297.79 km de canales sin revestir (IMPLAN, 2012a) los cuales derivan agua proveniente del Río Fuerte, importante escurrimiento que drena los estados de Chihuahua y Sinaloa y que desemboca sus aguas en el Golfo de California al norte del centro urbano de los Mochis (Figura 5). El abastecimiento de agua potable para la ciudad de Los Mochis comienza desde

las presas almacenadoras Miguel Hidalgo (El Fuerte) y Josefa Ortiz (Choix; H. Ayuntamiento de Ahome, 2014).

Además, de la red de canales que rodea la ciudad de Los Mochis, se cuenta con un sistema de 1,634 km de drenes (IMPLAN, 2012a) los cuales se encargan del desalojo excedentes del agua de riego en las zonas de cultivo. Este sistema de drenes es de vital importancia en esta zona, debido a la predominancia de Versioles (Figura 6), los cuales tienden a agrietarse en condiciones de saturación por el efecto de expansión-contracción de las arcillas generando daños a la infraestructura, y por la presencia de suelos salinos los cuales requieren ser drenados constantemente cuando son sometidos a riego para prevenir el ensalitramiento (IMPLAN, 2012a).

En México existe una nomenclatura específica propuesta por la CONAGUA para identificar los componentes de una red de riego (Pedroza González & Hinojosa Cuéllar, 2014). En ese sentido, para infraestructura superficial se tiene un Canal de Conducción el cual deriva agua proveniente de un sitio de abastecimiento (presa, lago, río, etc.) al inicio de la zona de cultivo. Al entrar al distrito de riego, el canal de conducción se conecta al Canal Principal del cual se derivan los Canales Laterales y Sublaterales. Estos canales en su conjunto conforman la llamada red mayor y son los principales componentes de la red de riego. A partir de los Canales Sublaterales se derivan los Ramales y de estos a su vez se dividen los Subramales. Los Ramales son de menores dimensiones y tienen como función abastecer a todos los campos de cultivo, por lo general su punto de inicio es una compuerta situada en los márgenes del Canal Sublateral con la cual se regula el flujo de entrada.

Los drenes por su parte, se excavan en tierra con un nivel topográfico menor a la de la superficie del terreno o en algunos casos se emplean arroyos naturales. Su función es desalojar excedentes de agua en zonas de cultivo ya sea excedentes del riego o de origen pluvial. Por su calidad, el agua que corre por estas estructuras hidráulicas se conoce como aguas broncas (Pedroza González & Hinojosa Cuéllar, 2014). Al igual que los canales, los drenes suelen ser estructuras superficiales, las cuales aprovechan la pendiente del terreno para la conducción de flujo.

Respecto a infraestructura subterránea, la ciudad de Los Mochis cuenta con una red de drenaje mixta, esto quiere decir, que existe un conjunto de colectores los cuales dirigen agua residual de uso doméstico hacia un emisor el cual desaloja el agua hacia fuera de la ciudad, y un conjunto de colectores pluviales los cuales, a través de rejillas de tormenta situadas en puntos estratégicos, colectan el agua de precipitación hacia los drenes que a traviesan la ciudad.

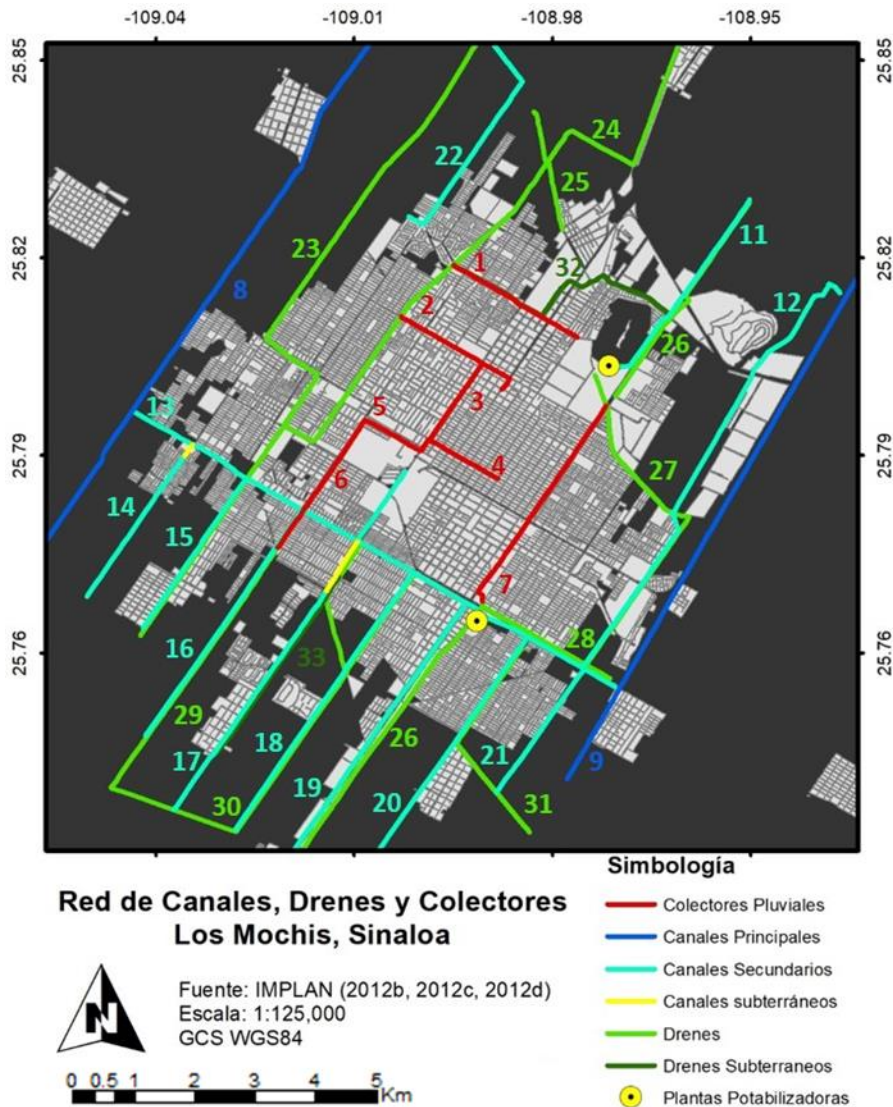


Figura 11. Mapa que muestra la distribución de la red de colectores pluviales (líneas rojas), canales principales (líneas azules) y secundarios (líneas cian) y sus secciones subterráneas o entubadas (líneas amarillas), drenes superficiales (líneas verdes claro) y los drenes que han sido entubados (líneas verdes oscuro), además, las principales plantas potabilizadoras en la zona urbana de Los Mochis, Sin.

Diversos medios de noticias locales (El Debate, 2018b, 2018c; López, 2018) y nacionales (Cabrera Martínez, 2018a), así como estudios técnicos en materia de análisis de riesgo realizados en el área de estudio (IMPLAN, 2012a; Organismo de Cuenca Pacífico Norte de la CONAGUA & SEMARNAT, 2016) y manifestaciones de impacto ambiental (H. Ayuntamiento de Ahome, 2012a), concuerdan en que la deficiente e insuficiente infraestructura hidráulica superficial y subterránea constituye el factor de mayor peso que interviene en la generación inundaciones. Esta problemática ha sido ampliamente documentada a través de medios informativos como sitios web y periódicos locales, los cuales señalan al Dren Álamo (López, 2018) y al Dren Juárez (Cabrera Martínez, 2018a; El Debate, 2018b) como los que mayor impacto han tenido durante eventos de inundación.

Es por ese motivo, que en este trabajo de investigación se ha incluido la red de redes y canales que atraviesa la ciudad de los Mochis (Figura 11), como un componente más en el modelo de inundación. Esto con el fin de analizar el efecto que esta infraestructura tiene sobre la distribución de flujo durante la simulación hidrológica, así como mejorar la implementación del modelo con el medio físico. A continuación, se presenta una descripción detallada de los componentes incluidos en la simulación de inundación en la red de canales (IMPLAN, 2012b), la red de drenes (IMPLAN, 2012c) y la red de colectores pluviales (IMPLAN, 2012d).

3.7.1 Red de Canales

La dirección de flujo conducido a través de la Red de Canales de la ciudad, presenta una dirección norte-sur y este oeste. El Canal Taxtes (8, numero de referencia en la Figura 11) y el Canal Lateral 18+420 (9) se derivan del Canal Principal Valle del Fuerte el cual se desprende de la Derivadora el Sufragio la cual es alimentada por el Río Fuerte (H. Ayuntamiento de Ahome, 2014), ambos canales a traviesan la ciudad con dirección NE-SO. El Canal Sublateral 23+700 (13) corta la ciudad de Oeste a Este, este recibe sus aguas del Canal Lateral 18+420 (9) y termina en el Canal Taxtes (8). El Canal Sublateral 23+700 (13) es de los conductos principales de la zona urbana, pues una parte de sus aguas alimenta la Planta Potabilizadora Ing. Terán Hernández (Figura 11), la cual posee una capacidad de producción de

800 l/s, esta planta abastece de agua el sector sur de la ciudad (H. Ayuntamiento de Ahome, 2014). El resto de agua en el Canal Sublateral 23+700 (13) se deriva en diversos ramales a través de un sistema de compuertas manuales (Figura 12), las cuales dotan de agua a los ejidatarios de los poblados Benito Juárez, Plan de Ayala y 9 de diciembre, ubicados en el extremo sur de la ciudad (H. Ayuntamiento de Ahome, 2014). El nombre de esas estructuras secundarias que se derivan del Canal Sublateral 23+700 (13) en orden de oeste a este es: Canal Ramal 7+700 (14), Ramal 6+700 (15), Canal 5+700 (16), Ramal 4+700 (17), Ramal 3+700 (18), Canal Ramal 2+700 (19), Canal Ramal 1+700 (20) y Canal Ramal 0 (21). Este último se divide en dos partes, la primera (12) proviene del norte de la ciudad, proporciona agua a los campos de cultivo en el límite oriental de la ciudad y termina en el Dren Bay. 23+700 (28), la segunda parte (21) es la que se deriva del Canal Sublateral 23+700 (13) y es paralelo al resto de los ramales. Además del Canal Ramal 0 (21), al norte de la ciudad se aprecia otro canal de suma importancia el cual se identifica como Canal Hidalgo (11) y es el encargado de alimentar a la planta potabilizadora conocida “Planta Mochis” (Figura 11), la cual se localiza en las inmediaciones del Cerro de la Memoria y posee una capacidad de producción de 950 l/s (H. Ayuntamiento de Ahome, 2014).



Figura 12. Compuertas sobre el Canal Sublateral 23+700 (13) que regulan el flujo de entrada en el Canal Ramal 2+700. Obtenida de Street View de Google Maps (diciembre de 2009).

3.7.2 Red de Drenes

Al igual que la red de canales, la red de drenes posee una dirección NE-SO predominantemente. El dren más importante es el Dren Juárez (24), el cual se ha convertido en un factor de riesgo hidrológico y ambiental para la ciudad de los Mochis, ya que drena aguas excedentes agrícolas y pluviales generadas en aproximadamente 2,300 hectáreas de cultivo de la zona norte de la de la ciudad (H. Ayuntamiento de Ahome, 2012a; Organismo de Cuenca Pacífico Norte de la CONAGUA & SEMARNAT, 2016), además, dentro del área urbana recibe importantes descargas provenientes del Dren Justicia Social (32) y del Dren Bay 10 del Dren Juárez (25), y de los colectores pluviales Justicia Social (1) y Jiquilpan (2). En conjunto, estas causas provocan que en temporada de lluvias este dren se desborde provocando inundaciones en diversas zonas de la ciudad (Cabrera Martínez, 2018; IMPLAN, 2012a), así mismo, se han reportado afectaciones ambientales y a la salud, como el ensalitramiento del suelo a causa del anegamiento de tierras de cultivo aledañas (El Debate, 2018a), o contaminación por tiraderos clandestinos instalados en los márgenes del dren (IMPLAN, 2012a). Es por ese motivo, que una propuesta para paliar las afectaciones vinculadas al Dren Juárez, consiste en su desvío hacia el Dren Buenaventura, a través de los drenes Bayoneta y Cerillos ubicados en el límite norte de la ciudad (Figura 13). La idea de este proyecto, consiste en bloquear la entrada de flujo en el Dren Juárez a la altura de la carretera federal 15 “Navojoa - Los Mochis”, dirigiendo el agua excedente del distrito de riego aguas arriba, a través del Dren Buenaventura el cual desemboca sus aguas a 280 m de la línea de costa de Bahía Santa María. A pesar de que la manifestación de impacto ambiental de este proyecto (MIA-P 25SI2012HD044; H. Ayuntamiento de Ahome, 2012) fue aprobada durante el año 2012, no fue hasta septiembre de 2018, que este proyecto fue aprobado por la cámara de diputados (Senado de la República, 2018) en vista de la inundación histórica que se presentó en los días 19, 20 y 21 de septiembre de 2018 en Los Mochis, Sinaloa a consecuencia de la Depresión Tropical 19-E (Cabrera Martínez, 2018a; El Debate, 2018b, 2018c).

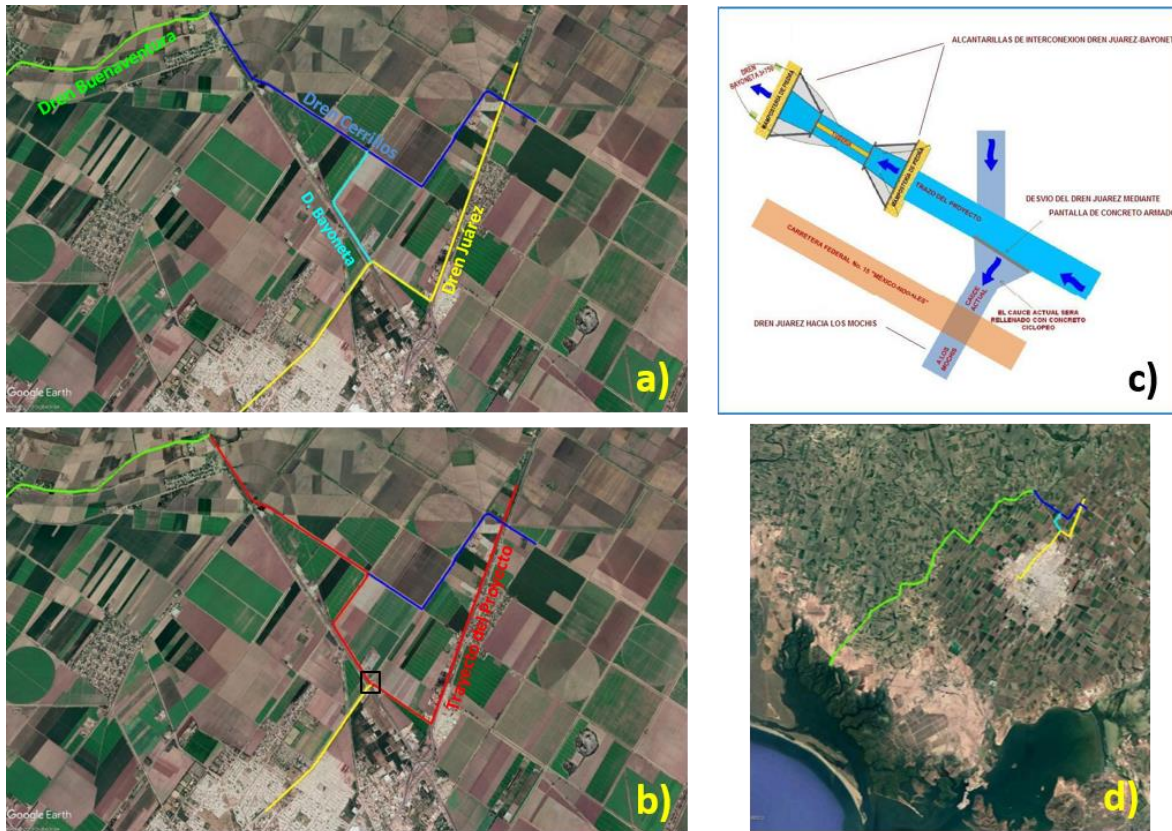


Figura 13. Estado actual del Dren Juárez (a) y la propuesta de proyecto para su desvío hacia el Dren Buenaventura a través de los drenes Bayoneta y Cerillos (b). El proyecto comienza con la obstrucción de flujo del Dren Juárez en el puente de la Carretera Federal No. 15 “México Nogales” y su interconexión con el Dren Bayoneta (c) y termina con la descarga de agua residual de riego a 280 m de la línea de costa de Bahía Santa María (d). Fuente: H. Ayuntamiento de Ahome (2012).

El segundo dren en orden de importancia es el Dren Álamo (23), este surge en los campos de cultivo ubicados al norte de la ciudad, a pocos metros de la carretera Navojoa - Los Mochis. Este dren ha sido ubicado por diversos medios como una fuente de riesgo debido a la deficiente infraestructura con que fue diseñado. En la nota publicada por López (2018), se señalan a las estructuras que sostienen los puentes vehiculares sobre este dren, así como la irregular geometría del canal como los causantes principales de los desbordes de este dren durante la época de lluvias, aunado a eso, este dren se une al Dren Juárez (24) en el Boulevard Zacatecas (Figura 14) manzanas arriba del Canal Sublateral 23+700 (13), por lo que, esta zona ha sido identificada como el punto crítico donde las inundaciones se presentan con mayor intensidad (IMPLAN, 2012a; López, 2018).



Figura 14. Intersección entre el Dren Álamo (23) y el Dren Juárez (24). El área comprendida entre esta confluencia y el Canal Sublateral 23+700 (13) y sus alrededores, es un punto crítico, ya que, en época de lluvias suelen presentarse inundaciones por el desborde de estas infraestructuras hidráulicas.

Otra estructura de drenaje importante es el Dren Mochis (29), el cual fue entubado con tubería RIBLOC de 2.5 m de diámetro durante el año 2006 (Organismo de Cuenca Pacifico Norte de la CONAGUA & SEMARNAT, 2016), con una extensión durante el año 2012 (Toledo González, 2012), por lo que la sección de este dren que a traviesa la ciudad, ahora funge como colector pluvial (6). Las problemáticas derivadas de esta estructura, se vinculan a fallos en su diseño, ya que anteriormente este dren no funcionaba en su totalidad debido a que no estaba compactada adecuadamente la tubería y además, carecía de válvulas disipadoras de energía (expulsoras de aire; Organismo de Cuenca Pacifico Norte de la CONAGUA & SEMARNAT, 2016).

El Dren Mochicahui (26), al igual que Dren Mochis (29), está parcialmente entubado, este surge aguas arriba de la ciudad captando agua de lluvia y excedentes agrícolas del distrito de riego. Atraviesa la carretera federal e ingresa a Los Mochis en zona noreste por un costado del cerro de la Memoria. Este dren comienza a descender por la ciudad hasta llegar a la altura del Dren Cero (27), posteriormente vierte sus aguas al Colector Pluvial Mochicahui Paralelo (7), el cual colecta aguas de lluvia a lo largo del Boulevard Mariano Gaxiola. A pocos metros del Boulevard Centenario

vuelve a emerger este dren en su forma superficial y recibe aguas provenientes del Dren Bay. 23+700 (28). Posteriormente a través de un sifón atraviesa de forma perpendicular el Canal Sublateral 23+700 (13) pasando por un costado de la Planta Potabilizadora Ing. Terán Hernández (Figura 11), esta estructura continúa su recorrido en la margen derecha de la Carretera a Topolobampo de forma paralela con el Canal Ramal 2+700 (20). Este dren es importante, ya que según el Plan Operativo de Inundaciones de Los Mochis (Organismo de Cuenca Pacífico Norte de la CONAGUA & SEMARNAT, 2016), las colonias aledañas a este, son las que reportan mayor número de población damnificada en época de lluvias.

El resto de drenes que atraviesan la ciudad de los Mochis, al igual que los previamente mencionados, conducen excedentes de riego y agua de origen pluvial, sin embargo, debido a sus dimensiones, estos no han reportado tantas afectaciones como los drenes Juárez, Álamo o Mochicahui. En la Figura 11, se pueden apreciar estos drenes menores, la mayoría son a cielo abierto como el Dren Bay 10 del Dren Juárez (25), el Dren Cero (27), el Dren Bay. 23+700 (28), el Dren Miguelito (30) y el Dren Ba. Flores Magón (31), y el resto entubados, como el Dren Justicia Social (32) y el Dren Cañero (33).

3.7.3 Red de Colectores Pluviales

La red de colectores pluviales en la ciudad es relativamente joven, de hecho, algunos de los principales drenes de la ciudad, han sido entubados y provistos de rejillas de tormenta para la colecta de aguas superficiales (Organismo de Cuenca Pacífico Norte de la CONAGUA & SEMARNAT, 2016; Toledo González, 2012). Los principales colectores pluviales en Los Mochis constituyen una pequeña red en la cual, el agua de lluvia colectada se descarga en drenes a cielo abierto. Por ejemplo, el Colector Justicia Social (1), traslada el agua de lluvia colectada en el Boulevard Justicia Social y lo conduce hasta el Dren Juárez (24). Algunos metros más hacia el sur, el Colector Pluvial Jiquilpan (2) el cual opera en el Boulevard Juan de Dios Batiz, al igual que el Colector Justicia Social (1), desemboca sus aguas sobre el Dren Juárez (24). El Colector Pluvial Jiquilpan (2) está conectado con el Colector Pluvial Boulevard Rosales (3), el cual, a su vez, se conecta con el Colector Pluvial

Independencia (4) para desembocar sus aguas sobre el Colector Pluvial del Dren Mochis (29) el cual como previamente se ha mencionado, termina en un dren a cielo abierto.

Por último, se tiene al Colector Pluvial Mochicahui Paralelo (7) el cual, consiste en una tubería que atraviesa la ciudad, llevando los excedentes de riego del Dren Mochicahui (26) junto con agua de origen pluvial, hasta la continuación del Dren Mochicahui (26) el cual termina a las afueras de la ciudad.

Una situación que comúnmente se presenta en la zona urbana de los Mochis durante eventos de inundación, es el colapso de la red de colectores pluviales debido a la obstrucción de las rejillas de tormenta por residuos sólidos urbanos. En un esfuerzo por mitigar los efectos adversos generados por los eventos de inundación, se han designado importantes recursos económicos para la restauración y ampliación de la red de drenaje urbano en la ciudad (El Heraldillo de México, 2019).

3.8 El problema de las inundaciones en Los Mochis

El problema de las inundaciones ha sido una constante en el estado de Sinaloa, diversos municipios se han visto afectados por importantes precipitaciones las cuales han dejado como saldo afectaciones severas. Claros ejemplos de esto han sido las inundaciones históricas en el municipio de Guasave, Sinaloa en el año 1998 (Palafox Ávila, 2006) o las de Culiacán, Sinaloa en los años 1966, 2006, 2013 (Organismo de Cuenca Pacifico Norte, 2017) y más recientemente en el 2018 (Cabrera Martínez, 2018b).

Por su parte, en Los Mochis las inundaciones constituyen una problemática histórica (Figura 15). Se han documentado inundaciones en la ciudad desde el año 1928 (aunque se tienen testimonios aún más antiguos) hasta la fecha, además, con el pasar de los años aparentemente esta tendencia va en aumento, no obstante, tan solo en los últimos quince años se han presentado cuatro desastres por inundación

en la ciudad, los cuales han generado severas afectaciones a la población, algunos llegando incluso a activar el Plan DN-III de la SEDENA (Plan de la Secretaría de la Defensa para el Auxilio a la Población Civil en Casos de Desastre; IMPLAN, 2012a). En la Tabla 2 se enlistan las inundaciones más importantes que se han presentado en el Municipio de Ahome, Sinaloa en los últimos 30 años, este recuento se realizó con base en información obtenida del Atlas de Riesgo de los Mochis (IMPLAN, 2012a) y de fuentes hemerográficas recopiladas por el Sistema de Inventario de Desastres DesInventar (Corporación OSSO & LA RED, 1994).



Figura 15. Fotografías captadas durante inundaciones históricas en la ciudad de Los Mochis, Sinaloa, durante el año 1928 (izquierda) y la más reciente en septiembre de 2018 (derecha). Esta última vinculada a la Depresión Tropical 19-E. Fuente: El Debate (2018b, 2018d).

Tabla 2. Listado de las principales inundaciones que se ha presentado en el Municipio de Ahome, Sinaloa en los últimos 30 años. Elaborada con base en fuentes hemerográficas recopilados por el Sistema de Inventario de Desastres DesInventar (Corporación OSSO & LA RED, 1994) y el Atlas de Riesgo de los Mochis (IMPLAN, 2012a).

Fecha Inicio	Fuente	Observación de Efectos	Evento
01/10/1982	El Universal	Daños globales para todo el estado.	Huracán Paul
05/02/1983	Excélsior	Algunas hectáreas de jitomate y trigo están anegadas.	El Niño
04/10/1986	El Universal	Paralización de actividades. Daños infraestructura eléctrica	Huracán Paine
05/09/1995	CENAPRED, 1996	Precipitación con un máximo de 197 mm, afectaciones en diversas colonias	Lluvias Intensas

15/09/1996	El Universal	78 comunidades incomunicadas. 30 colonias inundadas. Lluvia Máxima acumulada 150 mm	Huracán Fausto
03/09/1998	La Jornada	Por lo menos 25 colonias inundadas. Aplican el Plan DN-III. Daños globales.	Huracán Isis
04/09/2004	La Jornada	Colapso de la Red de Drenaje en Los Mochis. Diez colonias damnificas en unas diez colonias y suspensión de las clases en nivel básico.	Lluvias
04/09/2007	SEDESOL, Gobierno Municipal, 2009	Evacuación de 260 familias en las partes bajas de los Mochis debido a lluvias. Precipitaciones pluviales de hasta 85 mm	Huracán Henriette
25/08/2008	Protección Civil	Colonias y calles afectadas por la lluvia. Suspensión de clases en diversos planteles educativos	Tormenta Tropical Junio
10/09/2008	La Jornada	Se suspendieron las clases en todos los niveles. El 90% de las colonias están inundadas. Municipio declarado en emergencia.	Tormenta Tropical Olaf
13/10/2009	La Jornada/Gobierno Municipal (2009)	Se aplica el Plan DN-III. Hasta un metro de altura. 600 personas trasladadas. Daños en viviendas, colapso de drenajes, cultivos inundados, calles y caminos vecinales. Los servicios de energía eléctrica y agua potable interrumpidos.	Tormenta Tropical Patricia
05/10/2014	LíneaDirectaPortal LD	Tromba deja inundaciones y tira árboles y espectaculares en Los Mochis y Guasave	Tromba
17/09/2018	El Universal/ Diversos medios	Lluvias provocan inundaciones en Los Mochis	Desborde Dren Juárez

A pesar de que Los Mochis ha demostrado tener un alto grado de vulnerabilidad ante desastres por inundaciones, actualmente existe un reducido número de trabajos de investigación que aborden este tema de una forma rigurosa y científica, por el contrario, amplia información sobre esta problemática se puede encontrar solo a través de estudios técnicos, como el plan operativo de inundaciones (Organismo de Cuenca Pacifico Norte de la CONAGUA & SEMARNAT, 2016),

manifestaciones de impacto ambiental (e.g., H. Ayuntamiento de Ahome, 2012; Junta de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Ahome, 2011; Toledo González, 2012), Programas Gubernamentales (e.g., CONAGUA, 2012) y el Atlas de Riesgo Municipal de Ahome (IMPLAN, 2012a), siendo este último quizás el más importante, ya que en este trabajo se realizó un análisis de vulnerabilidad ante eventos de inundación, además se zonificaron las áreas más propensas a inundarse dentro de los Mochis (Figura 16), sin embargo, no se especifican los criterios ni la metodología empleados para el mapeo de los polígonos de riesgo por inundación.

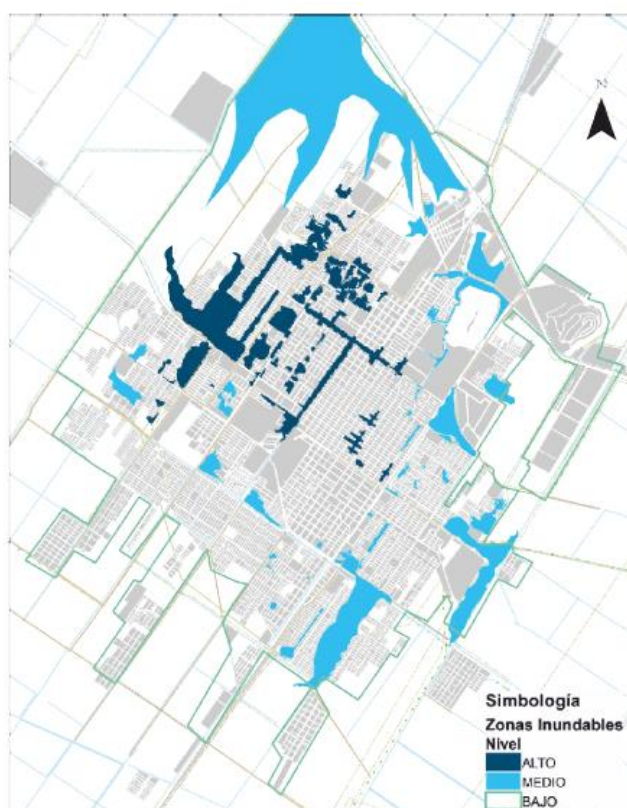


Figura 16. Zonas inundables de riesgo alto (azul marino), medio (azul cielo) y bajo (blanco) en Los Mochis, Sinaloa según el Atlas de Riesgos Naturales en la ciudad de Los Mochis 2011. Recuperado de IMPLAN, (2012a).

Información de referencia para la zona de estudio, se puede encontrar en estudios de análisis de inundaciones en localidades aledañas (e.g. Guasave, Sinaloa; Palafox Ávila, 2006) y en algunos trabajos de investigación en materia de hidrología (Berlanga-Robles, Ruiz-Luna, Covarrubias-Legaspi & Hernández-Guzmán, 2011; Campos Aranda, 2008).

Capítulo 4. Materiales y Métodos

4.1 Planteamiento Metodológico

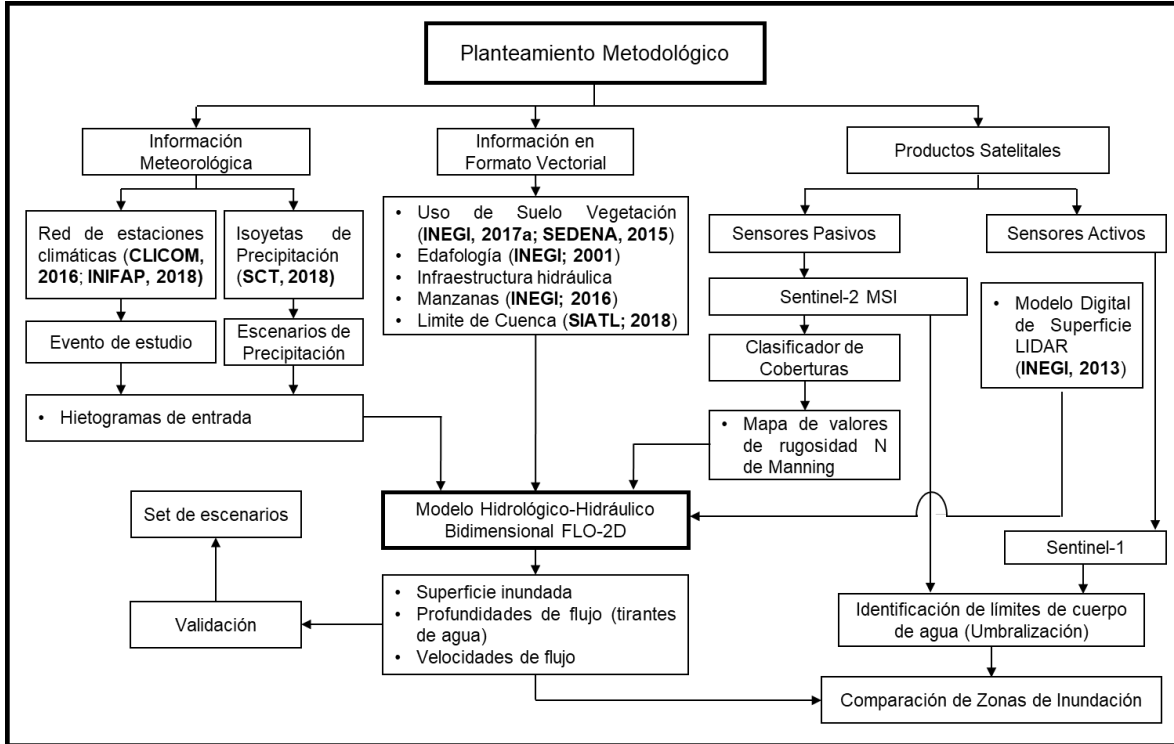


Figura 17. Planteamiento metodológico para la zonificación de áreas de inundación propuesto en este proyecto de investigación

En la Figura 17, se muestra el planteamiento metodológico propuesto para la elaboración del presente trabajo de investigación. Los tres ejes principales de este esquema, corresponden a los tres principales tipos de datos utilizados; información meteorológica, información en formato vectorial (archivo *Shapefile*) y productos satelitales.

Comenzando por la información meteorológica, esta se obtuvo de dos fuentes principales, la Red de Estaciones Agrometeorológicas Automatizadas del INIFAP (INIFAP, 2018) y de los mapas de Isoyetas de Precipitación emitido por la SCT (SCT, 2015), para el dimensionamiento de obras hidráulicas y estudios de riesgo. Estos datos fueron utilizados para la generación de hietogramas de entrada en el modelo hidrológico FLO-2D.

Los datos vectoriales, se obtuvieron principalmente de INEGI (INEGI, 2004, 2008, 2010, 2017c). Sin embargo, también se utilizó información proveniente de la SEDENA (SEDENA, 2015) ,INIFAP (INIFAP & CONABIO, 2001) e IMPLAN (IMPLAN, 2012b, 2012d, 2012c), además, archivos en formato vectorial adicionales fueron generados durante este trabajo de investigación, como en el caso del clasificador de coberturas, el cual posteriormente a su elaboración, fue vectorizado para su incorporación en el modelo FLO-2D.

Por su parte, los productos satelitales tuvieron varios propósitos; los modelos de elevación digital (DEM) se utilizaron como datos de entrada en las simulaciones con FLO-2D (INEGI, 2013, 2017b), de igual forma se usaron imágenes satelitales ópticas para generar un mapa de tipo de cobertura empleando el algoritmo de clasificación *Maximum Likelihood Classification* (Strahler, 1980). Adicionalmente, productos satelitales ópticos multiespectrales e imágenes SAR se usaron para la validación y comparación de los resultados obtenidos por el modelo hidrológico, aplicando técnicas de umbralización (*thresholding*) para la delimitación de zonas anegadas dentro la zona urbana de Los Mochis, Sinaloa.

En su conjunto, este esquema metodológico tiene como propósito mejorar la robustez y confiabilidad de los resultados obtenidos por un modelo de simulación numérica para la zonificación y mapeo de zonas inundables.

4.2 Información Meteorológica

El uso de datos meteorológicos en modelos hidrológicos o hidráulicos, es una práctica ampliamente difundida ya que estos suelen ser usados como datos de entrada siendo en muchos casos la precipitación la principal fuente de agua en el sistema de estudio.

En ese sentido, en este trabajo de investigación se ha incorporado información climática proveniente de la Red de Estaciones Agrometeorológicas Automatizadas del INIFAP, la cual monitorea diversas variables del tiempo atmosférico como la

precipitación, temperatura, evaporación, dirección del viento, humedad relativa, en zonas agrícolas en todo el país de forma continua y en periodos de 15 minutos (INIFAP, 2018).

Después de un análisis de la información disponible en las bases de datos climáticas del INIFAP, del SMN y la SEMAR, se seleccionó la estación meteorológica Camajoa (con clave 36188 y ubicación 25.94, -108.82; Figura 18), proveniente de la red meteorológica del INIFAP, debido a que en ella se logró registrar la precipitación que se presentó durante la Depresión Tropical 19-E, evento hidrometeorológico extremo que tuvo lugar en diversas ciudades al noroeste del país (incluyendo Los Mochis) durante los días 19 y 20 de septiembre de 2018, seleccionado para la calibración y validación del modelo hidrológico por la catastrófica inundación urbana que desembocó (Cabrera Martínez, 2018a, 2018b; El Debate, 2018b, 2018c). En la Figura 19 se muestra la precipitación registrada por la estación Camajoa a partir del 19 de septiembre de 2018 a las 05:45:00 a.m., hasta el 20 de septiembre de 2018 a las 07:45:00 p. m., la cual alcanzó los 125.8 mm.

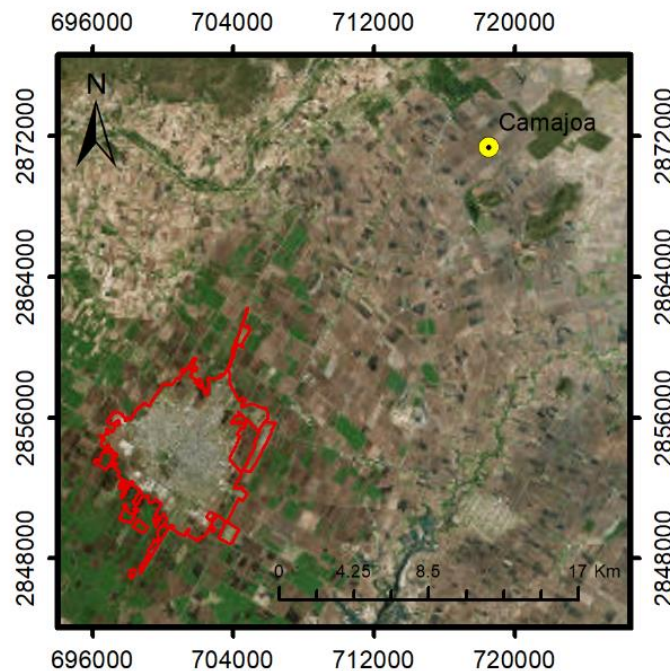


Figura 18. Ubicación de la estación meteorológica Camajoa (en amarillo) con respecto del centro urbano de los Mochis (en rojo).

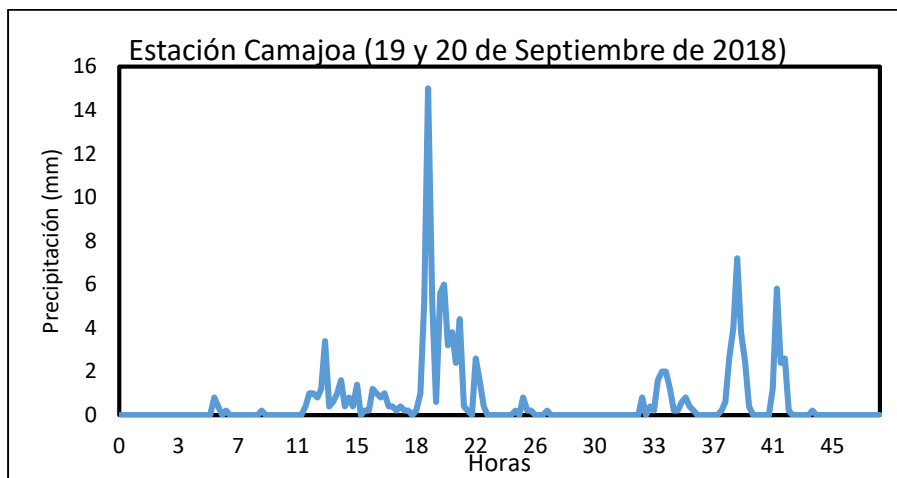


Figura 19. Precipitación registrada durante la Depresión Tropical 19-E, en los días 19 y 20 de septiembre de 2018 en la estación meteorológica Camajoa. Se estima que la lluvia acumulada al final del evento fue de 125.8 mm. Elaborado con base en datos de INIFAP (2018).

Para la elaboración de mapas de riesgo por inundaciones, se generó un set de escenarios de precipitación bajo diferentes periodos de retorno. En dicha tarea, se generaron curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), para la estimación de tormentas de diseño.

Diversos libros y manuales de hidrología e hidráulica (Bedient *et al.*, 2007; Campos Aranda, 2015; Sánchez Martínez & Lastra Fernández, 2011; U.S. Army Corps of Engineers, 1981), señalan diferentes técnicas para la generación de curvas IDF, que se basan en el análisis probabilístico de registros pluviográficos, no obstante, la red de estaciones de INIFAP (INIFAP, 2018) inició operaciones a partir de agosto de 2007, por lo que, no se cuenta con un histórico de observaciones que pueda ser usado en la generación de curvas IDF, por su parte, redes de estaciones alternativas presentan una gran cantidad de datos faltantes (incluso años completos) como en el caso de las redes operadas por SMN (Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas; EMAS y CLICOM; CLICOM, 2016) o simplemente la información no es de uso libre como en el caso de las estaciones operadas por la SEMAR.

Ante esta situación, se optó por aplicar el método basado en la ecuación de Chen (1983) modificado por Campos Aranda (2015), en donde se propone el uso de datos

provenientes de los mapas de Isoyetas de Precipitación emitido por la SCT(SCT, 2015) cuando no se dispone de registros climáticos de calidad.

En este método, se extraen las intensidades de lluvias con 60 minutos de duración y periodos de retorno de 10, 25, y 50 años provenientes de los mapas de Isoyetas, los cuales se representarán como P_1^{10} , P_1^{25} y P_1^{50} , posteriormente, se toman los valores de lluvia máxima diaria probabilística para los periodos de retorno 10, 25, 50 y 100 años, se multiplican por el factor de conversión 1.13 (factor de conversión para convertir la precipitación máxima anual de intervalo fijo en la de intervalo verdadero, propuesto para Estados Unidos; Yoo, Jun & Park, 2015) y se designan como P_{24}^{Tr} (siendo Tr el periodo de retorno). Estos valores son necesarios para calcular los cocientes lluvia-duración (R ; ecuación 33) y lluvia-frecuencia (F ; ecuación 34).

$$R = \frac{P_1^{Tr}}{P_{24}^{Tr}} \quad (33)$$

$$F = \frac{P_{24}^{100}}{P_{24}^{10}} \quad (34)$$

El siguiente paso, consiste en la estimación de los parámetros para la obtención de la ecuación de Chen, los cuales se derivan de las gráficas propuestas por Chen (1983). Las cuales se pueden expresar en forma de ecuaciones de regresión polinomial (ecuaciones 35, 36, 37). En estas ecuaciones la variable R corresponde al promedio de todos los cocientes lluvia-duración para cada periodo de retorno.

$$a = -2.297536 + 100.0389 \cdot R - 432.5438 \cdot R^2 + 1256.228 \cdot R^3 - 1028.902 \cdot R^4 \quad (35)$$

$$b = -9.845761 + 96.94864 \cdot R - 341.4349 \cdot R^2 + 757.9172 \cdot R^3 - 598.7461 \cdot R^4 \quad (36)$$

$$c = -0.0649834 + 5.069294 \cdot R - 16.08111 \cdot R^2 + 29.09596 \cdot R^3 - 20.06288 \cdot R^4 \quad (37)$$

Finalmente, con los parámetros a , b , c y los cocientes R y F , se resuelve la ecuación de Chen (ecuación 38) para la generación de las Curvas IDF.

$$i_D^{Tr} = \frac{a \cdot P_1^{10} \cdot \log(10^{2-F} \cdot Tr^{F-1})}{(D + b)^c} = \frac{a_{Tr}}{(D + b)^c} \quad (38)$$

En esta ecuación, P_{24}^{Tr} corresponde a la intensidad de lluvia buscada en mm/h para una duración D y un periodo de retorno Tr .

El resultado de aplicar esta metodología se puede apreciar en la Figura 20 en donde se muestran las curvas IDF, generadas a partir de los mapas de Isoyetas de precipitación para el estado de Sinaloa (SCT, 2015). Estas curvas fueron construidas con intensidades de lluvia en periodos de tiempo de 15 minutos para los periodos de retorno 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. Cabe destacar, que esta metodología ha sido evaluada con base en información proveniente de 10 fluviógrafos ubicados en el interior del país en el trabajo de Campos-Aranda (2010), encontrando por lo general una buena adecuación de los resultados.

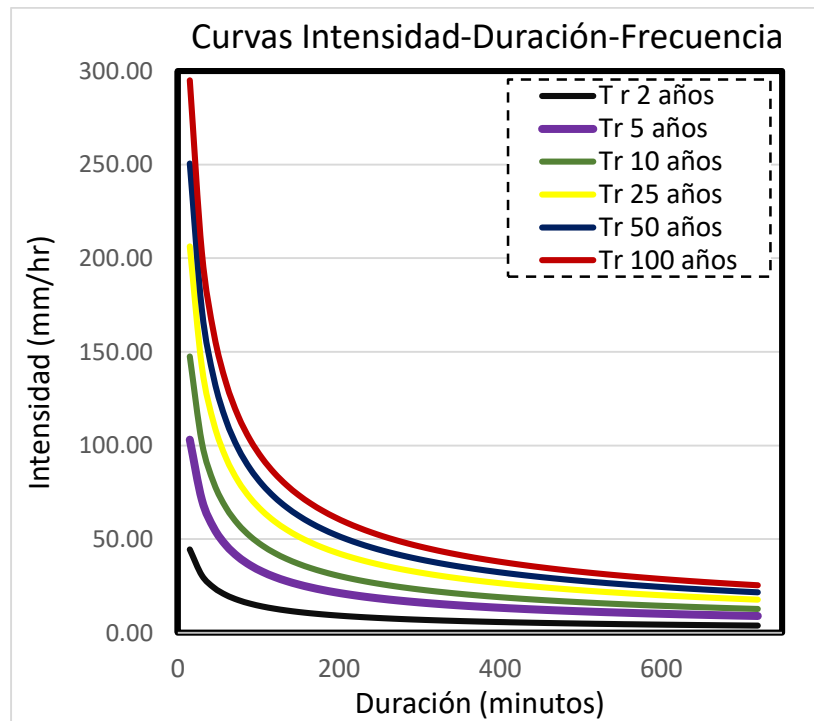


Figura 20. Curvas IDF, estimadas para la generación de tormentas sintéticas en la zona de estudio.

Los hietogramas para las tormentas de diseño se construyeron con base en el método de bloques alternos (*alternating block method*; Chow, Maidment, Mays, Saldarriaga & others, 1994), en el cual, el intervalo de tiempo (15 minutos en este caso) con mayor precipitación se coloca en el centro, el segundo intervalo en magnitud de lluvia se coloca la derecha del primero, el tercero a la izquierda, el cuarto a la derecha del segundo, y así sucesivamente. (Figura 21). A este tipo de arreglo también se le conoce como tormenta balanceada (Campos Aranda, 2015).

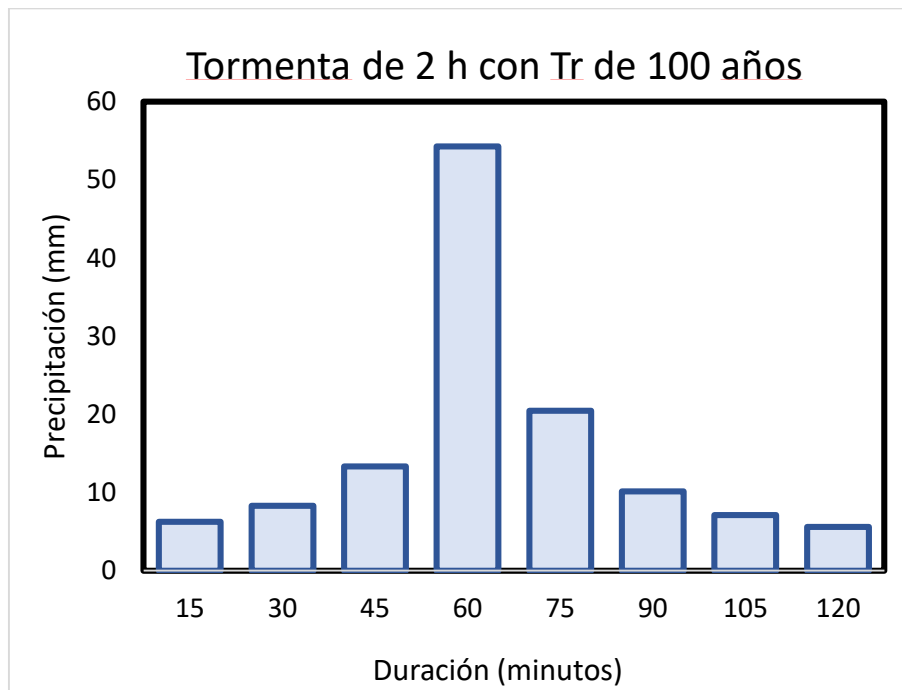


Figura 21. Hietograma de una tormenta de diseño con una duración de 2 horas y un periodo de retorno de 100 años estimada para la zona de estudio.

Adicionalmente, a los valores obtenidos para la generación del Hietograma de diseño, se les aplico el Factor de Reducción por Área (FRA), el cual ha sido aplicado en México con resultados aceptables. El FRA se calcula aplicando la ecuación 39 (U.S. Army Corps of Engineers, 1981).

$$FRA = 1.0 - 0.3549 \cdot D^{-0.42723} (1.0 - e^{-0.005794 \cdot A}) \quad (39)$$

Donde, D es la duración de la precipitación en horas y A es el área de la cuenca, en este caso es la cuenca RH10Fb con un área de 2469.96 km² (SIATL-INEGI, 2016).

4.3 Modelo Hidrológico-Hidráulico Bidimensional FLO-2D

FLO-2D es un modelo de enrutamiento de inundaciones, utilizado para la simulación de propagación de crecidas o flujo de escombros y sedimentos (O'Brien & Fullerton, 1999).

En este modelo, las ecuaciones de onda dinámica completa y continuidad (ecuaciones 8 y 30 revisadas en capítulos anteriores) se aplican en un esquema de diferencias-finitas centradas (esquema explícito) con 8 potenciales direcciones de flujo (Figura 22), las cuales son usadas para predecir la progresión del hidrograma de inundación a través de un sistema de elementos grillados cuadrados (FLO-2D Software Inc., 2017a).

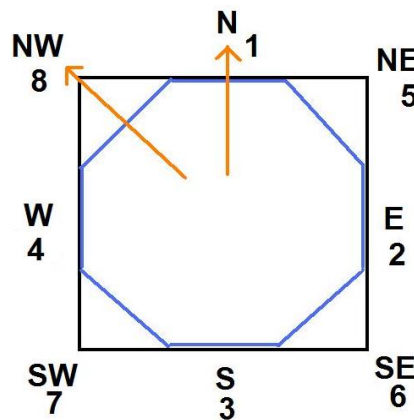


Figura 22. Celda del modelo FLO 2-D, la cual puede transitar flujo a celdas aledañas a través de 8 direcciones.

FLO-2D fue inicialmente diseñado como un modelo numérico para simular el transporte de sedimentos y flujos hiperconcentrados (O'Brien & Fullerton, 1999), actualmente la paquetería de FLO-2D permite también la simulación de flujos no saturados sobre superficies de flujo no confinadas o en canales, además, con el paso del tiempo, el software que permanece en un proceso de desarrollo continuo, se ha ido actualizando de tal modo que en la actualidad se han incluido diversos procesos y componentes para el modelado de inundaciones como lo son: precipitación, infiltración, evaporación, transporte de sedimentos, efecto de estructuras hidráulicas, colapso de estructuras, edificios, diques, drenaje pluvial, ruptura de presas, etc (Figura 23).

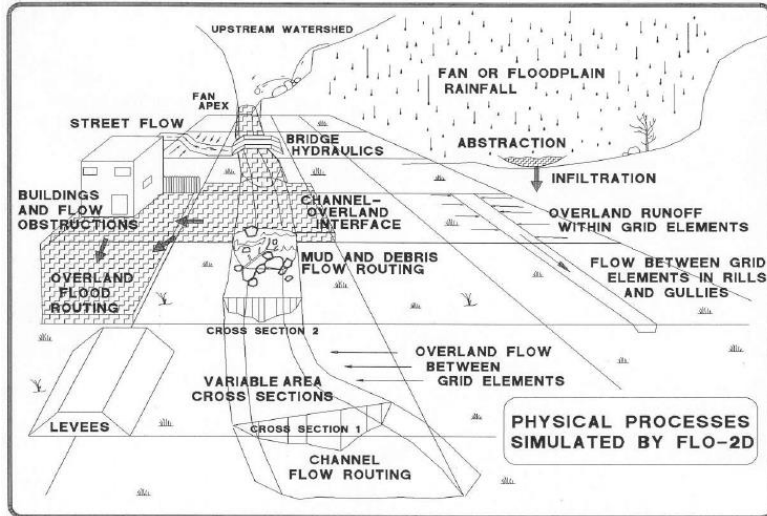


Figura 23. Esquematación de los procesos físicos simulados por FLO-2D. Recuperado de: FLO-2D Software Inc. (2017).

4.3.1 Funcionamiento del Modelo FLO-2D

El espacio que será utilizado como zona de estudio, es discretizado mediante una malla (el cual generalmente se realiza en función de la capa de relieve), posteriormente se generan las capas de información que serán suministradas al modelo como datos de entrada. Estas capas de información se generan mediante un procedimiento que se denomina como esquematización (*schematization*). Se emplea una interfaz gráfica (GDS PRO o Plugin de QGIS) para asignar los valores de cada parámetro del modelo hidrológico (elevación, coeficiente de Manning, tasa de infiltración, tasa de evaporación, precipitación, etc.) a cada una de las celdas de la malla (Figura 24) con base en datos vectoriales (Shapefile), Rasters, DEMs., etc. En caso de existir atributos puntuales como hidrogramas de entrada, canales, infraestructura hidráulica, etc., estos se asignan seleccionando las celdas de forma manual dentro del dominio de simulación (FLO-2D Software Inc., 2017a).

Los datos de entrada esquematizados por la interfaz gráfica son transformados en archivos de texto en formato ASCII (*.DAT) para ser leídos por el módulo de FLO-2D encargado de la simulación numérica. El modelo numérico resuelve las ecuaciones de continuidad y Momentum, mediante esquema numérico central de diferencias finitas en cada elemento de la malla en un tiempo igual al *timestep* (i.e.,

intervalo de tiempo que el software fija para solucionar las ecuaciones gobernantes del modelo). Al igual que los datos de entrada, los datos de salida están dados en formato ASCII, estos contienen los resultados de la simulación (*.OUT) y un archivo de reporte de errores (*.CHK).

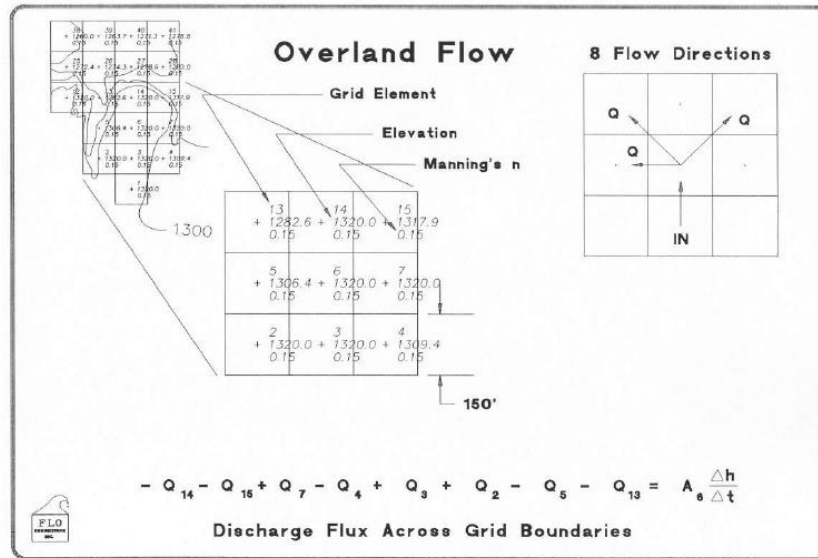


Figura 24. Esquematación de la descarga de flujo a través de los elementos espacialmente mallasados. Recuperado de: FLO-2D Software Inc. (2017).

4.3.2 Operación del Modelo FLO-2D

En cuestiones operativas, para que el modelo pueda ser aplicado en su forma más básica, este requiere de un mapa base de datos de elevación a través del cual se hará transitar un flujo, por lo tanto, es necesario incluir información hidrológica mediante un hidrograma de inundación o datos de precipitación. Adicionalmente, parámetros de la simulación pueden incluirse de forma espacialmente distribuida, como lo son el coeficiente de Rugosidad N de Manning (Chow, 1959), infiltración (Green & Ampt, 1911), evaporación, etc.

El software FLO-2D consiste en una paquetería con diferentes programas los cuales tienen diferente función en el proceso de la simulación de inundación, que van desde la preparación de los datos de entrada, hasta la visualización de los resultados finales. En ese sentido, la Figura 25 muestra un esquema del proceso de simulación de inundaciones con el software FLO-2D (FLO-2D Software Inc., 2017a).

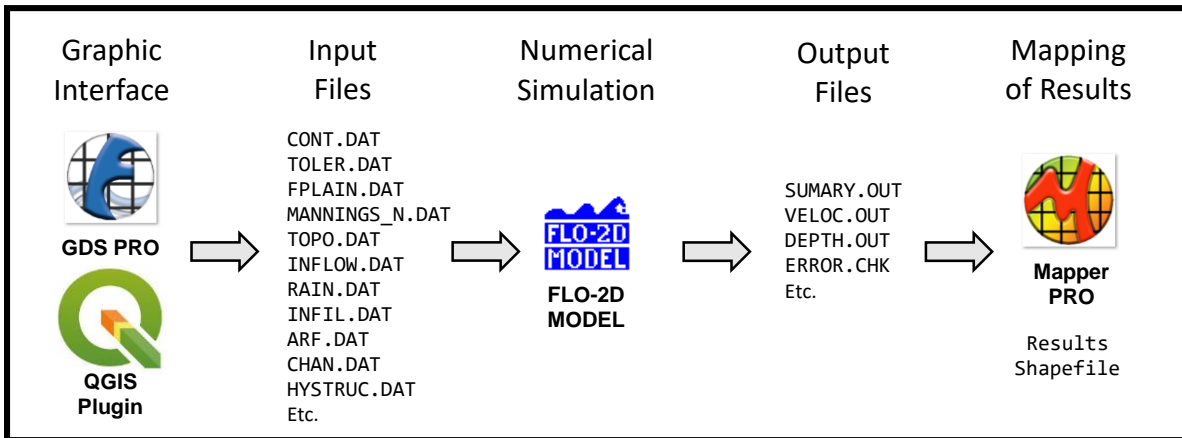


Figura 25. Esquemización del proceso de simulación de inundaciones con la paquetería FLO-2D (FLO-2D Software Inc., 2017)

Comenzando con la generación de datos de entrada, el equipo desarrollador de FLO-2D ha habilitado una interfaz mediante la cual es posible generar los archivos de entrada en formato de texto ASCII, y de esa forma poder ser leídos por el modelo. Dicha interfaz gráfica se conoce como *Grid Developer System (GDS)* y a través de ella se puede realizar el mallado de la zona estudio y asignar a cada celda los valores de los diferentes componentes del modelo. Posteriormente, al guardar el proyecto con los datos almacenados en cada celda de la malla, se crean los archivos de entrada que alimentan al modelo numérico (FLO-2D Software Inc., 2017a).

Los archivos más importantes generados a través del GDS son:

CONT.DAT: Guarda los parámetros del modelo como tiempo de simulación, unidades, parámetros de estabilidad, además, contiene la información sobre los componentes del modelo que se activarán durante la simulación.

TOPO.DAT: Elevación por celda

MANNINGS_N.DAT: Coeficientes de rugosidad N por celda

FPLAIN.DAT: lista de los elementos de cuadrícula y sus elementos de cuadrícula de borde

RAIN.DAT: Hietograma de precipitación

INFLOW.DAT: Entradas de flujo al sistema, contiene el identificador de los nodos de entrada con su respectivo hidrograma de entrada.

CHAN.DAT: Contiene toda la información relacionada a canales

HYSTRUC: Información de infraestructuras hidráulicas (alcantarillas)

ARF: Contiene los Factores de Reducción de Área, y los Factores de Reducción de Anchura para cada una de las 8 direcciones por celda (FLO-2D Software Inc., 2017a).

Recientemente, los desarrolladores han habilitado un Plugin para el software Quantum GIS (QGIS) compatible con varias de sus versiones más modernas. Para este trabajo de investigación, se utilizó este complemento en la versión de QGIS 3.4, debido a que este cumple con las funciones del GDS, pero de una forma más sencilla y eficiente, ya que facilita el manejo de *Shapefiles* y Rasters, además, permite uso de servicios de imagen de plataformas como Google Satellite o Bing.

Una vez generados los archivos de entrada, se corre el modelo, el cual solicita la ruta de la carpeta con los archivos de entrada. Es en esta misma carpeta el modelo guardará los archivos de salida generados durante la simulación.

Para la visualización y manipulación de los archivos de salida, se usa el complemento Mapper PRO, el cual mandará llamar los archivos de salida y graficará los resultados en su interfaz. Cada vez que el usuario grafique los resultados obtenidos, Mapper PRO generará archivos *Shapefile* automáticamente con los mapas de inundación dados en profundidad o velocidad de flujo.

4.3.3 Estabilidad numérica del modelo

La estabilidad del esquema numérico explícito se consigue mediante un estricto criterio de control de tamaño de variable llamada *timestep* (López Orozco, Alcocer Yamanaka, Rodríguez Varela & Albornoz Góngora, 2012), el cual básicamente

consiste en los intervalos de tiempo en que se aplicará el esquema de diferencias finitas en los elementos de la malla. Para el buen funcionamiento de FLO-2D, es necesario que exista una estabilidad numérica y una estabilidad física en la simulación. Grandes masas de agua, producen cambios espacio-temporales más intensos que flujos pequeños, por lo cual es necesario ajustar los valores de *timestep*, para que sea lo suficientemente pequeño y pueda simular la progresión acelerada del flujo a través de todas las celdas de la grilla (FLO-2D Software Inc., 2017a). Sin embargo, con valores de *timestep* más pequeños, los requerimientos computacionales suelen incrementarse significativamente, haciendo que el tiempo de simulación sea mayor.

4.3.4 Complementos y ventajas del modelo

Aparte de la inclusión del efecto de estructuras hidráulicas y edificios, así como el acoplamiento en paralelo con el modelo EPASWMM (FLO-2D Software Inc., 2017a), según Mollaei, Davary, Hasheminia, Faridhosseini & Pourmohamad (2018) también se pueden incluir otras ventajas, por ejemplo, con FLO-2D los parámetros de la cuenca hidrográfica se distribuyen en cada celda de la cuadrícula fina en lugar de agruparse en grandes subcuencas, además, no hay necesidad de estimar los parámetros de enrutamiento hidrológico e hidráulico (a diferencia de softwares como HEC1 o HEC-RAS; U.S. Army Corps of Engineers, 1981) ya que estos son inherentes al modelo, otra ventaja es que la escorrentía puede fluir en cualquier lugar dentro del dominio de simulación, no solo en el punto de concentración, entre otros.

4.3.5 Validación del modelo

El proceso de validación (*i.e.*, proceso por el cual se comparan y evalúan los resultados obtenidos por el modelo con datos registrados durante el evento simulado) es indispensable cuando se trabaja con modelos numéricos ya sean hidráulicos, hidrológicos o la integración de ambos. No obstante, en muchas ocasiones la validación de un modelo hidráulico se ve comprometida por la cantidad y calidad de la información que se dispone, ya que pocos son los lugares que

cuentan con una adecuada base de datos hidrológicos (datos de precipitación e hidrométricos), fotografías áreas de alta resolución o el registro de las marcas de agua durante algún evento extremo (FLO-2D Software Inc., 2017a). En ese sentido, en la literatura especializada se sugiere que es preferible contar con un modelo bidimensional parcialmente validado (en situaciones de falta de datos) que uno unidimensional que es incapaz de predecir eventos no observados, ya que, ante un patrón de flujo bidimensional, una esquematización unidimensional será inútil como una herramienta predictiva, mientras que un modelo bidimensional siempre se puede mejorar con levantamientos en campo y encuestas complementarias (Cunge *et al.*, 1980).

El proceso de validación en modelos de inundación bidimensional, por lo general se realiza con base en algún evento hidrometeorológico extremo histórico, del cual se tengan registros hidrometeorológicos, evidencia fotográfica, testimonios, marcas de agua, inventario de daños, etc. Generalmente, en trabajos de investigación enfocados a la modelación de inundaciones, se cuentan con diversos recursos, para validar los resultados obtenidos durante el proceso de simulación, con el fin de asegurar la certidumbre y rendimiento del modelo, algunos ejemplos, son mencionados a continuación.

A través de estaciones hidrométricas, las cuales registran el tirante, caudal y velocidad de flujo en un río, arroyo, laguna o embalse. Estos registros por unidad de tiempo, pueden utilizarse para calibrar o validar los resultados de velocidad de flujo si se conocen estos valores por celda en un tiempo específico.

Mediante el registro de las marcas de agua alcanzadas durante el evento de calibración. Si se cuenta con la elevación de tirante alcanzada por el agua durante un tiempo específico, es posible tomarse como punto de referencia para calibrar y/o validar el modelo. De forma complementaria, se puede tomar testimonios de las alturas alcanzadas por el flujo de agua de personas que hayan sido testigos del evento, con el fin de mejorar y robustecer el proceso de calibración.

Por último y quizás más importante, se tiene a la percepción remota. La integración de percepción remota con modelos de inundación bidimensionales, ha sido una herramienta ampliamente utilizada para la calibración y validación de estos últimos (Smith, 1997; Teng *et al.*, 2017), ya que a través de productos remotamente sensados como ortofotos o imágenes satelitales, es posible identificar la distribución espacial del flujo durante un evento de tormenta que haya terminado en un proceso de inundación.

Bajo este contexto, en este estudio se emplearon productos obtenidos a partir de técnicas de percepción remota activa y pasiva con el fin de comparar la información proveniente del modelo hidrológico y de esa forma robustecer la zonificación de áreas propensas a inundarse. En apartados posteriores, se profundizará sobre la incorporación de productos satelitales bajo dos diferentes principios de adquisición en este trabajo de investigación.

4.4 Generación de datos del modelo

4.4.1 Topografía

En la mayoría de los modelos hidrológicos espacialmente distribuidos, modelos de elevación digital (DEM, por sus siglas en inglés) son utilizados como capa base en la simulación numérica de caudales o llanuras de inundación, ya que la dirección de flujo está dada principalmente en función de la pendiente del terreno. El uso de los DEM en modelos de inundación es tan importante, que incluso el grado de detalle del modelo depende de la resolución espacial de estas capas de elevaciones. En ese sentido, existe en la literatura un gran número de publicaciones en donde se evalúa el efecto de emplear DEMs de alta resolución espacial en modelos de inundaciones (*e.g.*, Leitão & Sousa, 2018; Saksena & Merwade, 2015).

En este trabajo de investigación, se realizaron simulaciones numéricas en dos dominios espaciales diferentes, el primero fue a nivel cuenca (cuenca RH10Fb) y el segundo a nivel ciudad (Los Mochis), los cuales, debido a su diferencia de área se

manejaron a diferentes resoluciones espaciales. Bajo ese contexto, la información topográfica utilizada fue un DEM de 15 x 15m para la cuenca de estudio, mientras que en la simulación la zona urbana (Ciudad los Mochis) se trabajó con un DEM de 5 x 5m de resolución, esto último debido al grado de detalle que se deseaba manejar en la ciudad, ya que fueron contemplados durante la simulación hidrológica el efecto de las calles (Figura 26).

La fuente de información utilizada para los modelos de elevación consistió en el Continuo de Elevaciones Mexicano en su versión 3.0 (CEM 3.0; INEGI, 2013) de donde se extrajo un archivo en formato GRID con resolución espacial de 15 x 15 m y del conjunto de Modelos Digitales de Elevación tipo superficie de alta resolución (INEGI, 2017b) para los archivos con resolución espacial de 5 m, ambos productos generados por INEGI con tecnología LiDAR (Detección y rango de imágenes láser, por sus siglas en inglés).

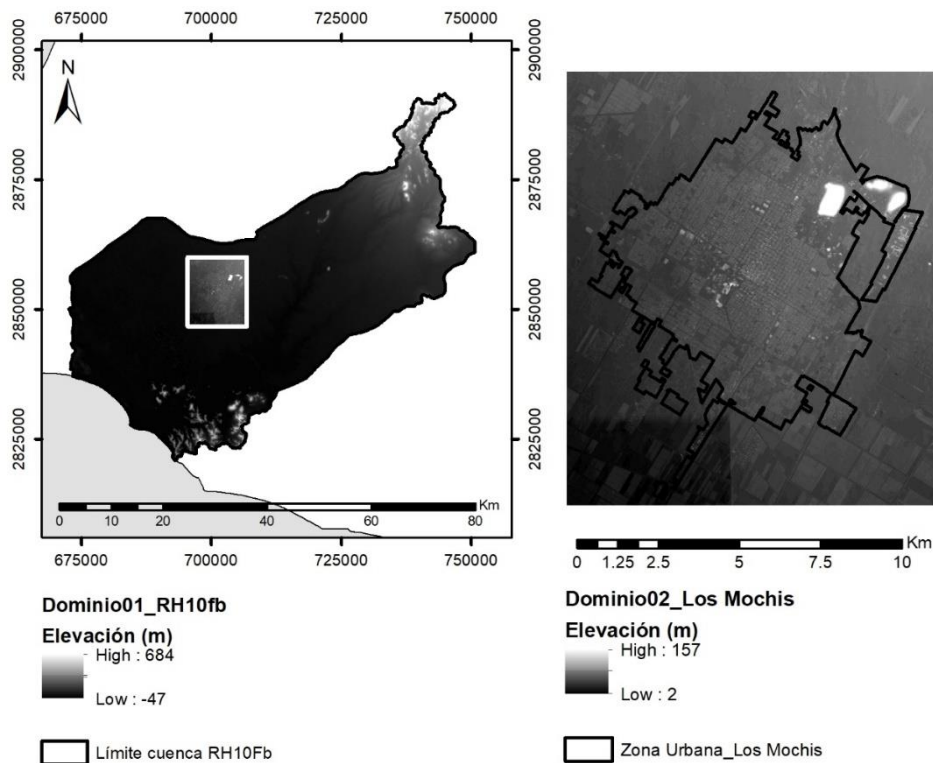


Figura 26. Elevación del dominio espacial 1 (Cuenca RH10Fb) y el dominio espacial 2 (Zona Urbana de Los Mochis). Elaborado con base en información de INEGI (2013, 2017b).

En ambos dominios espaciales, se realizó un proceso de interpolación a partir de los raster de elevaciones con el fin de asignarle a cada celda un valor de elevación, para el caso del modelo de cuenca, el tamaño de celda fue de 30 x 30 m a pesar de que el DEM utilizado fuera de 15x 15 m.

4.4.2 Coeficiente de Rugosidad N de Manning

Debido a las diferencias en resolución espacial entre los dos dominios, las capas con información del coeficiente de rugosidad N se generaron con dos diferentes métodos. Los valores asignados de coeficiente de rugosidad para cada celda de las mallas en los dominios establecidos, fueron calculados a partir de datos de rugosidad espacialmente distribuida en formato vectorial (Shapefile). Para el dominio de la cuenca RH10Fb, los datos de coeficiente de Manning se derivaron directamente del Continuo Nacional de uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie VI elaborado por INEGI (INEGI, 2017a) y del conjunto de datos vectoriales escala 1: 100 000, cubrimiento nacional de vegetación elaborado y editado por la SEDENA (SEDENA, 2015). Para la generación de los mapas de coeficiente de Manning, se generó un nuevo campo en los archivos vectoriales en donde se incluyó el coeficiente de rugosidad N para cada uno de los tipos de cobertura vegetal y uso de suelo que se presentaban en la zona de estudio, estos valores fueron obtenidos con base en los trabajos de Chow (1959) y Sande, Jong & Roo (2003).

Debido a la necesidad de estimar los valores de rugosidad espacialmente distribuida con mayor resolución espacial, el proceso para la generación de la capa de valores de Manning en la zona urbana, fue más complejo, ya que requirió la implementación de un clasificador de superficies a partir de imágenes satelitales ópticas.

La clasificación de superficies se realizó mediante el algoritmo de *Maximum Likelihood Classification* (MLC), incluido dentro el software ArcMap de la paquetería ArcGIS 10.3. También conocido como clasificador Bayesiano, o clasificador de máxima verosimilitud en español, el MLC es un método de clasificación estadístico supervisado el cual se basa en dos principios, el teorema de Bayes para toma de

decisiones y la suposición de que la distribución de una muestra de clases presenta una distribución normal.

Para la implementación de este algoritmo se realizó un proceso de muestreo, en donde se asignaron puntos de entrenamiento según las clases en que se realizará la clasificación. En este trabajo, se propuso un total de cinco clases, las cuales son enlistadas en la Tabla 3.

Tabla 3. Clases incluidas en el muestreo que se realizó para el clasificador de superficies. En la columna derecha se muestran los valores de coeficiente de rugosidad de Manning para cada una de las clases.

Número de clase	Tipo de Superficie	Coeficiente de rugosidad N
1	Asfalto	0.012
2	Concreto	0.012
3	Suelo sin cobertura vegetal	0.03
4	Agricultura	0.035
5	Vegetación urbana	0.035

El producto satelital utilizado fue la imagen óptica multiespectral de la plataforma Sentinel-2B con clave L1C_T12RXP_A009176_20181208T180404 (Tabla 3), la cual cubre el total de la superficie sobre la que se encuentra la ciudad de Los Mochis.

Una vez realizada la corrección atmosférica y calibración radiométrica (proceso que será detallado los apartados siguientes), se concatenaron las tres bandas del espectro visible (*band 2 Blue, band 3 Green y band 4 Red*, las tres con una resolución espacial de 10 m) y se realizó una composición RGB. El muestreo se realizó generando un Shapefile de puntos para cada clase, y se crearon las firmas espectrales (proceso del software ArcMap en el que se realiza una serie de estadísticos con base en los valores de reflectancia obtenidos durante el muestreo para cada clase).

En el MLC, los píxeles del raster (composición RGB), son clasificados con base en la máxima verosimilitud que pueda tener con cualquiera de las clases, mediante la siguiente función de densidad de probabilidad (ecuación 40; Rajyalakshmi, Raju & Varma, 2016), la cual, como previamente se ha mencionado deriva de una

distribución normal (suposición del modelo), por lo que sus parámetros de ajuste son básicamente las medias y varianzas de cada clase.

$$L_k(X) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n Y_k}} \cdot e^{-\frac{(X-x_k)^2}{2 \cdot Y_k^2}} \quad (40)$$

Donde, $L_k(X)$ corresponde a verosimilitud de un pixel X perteneciente a una clase k , n es el número de clases, x_k representa el vector (recordando que se trata de una composición RGB, por lo que se tiene un vector 3 x 1 para cada clase) de valores medios para una clase k y Y_k corresponde a una matriz cuadrada (3 x 3) de varianzas y covarianzas para una clase k .

Hasta este punto la clasificación ya fue realizada asignando la pertenencia de cada perfil a una clase k con base en la máxima verosimilitud, sin embargo, la clasificación es reforzada cuando se aplica un enfoque de ponderación en la clasificación con base en el teorema de Bayes de toma de decisiones (ecuación 41), el cual se aplica en pixeles que se superponen estadísticamente entre dos clases, tal como se muestra en la Figura 27.

$$L_k = \frac{P(k) \cdot P(k|X)}{P(i) \cdot P(k|i)} \quad (41)$$

Donde, L_k corresponde a la verosimilitud de un pixel pertenezca a una clase k , $P(k)$ es la probabilidad *a priori* de la clase k , $P(k|X)$ la probabilidad condicional, la cual corresponde a la Función de Densidad de Probabilidad de pertenencia a una clase k (ecuación 40), $P(i)$ es la probabilidad de partencia con todas las clases (Probabilidad total) y $P(k|i)$ corresponde a la probabilidad un pixel pertenezca a una clase K , dado que se observa el vector de mediciones con que se crearon las firmas de cada clase, a esta probabilidad se le conoce como probabilidad *a posteriori*.

Para la aplicación del teorema de Bayes en el MLC, es necesario asignar valores de probabilidades *a priori* de entrada, sin embargo, para los efectos de este trabajo de investigación el teorema de Bayes no fue aplicado en el proceso de clasificación,

no obstante, el uso de probabilidades de entrada *a priori* ha demostrado mejorar la exactitud y robustez de la clasificación aplicado a datos remotamente censados. Para un análisis profundo acerca del uso de probabilidades *a priori* de entrada en MLC, se recomienda consultar el trabajo de Strahler (1980).

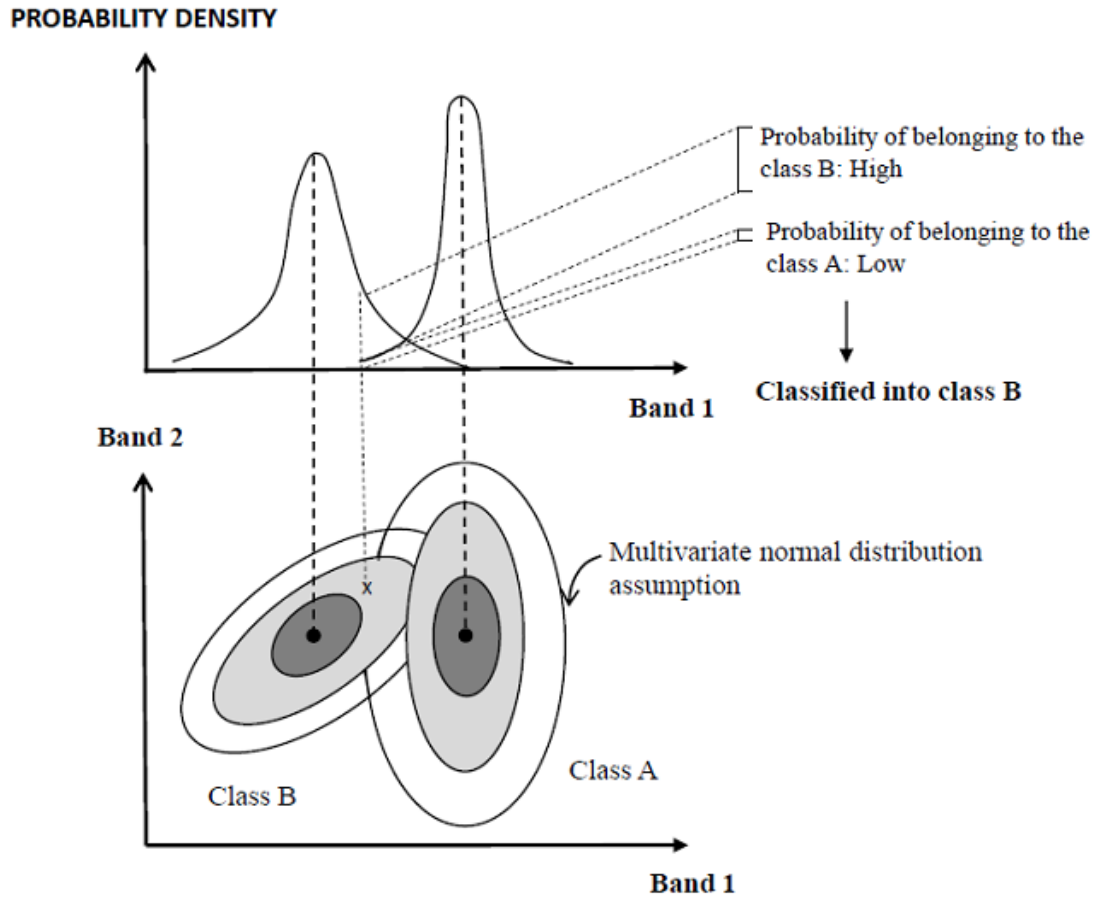


Figura 27. Superposición de distribuciones entre dos clases para un elemento X (un pixel), situación común en los clasificadores de máxima verosimilitud, el cual se soluciona implementado el teorema para toma de decisiones de Bayes. Los círculos concéntricos que aparecen en cada clase, se conocen como líneas de isoprobabilidad. Fuente: Valero Medina & Alzate Atehortúa (2019).

Una vez generado el raster de salida del proceso de MLC, este es convertido a formato vectorial, y al igual que en la capa de valores de rugosidad N de Manning del dominio de cuenca, se generó un campo adicional con los datos de rugosidad obtenidos de la literatura. El resultado de la clasificación se puede apreciar en la Figura 28, en la cual se identifican claramente las clases que fueron muestreadas para la generación de firmas espectrales (asfalto, concreto, terracería, vegetación y cultivos).

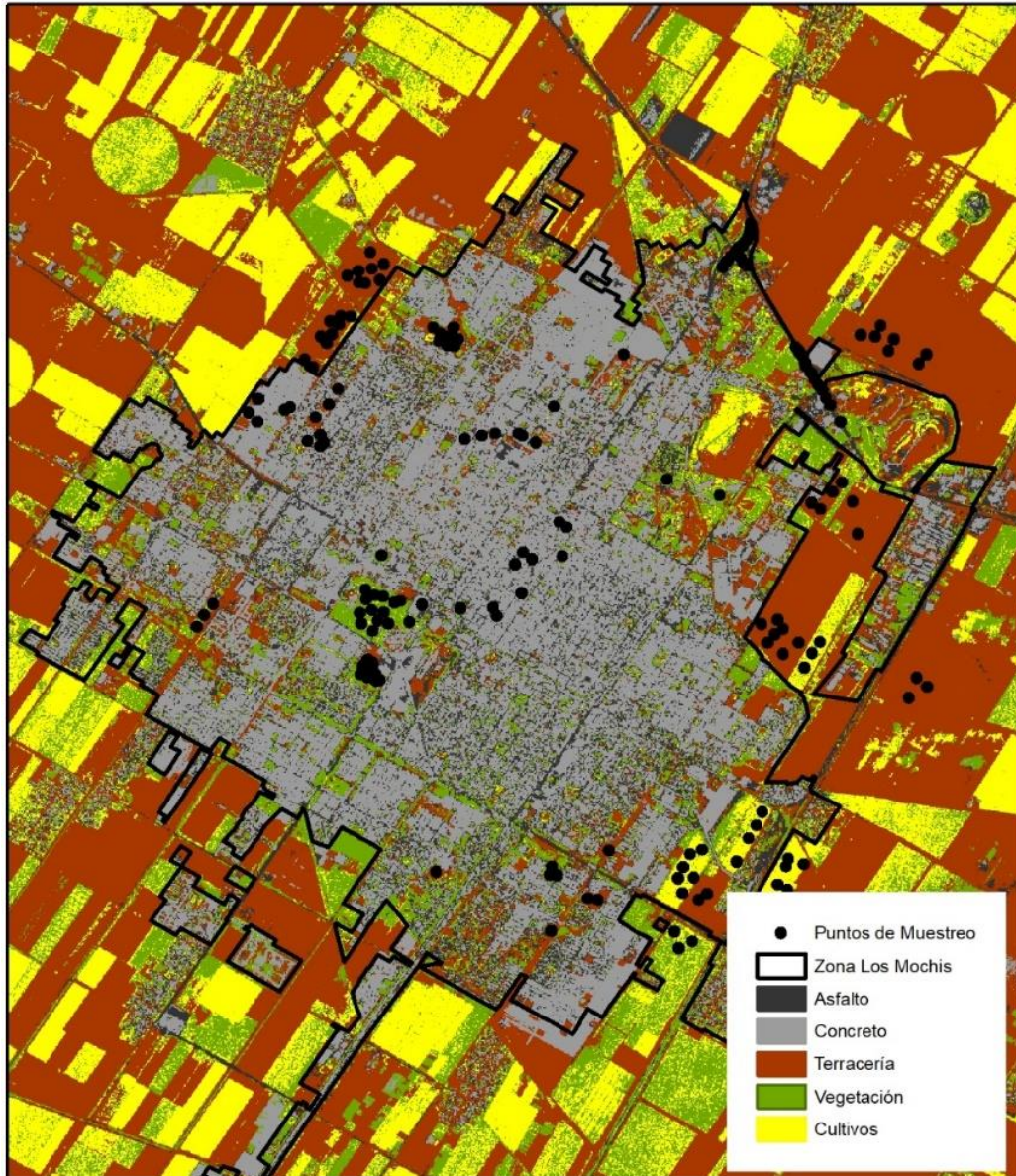


Figura 28. Raster de salida del proceso de clasificación con el algoritmo MLC. En la figura fueron incluidos el polígono de la zona urbana de la ciudad de Los Mochis, Sin (contorno negro) y los puntos de muestreo tomados para la generación de firma espectral para cada clase. Las clases generadas fueron para asfalto, concreto, suelo desnudo (terracería), vegetación (zonas con árboles y pasto) y zonas de cultivo.

4.4.3 Factores de Reducción de Área y Factores de Reducción de Anchura

Uno de los módulos más innovadores del modelo FLO-2D, es su capacidad para simular condiciones de flujo asociadas con la obstrucción por efecto de edificios, diques o bermas, mejorando notablemente el detalle de la simulación. Para alcanzar ese efecto se emplean los Factores de Reducción de Área (ARF) y los Factores de

Reducción de Anchura (WRF), los cuales pueden modificar almacenamiento de flujo en elementos de cada celda individual (FLO-2D Software Inc., 2017a).

Los valores de ARF reducen el volumen de almacenamiento en una celda dada con base en un coeficiente que va de 0 a 1, donde 1 corresponde al bloqueo total de la celda. Los valores WRF se utilizan para simular el bloqueo de flujo causado por muros o edificios. (Figura 29). Los WRF pueden asignarse a cualquiera de las ocho direcciones de flujo en un elemento de la cuadrícula y pueden obstruir parcial o completamente las rutas de flujo en las ocho direcciones según el valor del coeficiente asignado (Figura 29).

ARF = 0.20
WRF (NORTH) = 0.5
WRF (EAST) = 0.2
WRF (NE) = 1.0
WRF (SE) = 0.0

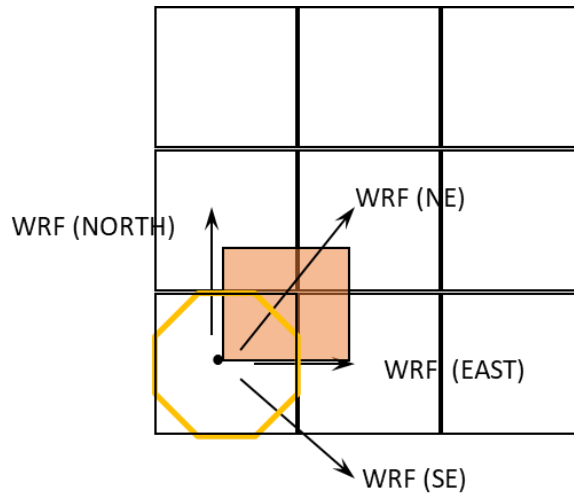


Figura 29. Esquematización del proceso de generación de valores ARF y WRF para la simular el efecto de un edificio.

Para este trabajo de investigación, el archivo ARF.DAT el cual contienen los valores ARF y WRF de cada una de las celdas, se generó de forma automática mediante el Plugin de QGIS. Para la esquematización de estos valores se utilizó un archivo *Shapefile* de calles y manzanas dentro de la zona urbana de Los Mochis (Figura 30).



Figura 30. Mapa de manzanas y calles dentro de la zona urbana de los Mochis usado para la generación de los valores ARF y WRF.

4.4.4. Red de Drenes y Canales

Como en apartados previos se ha mencionado, el comportamiento hidráulico de la ciudad Los Mochis, está fuertemente influenciado por su infraestructura hidráulica. El modelo FLO-2D por su parte, cuenta con un módulo para la simulación de infraestructura hidráulica y superficial, sin embargo, algunas funciones del software, se han visto afectadas debido a actualizaciones recientes, tal es el caso del módulo para la generación de infraestructura hidráulica, que a la actualidad solo es posible incluir atributos estructurales como canales a través de softwares de hidrología compatibles, siendo HEC-RAS el ejemplo más común.

Debido a estas complicaciones, la modelación del efecto de la infraestructura en la simulación de inundaciones, ha sido excluida del alcance general de este trabajo de investigación, no obstante, una profunda y detallada caracterización de los componentes que conforman la red de canales, drenes y colectores pluviales (sección 3.7 Infraestructura hidráulica) ha sido realizada para su integración en el modelo hidrológico en la siguiente etapa de esta investigación.

Para la incorporación de infraestructura hidráulica al modelo, primeramente, se caracterizó la red de canales y drenes identificando las dimensiones y atributos del canal, confluencias e infraestructuras hidráulicas conectoras (alcantarillas). Con esta información, se generó un inventario de drenes y canales que atraviesan la ciudad de Los Mochis y se realizó un mapa identificando cada estructura (Figura 11).

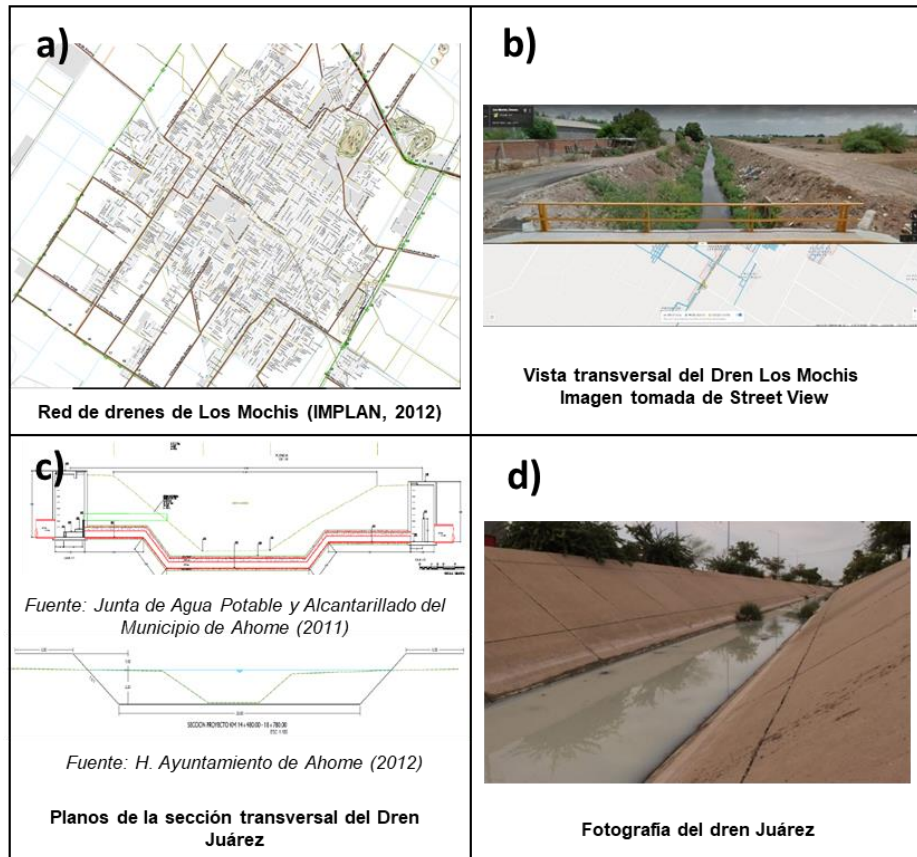


Figura 31. Ejemplos de las principales fuentes de información a partir de las cuales se caracterizó la red de drenes y canales, en estas se incluyen a) mapas de red de canales y drenes emitidos por IMPLAN (2012a, 2012b), b) imágenes capturadas a través de Street View, c) planos y especificaciones técnicas recolectados en Manifestaciones de Impacto Ambiental, archivos gubernamentales y proyectos hidráulicos y d) fotografías recuperadas de diversos sitios de la web (medios informativos, portales educativos, etc).

Las fuentes de información para la generación de la red de drenes y canales consistieron en documentos de proyectos hidráulicos, manifestaciones de impacto ambiental (H. Ayuntamiento de Ahome, 2012a; Junta de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Ahome, 2011; Toledo González, 2012), el Plan

Operativo de Inundaciones de la Ciudad de Los Mochis, Sinaloa (Organismo de Cuenca Pacífico Norte de la CONAGUA & SEMARNAT, 2016), material generado por IMPLAN Ahome (IMPLAN, 2012b, 2012c, 2012d), fotografías y una colección de imágenes obtenidas a través del servicio de Google Satellite, Street View recolectadas para la zona de estudio (Figura 31).

La integración de los datos de infraestructura al modelo se consigue a través de un proceso de esquematización en el cual se trazan las márgenes del canal junto con las secciones transversales, las cuales son interpoladas por el módulo de canales del modelo y finalmente, se le asignan condiciones iniciales como la altura de flujo o en caso de contar con registros hidrométricos un hidrograma de entrada (FLO-2D Software Inc., 2017a).

Para este estudio, se consideró una geometría trapezoidal en los drenes y canales presentes en la red hidráulica (Figura 32). En ese sentido, la información requerida para la generación de las secciones transversales fue; forma (trapezoidal, rectangular o natural), coeficiente de rugosidad, elevación de margen izquierda y derecha, talud izquierdo y derecho (Z), base de fondo (b) y superior (T) y altura de flujo (y ; Figura 32).

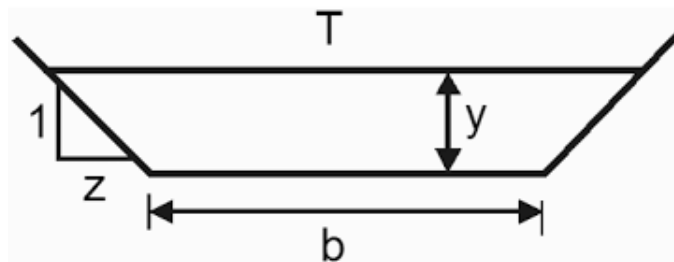


Figura 32. Estructura básica de canal trapezoidal con sus componentes, talud (Z), base de fondo (b), base superior (T) y altura de flujo (T).

Una potente herramienta incluida en la paquetería de FLO-2D es la aplicación PROFILES.EXE (FLO-2D Software Inc., 2017a), la cual se aplica sobre canales o cualquier flujo conducido no confinado, con el fin de analizar si cumple con la condición de un gradiente topográfico de canal en descenso. Esto es importante, ya que, al interpolar los canales, estos pueden tomar en cuenta la elevación de

elementos aledaños a las celdas del flujo como casas o edificios y presentar pendientes negativas, es por esa razón, que durante la generación y esquematización de la red hidráulica se revisaron constantemente los perfiles de canal.

4.4.5 Infraestructuras hidráulicas

En FLO-2D las estructuras hidráulicas pueden incluir puentes, alcantarillas, vertederos, o cualquier instalación hidráulica que controle el transporte de flujo a través de los elementos de la malla, a pesar de que estos no sean contiguos. Para simular las estructuras hidráulicas, se debe especificar las curvas de descarga (*Rating Curve*), tablas de descarga (*Rating Table*), o la ecuación de alcantarilla (*Culvert Equation*). Ante la carencia de registros del flujo que atraviesa por la alcantarilla, se optó por la opción de *Culvert Equation*, ya que esta se deriva exclusivamente de algunas especificaciones técnicas de la estructura.

En primer lugar, se debe especificar el tipo de alcantarilla (si es de caja o circular), tipo de entrada (con muros de ala, con o sin inclinación; Figura 33f, proyectada; Figuras 33a y 33c, con cabecera; Figuras 33b, 33d y 33e, etc.), coeficiente de rugosidad de la alcantarilla, el coeficiente de pérdida de entrada (Schall, Thompson, Zerges, Kilgore & Morris, 2012) altura y anchura de la estructura o diámetro si es circular y longitud de la estructura.

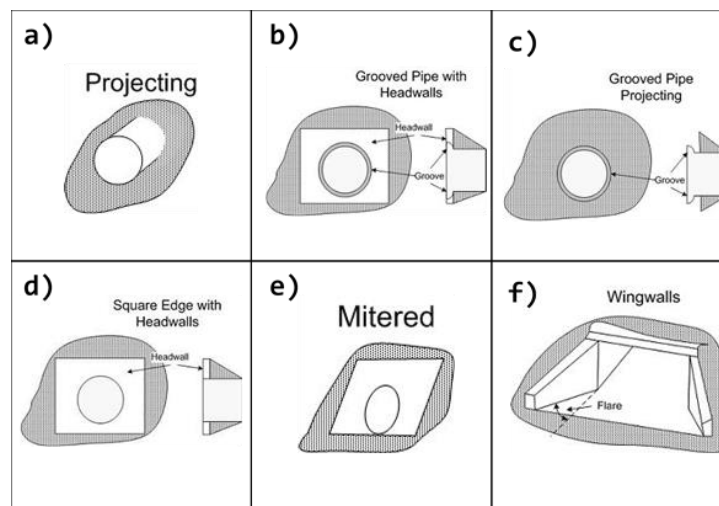


Figura 33. Ejemplos de tipos de entrada de alcantarillas. Fuente: Schall *et al.* (2012).

Al igual que con la red de drenes y canales, se generó un inventario de estructuras hidráulicas encontradas en la zona de estudio, teniendo alcantarillas de caja y de tubería (Figura 34), las cuales tienen como propósito, la construcción de puentes vehiculares sobre los canales y drenes, aunque también se encontraron sifones que permiten el flujo de canales que se intersectan sin confluir.

La esquematización de las infraestructuras se realizó conectando con una línea las secciones del canal y especificando los valores necesarios para la generación de la *Culvert Equation*.



Figura 34. Ejemplos de tipos de alcantarilla en la zona de estudio. Alcantarilla de caja (a: recuperado de Street View; agosto 2015) y alcantarilla de tubería triple (b; López, 2018) en el Dren Álamo, Los Mochis.

4.5 Información satelital

En apartados previos, se ha hablado de las propiedades diferentes que ofrecen los productos satelitales ópticos multiespectrales y de RADAR obtenidos mediante técnicas de percepción remota, así como su empleo en la modelación de

inundaciones (Alberto Refice *et al.*, 2018). En ese sentido, en el presente trabajo de investigación se hace uso de estos dos tipos de información satelital, con el fin de robustecer la metodología propuesta aprovechando las propiedades y ventajas que cada uno ofrece.

Las imágenes satelitales utilizadas en este trabajo fueron obtenidas de las plataformas Sentinel 1 (Imágenes RADAR) y Sentinel 2 (Imágenes ópticas multiespectrales), dichos productos satelitales fueron seleccionados con base en su disponibilidad y resolución espacial.

4.5.1 Adquisición datos Sentinel 1 y Sentinel 2

Los satélites Sentinel 1 y Sentinel 2 forman parte del programa *Copernicus*, un proyecto dirigido conjuntamente por la Agencia Espacial Europea (ESA) y por la Unión Europea (UE) a través de la Agencia Europea de Medio Ambiente (ESA, 2019). El programa *Copernicus* tiene como principal objetivo, la observación y monitoreo de diversos aspectos de la tierra a través de sus seis misiones: Sentinel 1 para el monitoreo de tierra y océanos con imágenes de RADAR, Sentinel 2 para el monitoreo de tierra con sensores ópticos, Sentinel 3 para servicios globales de vigilancia terrestre, atmosférica, gestión de emergencias y seguridad de la Criósfera, Sentinel 4 y 5 para calidad de aire y Sentinel 6 para topografía del mar, oceanografía y estudios climáticos (Donezar Hoyos *et al.*, 2017).

Para la elaboración de este trabajo, se emplearon imágenes satelitales Sentinel 1 y Sentinel 2 para diversos fines. La plataforma Sentinel-2 cuenta con un Instrumento multiespectral (MSI) con 13 bandas espectrales que abarcan desde el visible y el infrarrojo cercano hasta el infrarrojo de onda corta y su resolución espacial varía entre los 10 a 60 m según la banda espectral, con un campo de visión de 290 km (Drusch *et al.*, 2012), el tiempo de revisita es de 5 días.

Por su parte, las imágenes de RADAR Sentinel 1 según su modo de adquisición (diferentes configuraciones en la trayectoria del haz del satélite generan diferentes formas de escaneo; *beam mode*) se dividen en *Stripmap (SM) Mode*, *Interferometric*

Wide swath (IW) Mode, Extra-Wide swath (EW) Mode y Wave (WV) Mode (Figura 35). La resolución espacial, el área de barrido, así como las polarizaciones disponibles, dependen del modo de adquisición. En su nivel de pre-procesamiento 1 (productos generalmente disponibles para la mayoría de los usuarios; ESA, 2019) se tienen dos tipos de productos SAR, las imágenes *Single Look Complex (SLC)* y las imágenes *Ground Range Detected (GRD)*. La principal diferencia entre este tipo de productos, es que las imágenes SLC contienen el ancho de banda de la señal de transmisión completa, conservando la información de fase, a diferencia de los productos GRD en las cuales se sacrifica la información de fase con el fin de aumentar la resolución espacial de la imagen (ESA, 2019). Es por ese motivo, que las imágenes SLC se emplean en trabajos de Interferometría diferencial (Veci, 2015b), mientras que los productos GRD son usados usualmente en otro tipo de técnicas como la polarimetría (Veci, 2015a). El tiempo de revisita de este satélite es de 6 días.

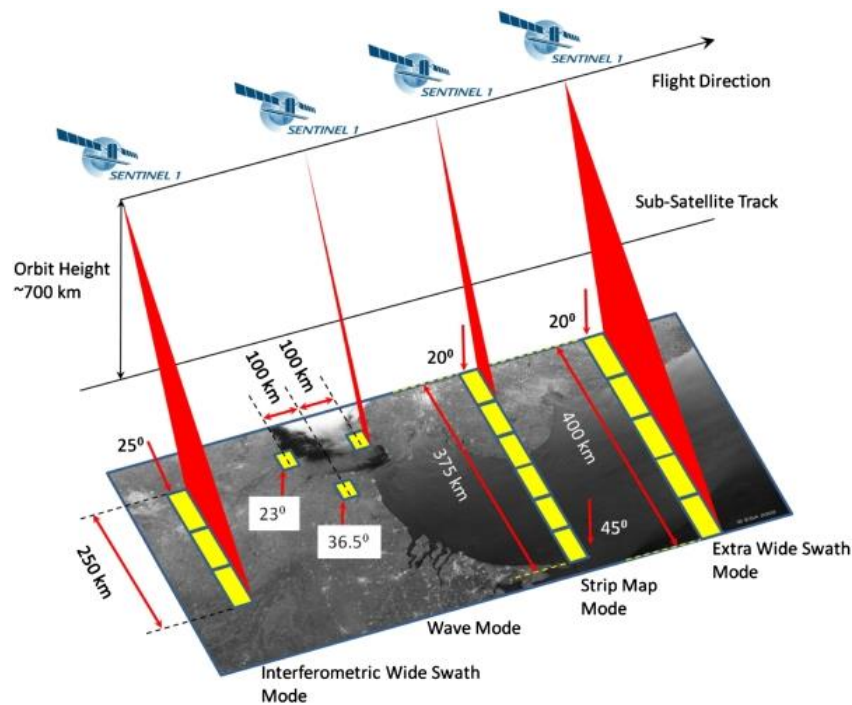


Figura 35. Modos de adquisición de productos Sentinel 1. Fuente: ESA (2019).

En la Tabla 4 se muestra el set de imágenes ópticas multiespectrales y de RADAR de las misiones Sentinel 1 y 2 utilizadas en este trabajo. Una aclaración importante,

es que, para este trabajo de investigación en las imágenes Sentinel 2, solo se utilizaron las bandas del espectro visible (Banda 2 *Blue*, Banda 3 *Green*, Banda 4 *Red*) las cuales cuentan con una resolución espacial de 10 metros (Congedo, 2016).

Tabla 4. Productos satelitales utilizados en este trabajo de investigación

Platform	Acquisition Date	Product Type	TileNumber/Path_Frame	Function
Sentinel-2B	08-12-2018	MSIL1C	T12RXP	Classification
Sentinel-2A	21-09-2018	MSIL1C	T12RXP	Thresholding
Sentinel-2B	19-09-2018	MSIL1C	T12RXP	Thresholding
Sentinel-1B	22-09-2018	IW_GRDH	20_77	Thresholding

4.5.2 Correcciones y preprocesamiento

En sus niveles de pre-procesamiento más bajos, los productos satelitales requieren de un pre-procesamiento en el cual se corrijan las interferencias con la atmosfera (corrección atmosférica) o por el terreno (corrección geométrica) y se transformen los números digitales en que el satélite almacena la información censada, a valores físicos de reflectancia (sensores ópticos) o decibeles (imágenes de RADAR). La Figura 36 esquematiza el proceso de corrección y preprocesamiento de las imágenes provenientes de la plataforma Sentinel 1 y 2. Para el pre-procesamiento de las imágenes Sentinel 1 se empleó el software ESA-SNAP 6.0 con el *SENTINEL-1 Toolbox* (ESA, 2019), y para las imágenes Sentinel 2 se empelo el *Semi-Automatic Classification Plugin Versión 6.2.0.1* (Congedo, 2016) para QGIS 3.6.3.

El pre-procesamiento de las imágenes Sentinel-2 comienza cuando se cargan las bandas de interés en el *Plugin* de QGIS, en este caso el set de bandas del espectro visible (RGB). A diferencia de otros productos satelitales ópticos, (e.g., Landsat) las imágenes Sentinel-2 se proveen directamente en Reflectancia en el Techo de la Atmósfera (TOA) escalado, lo cual permite su conversión en Reflectancia TOA de forma sencilla, utilizando el Valor de Discretización provisto en el *Metada* del producto (Congedo, 2016). Para transformar los valores de Reflectancia TOA a Reflectancia de Superficie, se emplea el método de Moran, Jackson, Slater & Teillet (1992) el cual incluye algunos términos relacionados a la transmitancia atmosférica,

efecto de la bruma, etc. Para la corrección atmosférica el *Plugin* utiliza en método *Dark Object Substraction* de Chavez & others (1996) en el cual se ajustan los valores de los píxeles de la imagen con base en la selección de objetos oscuros los cuales tienen la propiedad de absorber la radiación incidente. Al termino del pre-procesamiento, se compilaron las bandas en una solo imagen (composición RGB) en formato GeoTiff, la cual se exporto al software Matlab versión R2015A para la delimitación de cuerpos de agua (zonas inundadas) y a ArcGIS para la generación del mapa de coberturas, el cual ha sido descrito en apartados previos.

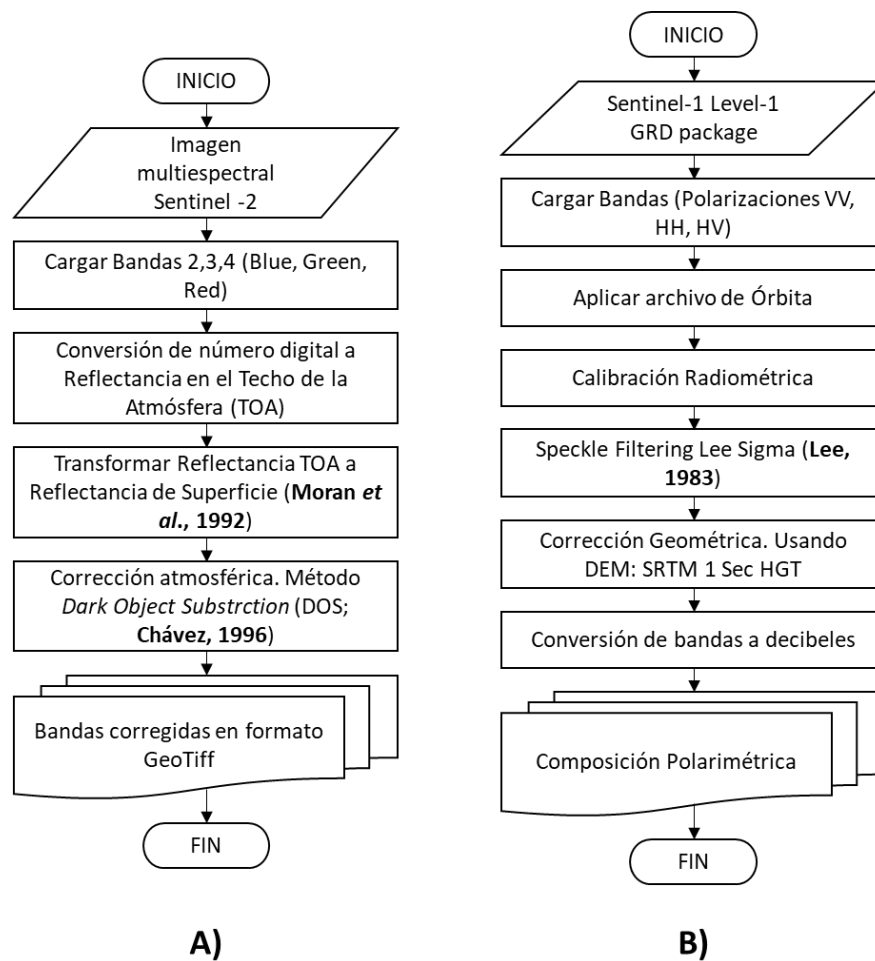


Figura 36. Diagramas de flujo para el pre-procesamiento de las imágenes multiespectrales Sentinel-2 (A) y las imágenes SAR Sentinel-1 (B).

Para el procesamiento de la imagen SAR, se carga el paquete (en este caso GRD de alta resolución; ver ESA, 2019) en el software SNAP. El paquete seleccionado en este trabajo se obtuvo por un *beam mode* IW y tiene una polarización DV (Dual

vertical VV/VH; ESA, 2019). Posteriormente, se creó un subconjunto del paquete (*i.e.* reducir el dominio del producto satelital seleccionando el rango de interés) con el fin de optimizar y reducir tiempo de computo. Posteriormente se aplicó el archivo de órbita. Este es un paso es de vital importancia y se debe hacer antes de cualquier otro proceso, ya que, calcular los datos de órbita precisos lleva tiempo, por lo que los datos de órbita no se incluyen en muchos paquetes de datos de satélite SAR. A continuación, se realizó la corrección radiométrica con el fin de transformar los números digitales de la imagen en datos de retrodispersión del radar de la superficie reflectante. Las correcciones que se aplican durante la calibración son específicas de la misión, por lo tanto, el software ESA-SNAP determinará de forma automática, que correcciones deben aplicarse con base en el *metadata* de la imagen (Veci, 2015a).

El siguiente proceso está relacionado con el efecto *Speckle* (efecto de moteado). Un tipo ruido granular, que se debe a la superposición de las señales reflejadas por muchos dispersores elementales pequeños (aquellos con una dimensión comparable a la longitud de onda del radar; Ferretti, Monti-Guarnieri, Prati, Rocca & Massonet, 2007) También conocido como ruido de escena, el efecto *Speckle* complica el problema de interpretación de la imagen al reducir la efectividad de la segmentación y clasificación de la imagen. No obstante, en la actualidad, existe una amplia gama de métodos y filtros a través de los cuales es posible reducir este tipo de ruido (J. S. Lee, Jurkevich, Dewaele, Wambacq & Oosterlinck, 1994). En ese sentido, en este trabajo se utilizó el filtro Lee-Sigma, propuesto por Lee (1983) el cual suaviza el ruido de la imagen promediando solo aquellos píxeles de vecindad que tienen las intensidades dentro de un rango Sigma fijo del píxel central.

Para la corrección de las distorsiones geométricas generadas por el efecto del terreno y la geometría propia del sensor, se realizó la corrección geométrica utilizando un DEM SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) a 1 seg, el cual fue provisto por el software SNAP, el cual tiene precargados estos archivos para la corrección geométrica de los productos Sentinel-1 (ESA, 2019). Una vez corregida y calibrada la imagen de RADAR, se realizó un ajuste de intensidad en los datos de

retrodispersión, modificando la escala de información de lineal a decibeles o dicho de otra forma a escala logarítmica. Esto con el fin de ajustar la intensidad de la imagen y apreciar la información que contiene.

4.5.3 Umbralización

El proceso de Umbralización mejor conocido como *Thresholding*, es el método más simple de segmentación de imágenes, en el cual se busca convertir una imagen en escala de grises (e.g., la banda espectral de una imagen multispectral o la banda polarimétrica de una imagen SAR) a una nueva con dos niveles de información (imagen binarizada; Shapiro & Stockman, 2002). Una imagen binarizada tiene dos tipos de píxeles, los pertenecientes al atributo que desea segmentarse de la imagen (un tipo de superficie u objeto) a los cuales suele asignárseles un valor entero positivo, más comúnmente el número 1, y los píxeles de fondo, los cuales contienen el resto de elementos de la imagen discriminados a los cuales comúnmente se les asigna como valor el 0 o ausencia de dato (*No DATA*).

El proceso de umbralización requiere de una búsqueda de los elementos de la imagen que se encuentren dentro de un rango especificado entre un límite inferior y uno superior (umbrales). Dichos elementos serán sustituidos por el valor verdadero o 1, el resto de elementos de la imagen se sustituirán por 0 o *No DATA*.

En trabajos de investigación donde se aplica la técnica *Thresholding* para la delimitación de zonas anegadas, se aprovechan las propiedades reflectivas especulares del agua, elemento que puede ser fácilmente identificable tanto en imágenes ópticas (Verpoorter, Kutser & Tranvik, 2012), como en productos SAR (Shen *et al.*, 2019) a través de esta técnica.

El proceso de *Thresholding* para las imágenes de Sentinel-2A se realizó con el software Matlab versión R2015A, se seleccionó la banda B3 (*Green Peak*) para la generación de máscara de zonas inundadas, debido a que en esta banda el rango de reflectancia en la que se expresa el agua turbia (asociada a agua de inundación) es mayor (Figura 37). A continuación, se muestra un fragmento de código en el cual

se puede apreciar el proceso de *Thresholding*. En la primera línea se hace una búsqueda de todos los elementos que se encuentren en un rango de reflectancia entre 7% y 8.5% en la banda 3 (denominada como Imagen), posteriormente se genera una matriz de ceros del tamaño de matriz de la banda, después los valores encontrados en el rango de umbralización (asociados a zonas inundadas) se copian en la matriz de ceros (variable mapa) y se les asigna el valor 1. Finalmente, se le asigna el nombre de variable Mask_agua a la imagen umbralizada final.

```

AguaInundacion_Firma=find(Imagen(:, :)>=.07&(Imagen(:, :)<=.085));
mapa=zeros(M,N);
mapa( AguaInundacion_Firma)=1;
Mask_agua=mapa;

```

Para el rango de los umbrales se tomó la intersección del ancho de la banda 3 de la plataforma Sentinel-2 (resolución espectral de la banda 3 de Sentinel-2A MSI: 543nm-578nm; Figura 37) con la firma espectral del agua turbia según el trabajo de Malinowski, Groom, Schwanghart & Heckrath (2015).

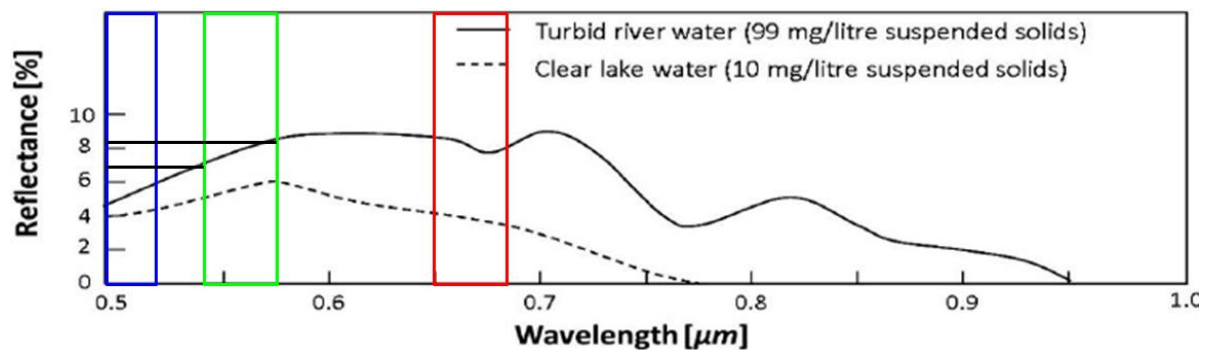


Figura 37. Firma espectral del agua clara de un río en comparación con el agua turbia de un río con una concentración de 99 mg/l sólidos suspendidos, la cual presenta características espectrales similares al agua presente en zonas inundadas. Las barras de color azul, verde y roja, representan la resolución espectral de las bandas del espectro visible del sensor Sentinel-2A MSI. Fuente: Malinowski *et al.* (2015).

Para la imagen de RADAR, el procedimiento fue similar, a diferencia que este se realizó en el software ESA-SNAP. Para generación de la máscara de zonas inundadas, se empleó la calculadora de Rasters incluida en el software, y se realizó el proceso de umbralización con los límites -22 a -20 decibeles, que es donde se

manifiesta el agua en imágenes SAR. El comando para la generación de máscara se muestra a continuación.

```
if Sigma0_VH_db>-22 and Sigma0_VH_db<-20 then 1 else NaN
```

Aquí se usa la función booleana “if @ then @ else @”, compuesto por el condicional “if” el cual declara el inicio de la sentencia, posteriormente con “then” se indica el valor verdadero, en este caso 1 el cual será asignado a todos los elementos que se encuentren dentro del rango de umbralización (píxeles asociados a zonas inundadas), los valores que no se encuentren dentro de ese rango con “else” se les asignará un valor nulo (NaN). La banda que se utilizó fue la correspondiente a la polarización VH debido a su histograma abarcaba el rango bajo el cual es detectable los cuerpos de agua.

Capítulo 5. Discusión y resultados

5.1. Identificación de zonas inundadas con productos satelitales ópticos

Para la identificación de zonas inundadas a través de productos satelitales ópticos, se procesaron imágenes provenientes de la plataforma Sentinel-2A (Tabla 4) utilizando una imagen obtenida durante la tormenta tropical 19-E y otra posterior al evento (Figura 38).

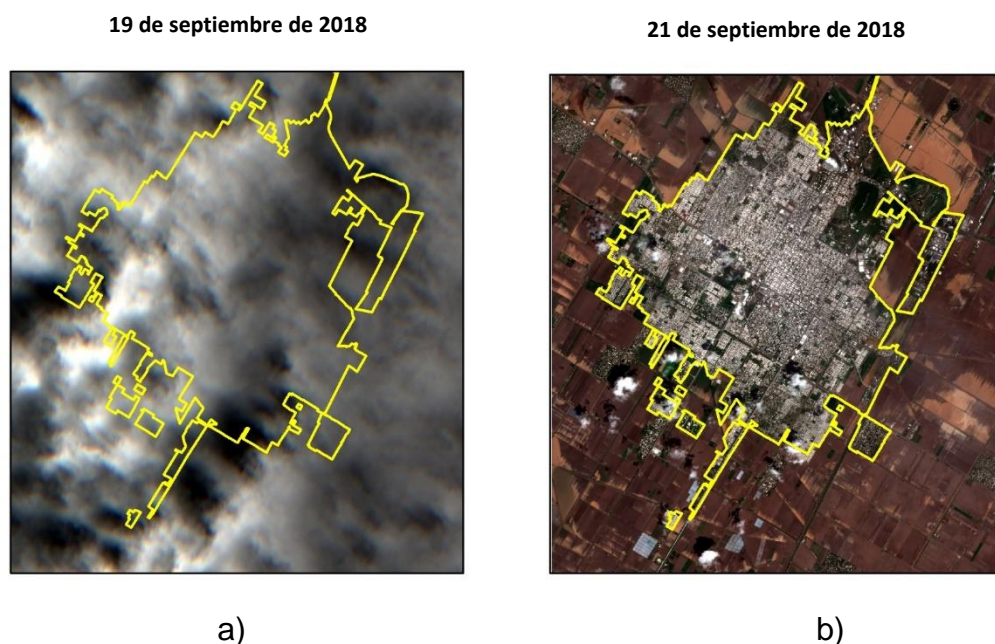


Figura 38. Composición RGB de Los Mochis Sinaloa, obtenida a través de imágenes Satelitales ópticas de la plataforma SENTINEL-2A durante los días 19 y 21 de septiembre de 2018

Como se puede apreciar en la Figura 38a, los productos satelitales están particularmente limitados en este tipo de análisis debido a la intensa nubosidad que comúnmente se presenta en eventos importantes de precipitación debido a la actividad convectiva de la atmósfera (Shen *et al.*, 2019). No obstante, su utilización es una importante fuente de información para la identificación de áreas inundadas cuando se dispone de imágenes con buena calidad de datos.

Para el estudio del evento extremo que se presentó en la zona de estudio, se empleó una imagen satelital obtenida el 21 de septiembre de 2019. Posterior al procesamiento de la imagen y el filtrado *Thresholding*, se generó una máscara para

la identificación y delimitación de zonas cubiertas por agua en la zona de estudio, la cual se puede apreciar en la Figura 39. Es notorio, el hecho de que el filtro permite también identificar la presencia de zonas de saturación y anegamiento en las áreas de cultivo ubicadas en la periferia de la ciudad, esto último se debe en gran parte a los rangos de reflectancia empleados para la identificación de superficies cubiertas de agua con un alto grado de turbidez y la presencia de altas concentraciones de sólidos suspendidos comunes en flujos de inundación (Malinowski *et al.*, 2015). No obstante, dentro de la mancha urbana se identifican zonas cubiertas por agua principalmente en las cercanías del Canal Sublateral 23+700 (13) y la intersección entre el Dren Álamo y el Dren Juárez poniendo así de manifiesto el riesgo por inundación latente en la zona de estudio vinculada a la disposición estado de su infraestructura hidráulica (El Debate, 2018d, 2018d; H. Ayuntamiento de Ahome, 2012b; IMPLAN, 2012a).

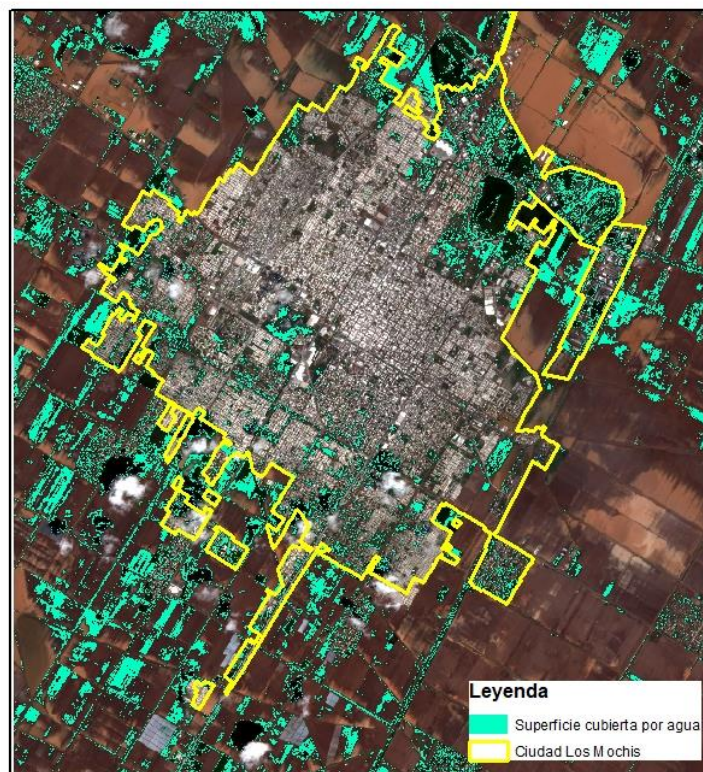


Figura 39. Vista área de Los Mochis Sinaloa durante el 21 de septiembre de 2019. En azul se aprecian las zonas cubiertas por agua como producto la tormenta tropical 19-E estimadas a través de técnicas de percepción remota pasiva.

5.2. Identificación de zonas de inundación con imágenes de RADAR

Al igual que con los productos satelitales ópticos, se aplicó una técnica de umbralización para delimitar zonas con presencia de agua en la imagen de RADAR, obtenida por la plataforma SENTINEL-1 el día 22 de septiembre de 2018.

En la Figura 40 se puede apreciar el resultado de la identificación y la delimitación de áreas anegadas durante el día 22 de septiembre de 2018, se observan importantes similitudes con las áreas determinadas a través de productos satelitales ópticos, incluyendo la capacidad de identificar zonas de saturación en áreas de cultivo.

Por otro lado, es posible notar una disminución importante de flujo en el interior de la mancha urbana, lo cual podría explicarse en gran medida por la cantidad de tiempo transcurrido posterior al evento de inundación (19 y 20 de septiembre).

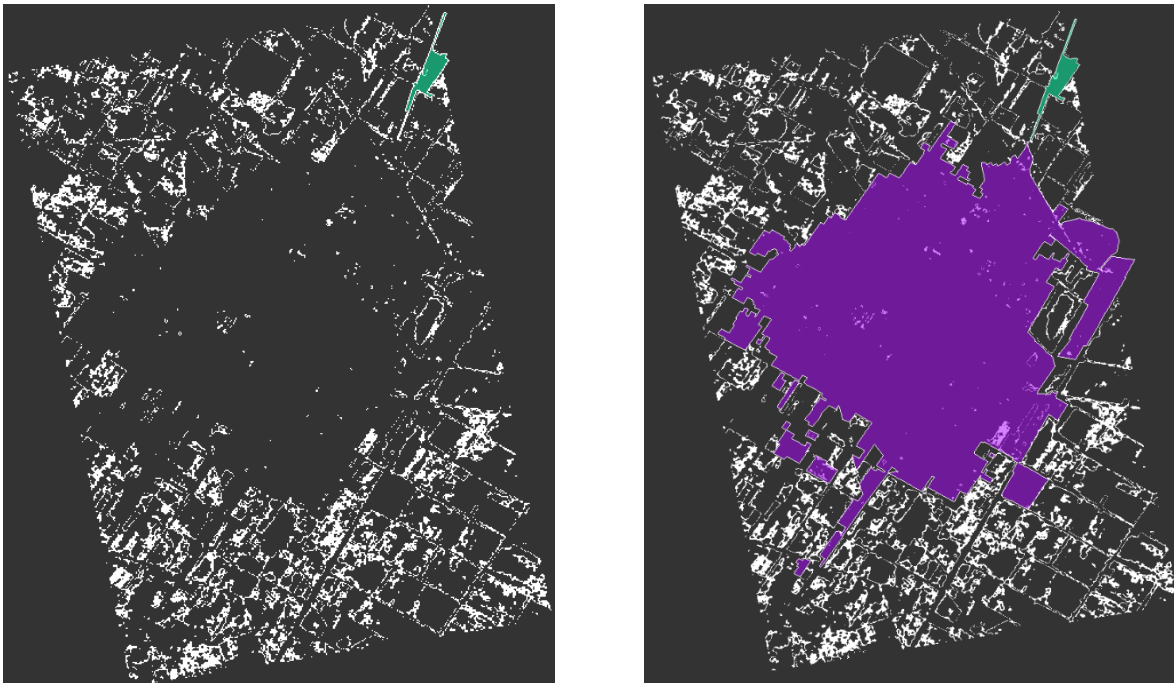


Figura 40. Mascara para la identificación de zonas cubiertas por agua (blanco) en Los Mochis Sinaloa (polígono morado) durante el 22 de septiembre de 2019. a través de técnicas de percepción remota activa

Desafortunadamente, al igual que con los productos satelitales multiespectrales, la principal limitante de los sistemas activos, es la resolución temporal con que la

plataforma registra datos en un área de terminada. Es por esa razón, que los trabajos de investigación integrales aplicados a la hidrología donde se incluyen diversas fuentes de información tales como las imágenes satelitales y de RADAR son cada vez más comunes (Domeneghetti *et al.*, 2019; Alberto Refice *et al.*, 2018; Teng *et al.*, 2017b).

Existen diversas áreas de oportunidad en este trabajo de investigación respecto al tema del uso de sistemas SAR, desde el uso de técnicas adicionales (*e.g.*, polarimetría o interferometría diferencial) hasta el uso de otras plataformas. Por lo que se sugiere ampliamente una exploración más detallada de estos sistemas en trabajos futuros para esta zona de estudio en particular.

5.3. Simulación numérica de inundaciones con el modelo FLO-2D

Los resultados obtenidos a través del modelo hidrológico-hidráulico FLO-2D consisten en archivos ASCII espacialmente distribuidos en una malla que se generó usando un modelo de elevación como capa base, para cada uno de los dominios espaciales descritos en la sección 4.4.1 de este documento de investigación. Durante la etapa de *post* procesamiento, los archivos fueron exportados a un Sistema de Información Geográfica para ser graficados y representados a través de mapas. El set de resultados está conformado por los archivos de salida: DEPTH.OUT: archivo que contiene la profundidad de flujo máxima registrada en metros durante la simulación numérica FINALDEP: la profundidad de flujo al final de la simulación (en metros), VELFP: velocidad de flujo máxima, registrada en la llanura de inundación durante la simulación (en ms^{-1}) y FINALVEL: velocidad de flujo final registrada en la llanura de inundación al final la simulación (en ms^{-1}). El set de resultados de la simulación se describe en la Tabla 5.

Es importante mencionar, que debido a limitaciones prácticas y con el fin de reducir costos computacionales, se han acotado algunos componentes del modelo hidrológico. Por ejemplo, el módulo de infiltración incluido en el modelo FLO-2D,

basado en la ecuación de Green-Ampt (Green & Ampt, 1911), así como el módulo de evaporación que en un inicio se presupuestaban ser incluidos en la simulación, fueron descartados debido la relación costo-beneficio que había entre los tiempos de simulación y cálculo de estas variables, con la poca influencia que tienen en escenarios de inundación de poca duración.

Tabla 5. Set de experimentos para simulación de inundaciones

Dominio	Resol. espacial	Evento	Duración de evento	Datos
C. RH10Fb	30 x 30 m	DT 19-E	40 hrs	Amax, Afin, Vmax, Vfin
Los Mochis	10 x 10 m	DT 19-E	40 hrs	Amax, Afin, Vmax, Vfin
Los Mochis	10 x 10 m	Tr: 2 años	2 hrs	Amax, Afin, Vmax, Vfin
Los Mochis	10 x 10 m	Tr: 2 años	3 hrs	Amax, Afin, Vmax, Vfin
Los Mochis	10 x 10 m	Tr: 2 años	6 hrs	Amax, Afin, Vmax, Vfin
Los Mochis	10 x 10 m	Tr: 10 años	2 hrs	Amax, Afin, Vmax, Vfin
Los Mochis	10 x 10 m	Tr: 10 años	3 hrs	Amax, Afin, Vmax, Vfin
Los Mochis	10 x 10 m	Tr: 10 años	6 hrs	Amax, Afin, Vmax, Vfin
Los Mochis	10 x 10 m	Tr: 100 años	2 hrs	Amax, Afin, Vmax, Vfin
Los Mochis	10 x 10 m	Tr: 100 años	3 hrs	Amax, Afin, Vmax, Vfin
Los Mochis	10 x 10 m	Tr: 100 años	6 hrs	Amax, Afin, Vmax, Vfin

Notas: *DT 19-E: Depresión tropical 19-E, *Tr: Periodo de Retorno para escenario *Amax: Altura de flujo máxima, *Afin: Altura de flujo final, *Vmax: velocidad máxima de flujo, *Vfin: velocidad de flujo final

Por otro lado, el componente de infraestructura hidráulica, el cual tiene gran influencia en la zona de estudio, no ha sido incluido en las simulaciones generadas para este trabajo de investigación, debido a limitantes técnicas, así como a defectos en módulos específicos para la esquematización de infraestructura en la malla de entrada. Sin embargo, la integración de esta componente ha sido incluida dentro de los alcances y objetivos para trabajo futuro que será descrito en apartados posteriores.

Los eventos de simulación fueron ejecutados en una computadora de escritorio de rendimiento intermedio. Las principales características son: 32 Gb de RAM, procesador i7, tarjeta gráfica básica.

5.3.1 Resultados de la simulación de la Depresión Tropical 19-E: Nivel Cuenca

Con el fin de validar la metodología propuesta en esta investigación, se tomó como evento de referencia la Depresión Tropical 19-E la cual se presentó durante los días 19 y de 20 de noviembre en diversas ciudades del Noreste del país (Cabrera Martínez, 2018a, 2018b; El Debate, 2018b, 2018d), a través de los datos recabados en la estación Camajoa (Figura 18).

En la Figura 41 es posible apreciar la máxima altura de flujo simulada durante el evento de precipitación en la cuenca de estudio (Sistema RH10Fb). A pesar de que casi en su totalidad, el flujo no supera los 50 cm, se puede encontrar zonas dispersas con una mayor profundidad de flujo, sin embargo, no se observa algún patrón de escurrimiento en el sistema que permita inferir una aportación de flujo a la zona urbana de los Mochis.

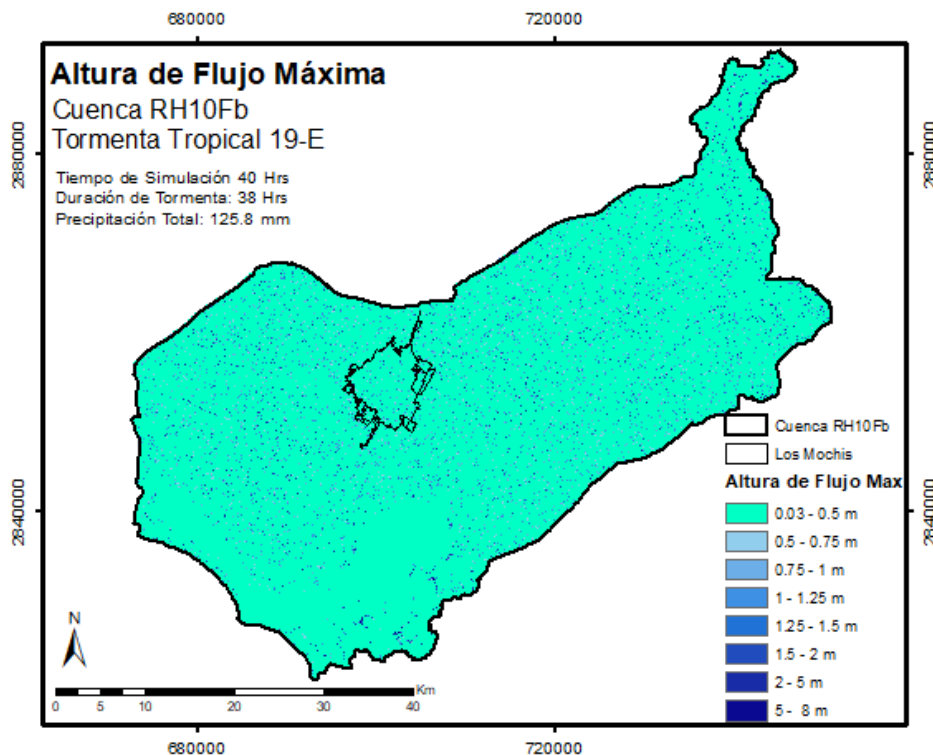


Figura 41. Altura de Flujo Máxima registrada durante la simulación del evento: Tormenta Tropical 19-E en la subcuenca RH10Fb

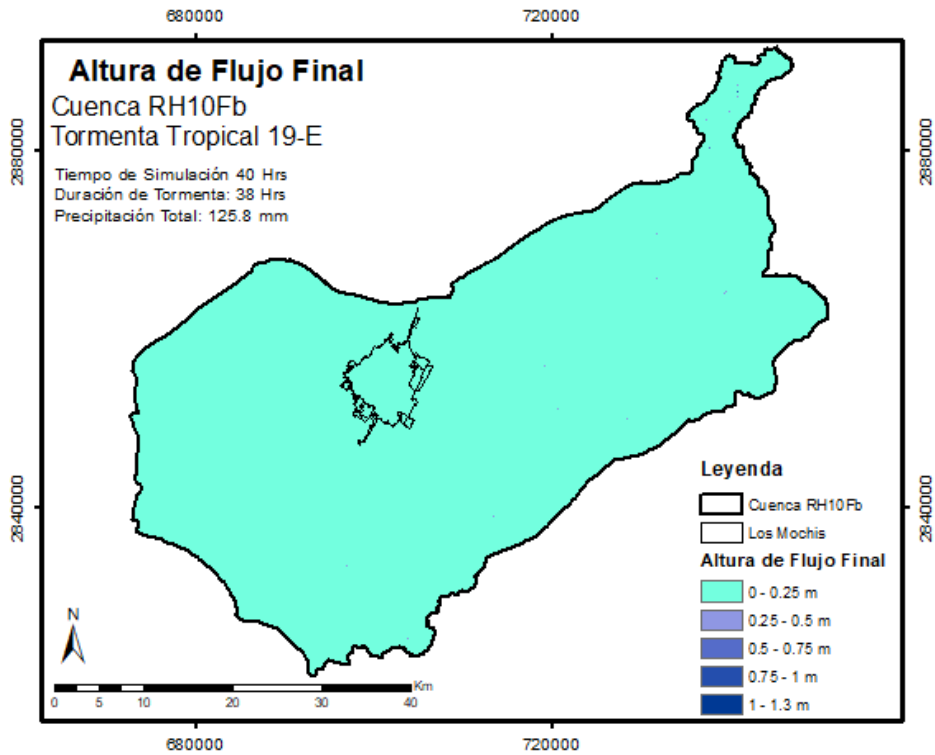


Figura 42. Altura de Flujo Final registrada durante la simulación del evento: Tormenta Tropical 19-E en la subcuenca RH10Fb

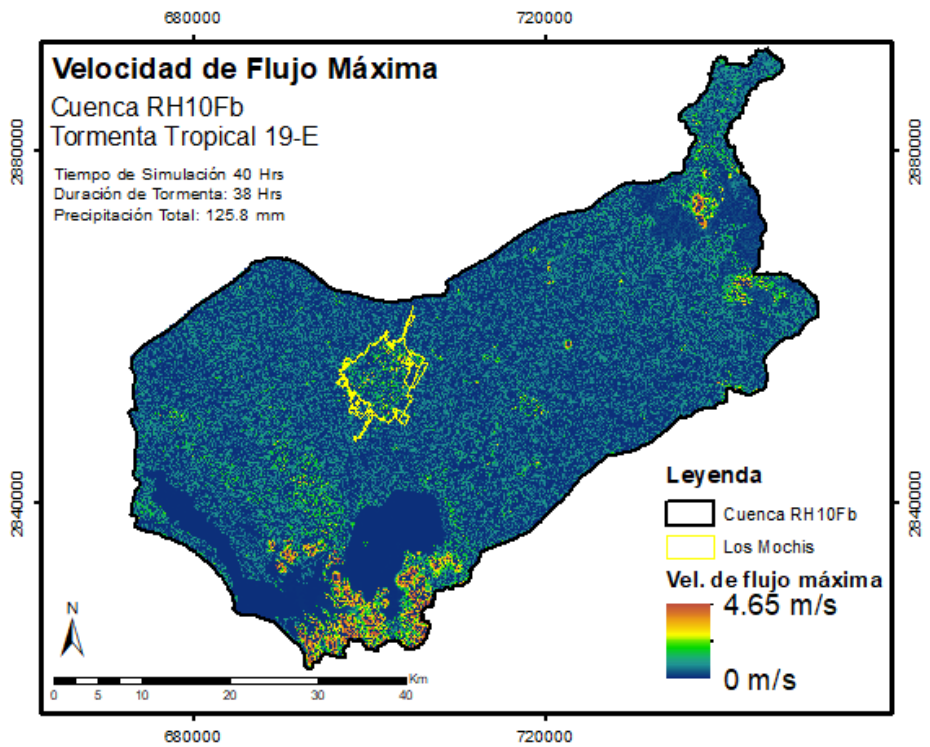


Figura 43. Velocidad de Flujo Máxima registrada durante la simulación del evento: Tormenta Tropical 19-E en la subcuenca RH10Fb

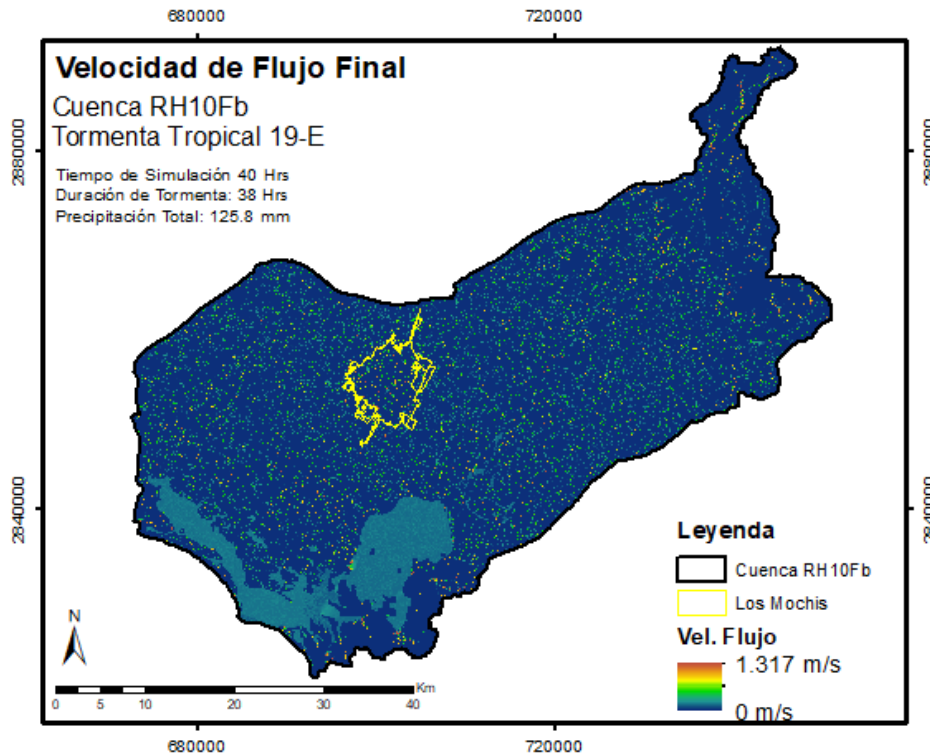


Figura 44. Velocidad de Flujo Final registrada durante la simulación del evento: Tormenta Tropical 19-E en la subcuenca RH10Fb

De forma similar, el mapa de altura de flujo al final (Figura 42) no muestra resultados que permitan inferir aportaciones de flujo a la mancha urbana, por el contrario, incluso se podría decir que al término de la Depresión Tropical 19-E, no se identificaron condiciones de profundidad de flujo propias de una inundación a nivel de Cuenca.

Para el caso de las velocidades de flujo máximas (Figura 43) se observan importantes valores, en las zonas de mayor variación topográfica que consisten en la parte alta de la cuenca y la zona costera (ver Figura 26). Es posible identificar un patrón de mayor velocidad de flujo en la región por donde se encuentra la corriente principal de la cuenca, la cual se puede apreciar en la Figura 3. Dicha corriente, como se ha mencionado, no supone aportaciones de agua al centro urbano de los Mochis, el cual es alimentado a través de derivaciones provenientes del Río Fuerte (H. Ayuntamiento de Ahome, 2014). Dentro del polígono de la ciudad se puede

observar una velocidad de flujo mayor en dirección NO-SE, la cual corresponde con la dirección de la red de drenes y canales que atraviesan la ciudad (Figura 11).

El mapa de la Figura 44 corresponde a la velocidad de flujo final al término de la simulación numérica en la cuenca de estudio. A diferencia de los valores máximos registrados durante la simulación hidrológica, no se registran velocidades importantes aún en las zonas de mayor gradiente topográfico, así mismo, casi en toda la extensión de la cuenca, el valor más común de velocidad que se presenta es de 0 ms^{-1} , concordando con los resultados de profundidad de flujo finales en que al término de la simulación no se presentan condiciones de inundación.

Un punto importante a resaltar, es que los resultados estimados en este apartado tienen la principal finalidad de poder determinar si existen patrones de escurrimiento que pudieran representar aportaciones de flujo entre la cuenca RH10Fb y la zona urbana de los Mochis, las cuales claramente son inexistentes debido a la ubicación de los Mochis, aguas arriba de la corriente principal de la cuenca (Figura 3). Para una descripción más detallada y una simulación hidrológica de la cuenca RH10Fb con un buen nivel de fiabilidad, es necesario contar con una buena cobertura de estaciones climáticas, así como registros volumétricos de sus principales entradas de flujo (corriente principal y su red de drenes y canales).

5.3.2 Resultados de la simulación de la Depresión Tropical 19-E: Los Mochis, Sin.

La Figura 45 corresponde al mapeo de profundidades de flujo máximas simuladas durante la Depresión Tropical 19-E en la ciudad de los Mochis, Sinaloa. La simbología corresponde con el nivel de riesgo asociado a la profundidad de flujo, teniendo una primera clase de los 3 a los 30 cm de profundidad de riesgo nulo, seguido de una clase de 30 a 50 cm de bajo riesgo, de 50 cm a un metro con riesgo medio y finalmente una clase con profundidades superiores al metro, llegando incluso a alcanzar valores puntuales de hasta 8 metros en algunas zonas. Un detalle importante en los mapas generados en la zona de estudio, es el efecto de los ARF y WRF (Figura 30), los cuales obstaculizan el tránsito de flujo por encima de construcciones, dándole más realismo a la simulación.

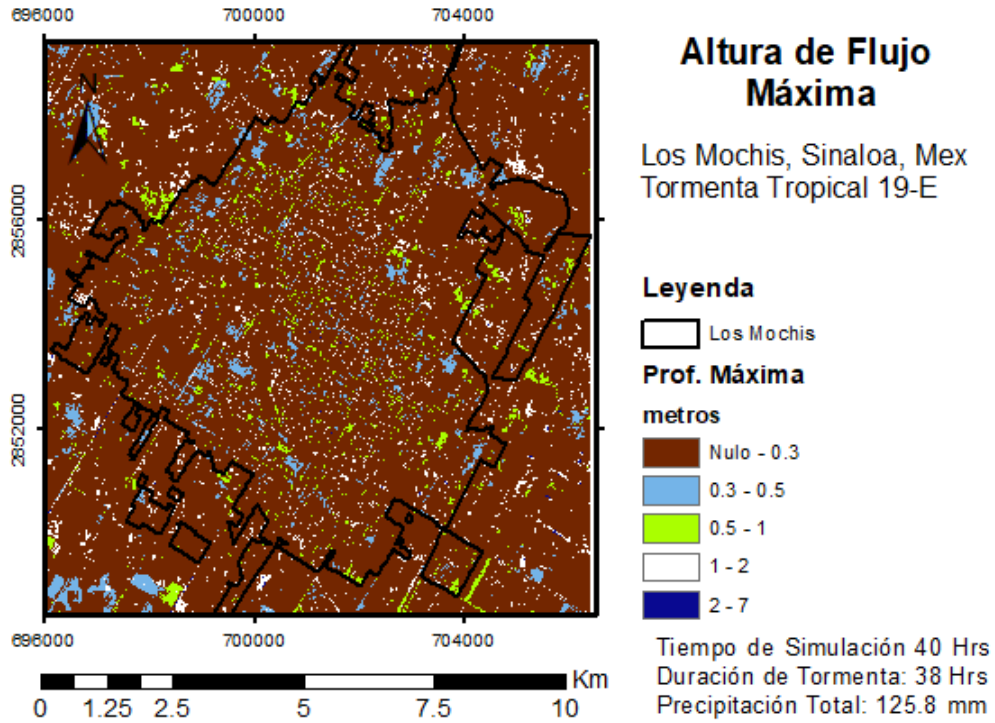


Figura 45. Altura de flujo máxima registrada durante la simulación del evento: Tormenta Tropical 19-E en la zona urbana de Los Mochis, Ahome, Sinaloa.

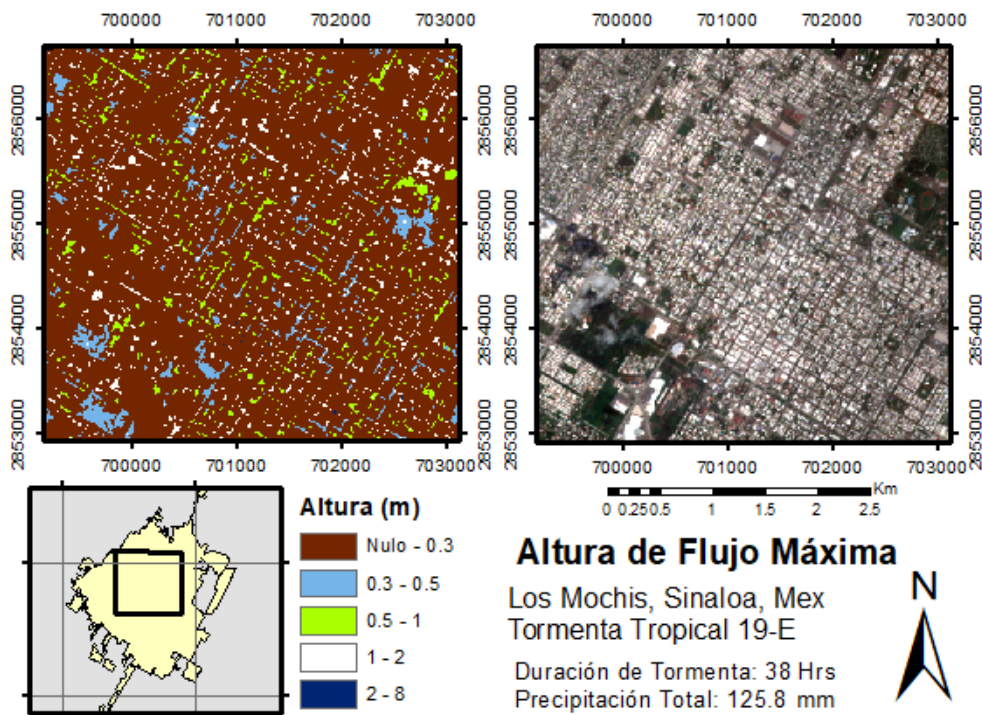


Figura 46. Altura de flujo máxima registrada durante la simulación del evento: Tormenta Tropical 19-E en la zona urbana de Los Mochis, Ahome, Sinaloa.

En la Figura 46, se muestra un acercamiento al centro de la zona urbana de los Mochis, en el cual se aprecia con mayor detalle la distribución de la altura de flujo y el efecto que las calles y manzanas tienen sobre la simulación de inundación.

Existe una estrecha relación entre las alturas finales (Figura 47) y las máximas (Figura 45) simuladas durante el evento en Los Mochis, teniendo la misma distribución de flujo con ligeras diferencias solo en la magnitud de las elevaciones. En ambos casos se han encontrado zonas de importante acumulación que concuerdan con la zonificación de riesgo por inundaciones del trabajo de IMPLAN (2012) en las cercanías de drenes y cuerpos de agua, por ejemplo en el caso del Canal Sublateral 23+700 (Figura 16). No se han encontrado correspondencias claras entre productos y satelitales y los resultados de la simulación numérica, con solo algunas excepciones en la parte noreste de la ciudad y las cercanías al Canal Sublateral 23+700. Esto último puede tener causas múltiples, como la diferencia en fechas (1 día de diferencia con la imagen óptica y 2 con la de RADAR), diferencias en resolución espacial, efecto de la infraestructura hidráulica, etc.

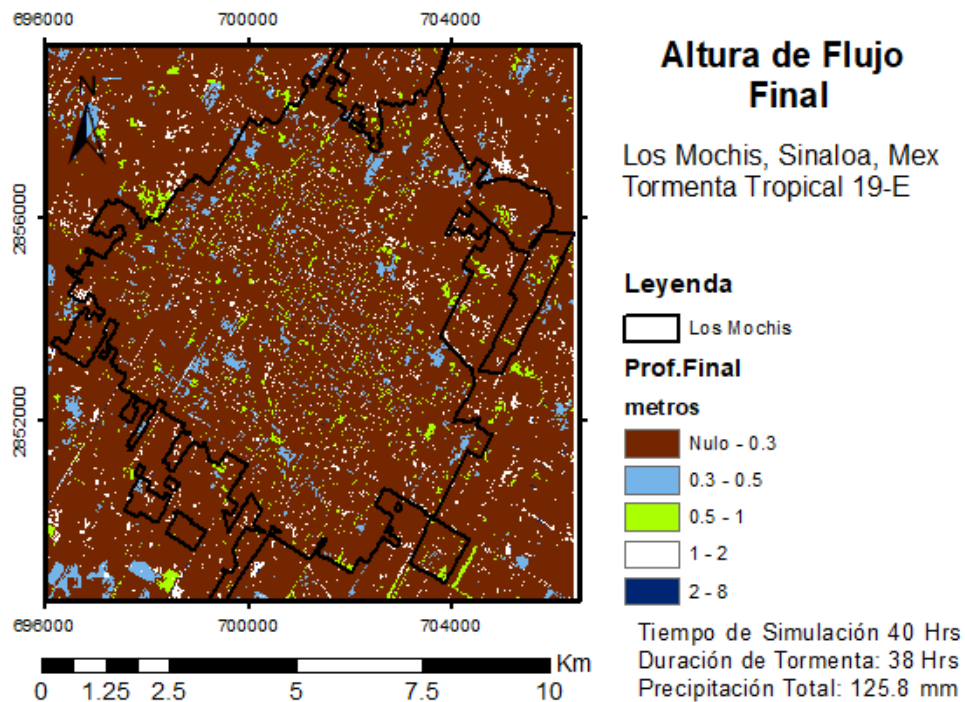


Figura 47. Altura de Flujo Final registrada durante la simulación del evento: Tormenta Tropical 19-E en la zona urbana de los Mochis, Ahome, Sinaloa.

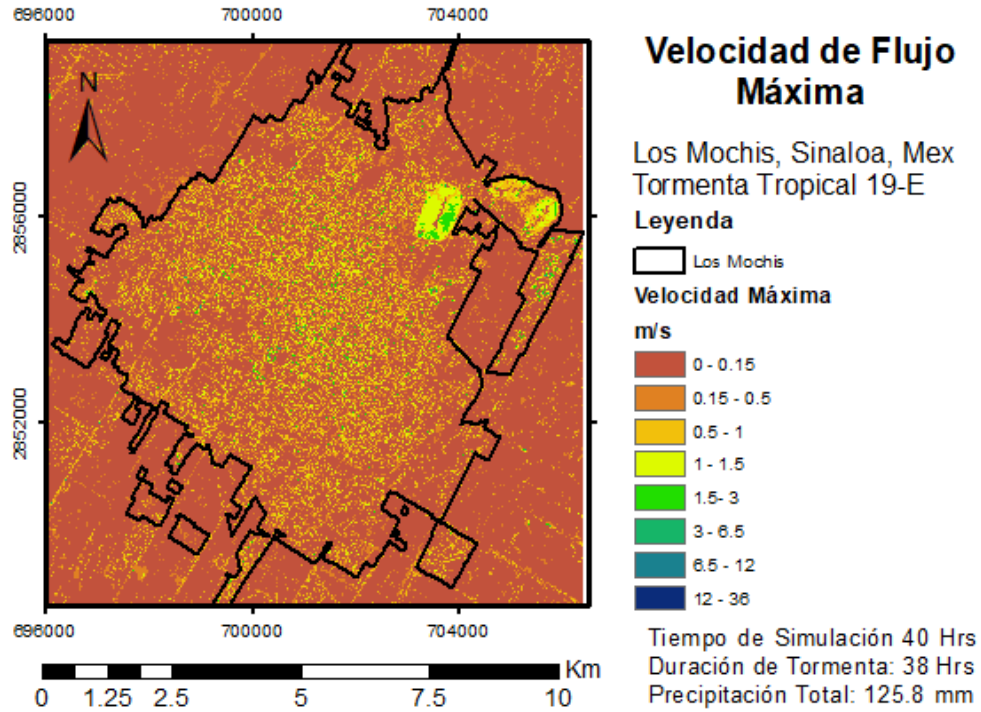


Figura 48. Velocidad de Flujo Máxima registrada durante la simulación del evento: Tormenta Tropical 19-E en la zona urbana de los Mochis, Ahome, Sinaloa.

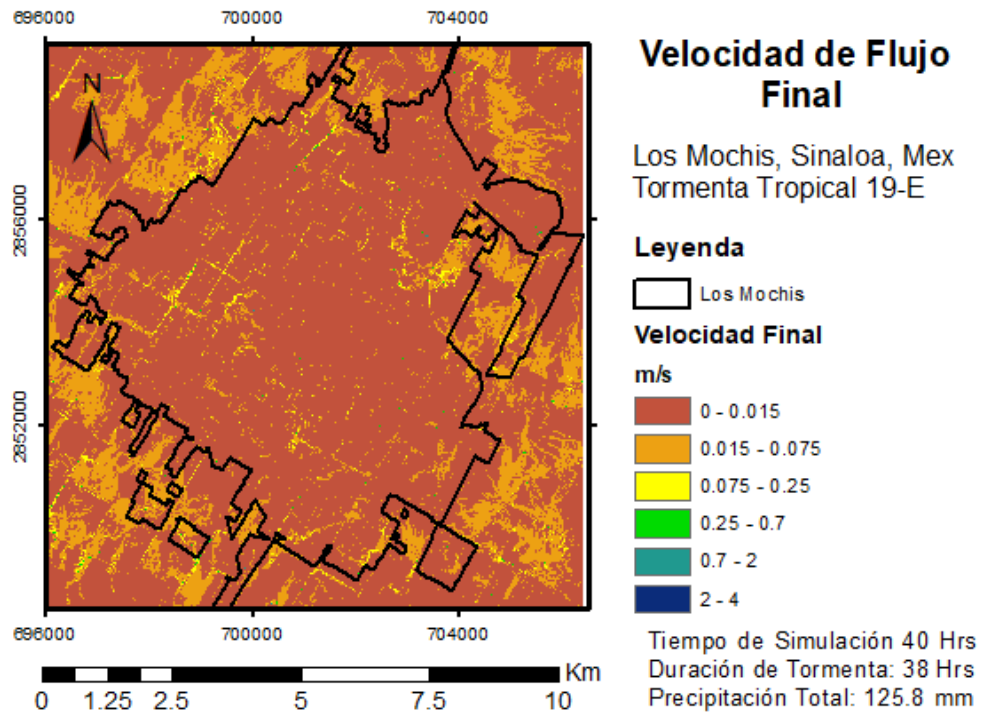


Figura 49. Velocidad de Flujo Máxima registrada durante la simulación del evento: Tormenta Tropical 19-E en la zona urbana de los Mochis, Ahome, Sinaloa.

Respecto a las velocidades de flujo máximas (Figura 48) y finales (Figura 49) simuladas para la Depresión Tropical 19-E, se observa una importante brecha entre ambos valores llegando a presentarse valores por encima de los 20 ms^{-1} en algunas zonas. Para el caso particular del mapa de velocidades máximas (Figura 48), los flujos descendentes del cerro de la Memoria, corren a altas velocidades, llegando a presentar una condición altamente riesgosa por la posibilidad de un deslave o deslizamiento. Por su parte en la Figura 49, tal como es de esperarse, de una zona tan plana como Los Mochis (Se estima que en Los Mochis, la pendiente promedio es de 0.001 con dirección SE; Zamorano García, 2003) no se presentan velocidades asociadas al niveles altos de peligro al final de la simulación.

Para el caso de la inundación acontecida en Los Mochis Sin, como producto de la Depresión Tropical 19-E, no existe un consenso general de la cantidad de precisa de lluvia que se presentó, por ejemplo, algunos medios, informan una precipitación de 359.5 mm (El Debate, 2019), por su parte, los registros climáticos no esclarecen este valor, ya que en las redes de estaciones automáticas de la Conagua y el SMN (Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas; EMAS y CLICOM; CLICOM, 2016), así como las de INIFAP (INIFAP, 2018) ubicadas en la zona de estudio, muestran errores de medición o valores con 0 durante el evento. El acceso a la información hidroclimática fiable y de calidad, se convierte en un punto clave en investigaciones de esta índole.

Es necesario contar con información hidrométrica para la validación de este tipo de metodologías. Con una estación hidrométrica sería posible validar los datos de velocidad de flujo, o con registros de escala se podrían validar los valores de altura de tirante alcanzada durante la inundación.

5.3.3 Escenarios de inundación

Como parte de los objetivos de este trabajo de investigación, se generaron diversos escenarios de inundación a partir de hietogramas de precipitación sintética generados con las curvas IDF estimadas para la zona de estudio (Figura 20).

El set de escenarios (en listados en la Tabla 5) se planteó para precipitaciones con una duración de 2, 3 hrs (el rango promedio en que se presentan la mayoría de las precipitaciones según los análisis históricos de las series de precipitación es de entre 2 y 3 hrs) y 6 hrs, para periodos de retorno de 2, 10 y 100 años.

El modelo hidrológico FLO-2D emplea una serie de criterios de estabilidad numérica los cuales se ajustan de acuerdo al tipo de modelación que se requiere. Uno de estos criterios es el parámetro TOL, el cual representa el almacenamiento en depresiones superficiales, parte del volumen interceptado por infiltración (FLO-2D Software Inc., 2017b). Básicamente, este volumen es un reservorio por cada celda, el cual requiere ser llenado para que el agua del sistema pueda fluir a través de la llanura de inundación (Figura 50). Para este trabajo se empleó un valor de 0.03 m, el cual es recomendado en la literatura para modelos de precipitación-escorrentía (FLO-2D Software Inc., 2017b). No obstante, la selección de este valor, afectó las simulaciones generadas para cuatro de los nueve escenarios del ensamble de experimentos propuestos en esta investigación.

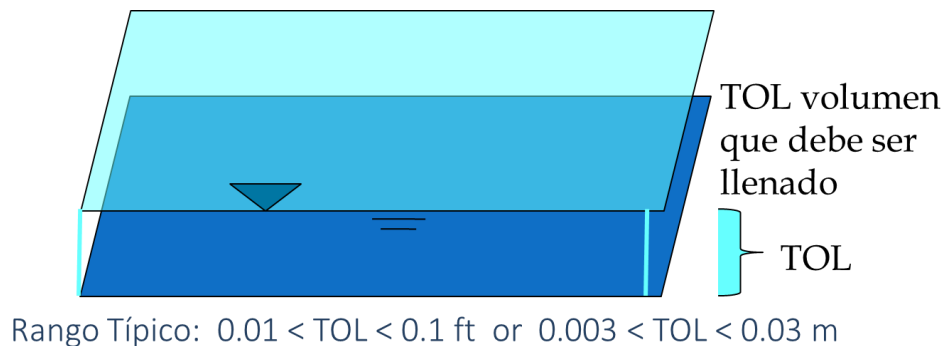


Figura 50. Esquematización del criterio TOL, parámetro de estabilidad numérica utilizado por FLO-2D para determinar a partir de que volumen, el agua de precipitación se convierte a escorrentía. Extraído de: FLO-2D Software Inc. (2017b, p.).

En las Figuras 51, 52, 53, 54 y 55, se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios $Tr = 10$ años 3 hrs, $Tr = 10$ años 6 hrs, $Tr = 100$ años 2 hrs, $Tr = 100$ años 3 hrs y $Tr = 100$ años 6 hrs respectivamente. Los escenarios correspondientes a las precipitaciones con periodo de retorno de 2 años, al momento de ser simulados con FLO-2D no presentaron flujo de en la llanura de

inundación debido a que su volumen de escorrentía fue inferior al parámetro TOL establecido en este trabajo de investigación.

Los resultados obtenidos para cada escenario del ensamble de experimentos, fueron utilizados para la generación de mapas de riesgo según la velocidad y altura de tirante de flujo estimados por celda. A pesar de que existen criterios oficiales para la generación de mapas de riesgo por inundación, estos varían según la región donde se realizan, por ejemplo, en el trabajo de Alcocer-Yamanaka, Rodríguez-Varela, Bourguett-Ortiz, Llaguno-Guilberto, & Albornoz-Góngora (2016) se presentan diversos rangos de profundidad y velocidad de flujo considerados como peligrosos según diferentes países y organismos, no obstante, en este trabajo se emplearon los criterios para la generación de mapas de riesgo reportados por Figueroa-Miranda (2019) en su trabajo sobre inundaciones en cuencas urbanas. En dicho trabajo, se consideran condiciones de riesgo bajo, valores de altura de tirante de agua menores a los 0.3 m y velocidades inferiores a 0.5 ms^{-1} , riesgo medio en alturas entre 0.3 y 0.5 m y velocidades entre 0.5 y 1 ms^{-1} y condiciones de alto peligro alturas de flujo por encima de 0.5 m y velocidades superiores a 1 ms^{-1} .

La Figura 51, corresponde a los resultados de la simulación del escenario de inundación de tres horas con un periodo de retorno de 10 años. Respecto al mapa de elevación de flujo tanto para valores máximos, así como para finales, se observa por lo general alturas por debajo de los criterios para ser consideradas como de alto riesgo, aún pese a esto, se observan diversos focos de acumulación de flujo en el interior de la ciudad, llegando a registrarse valores máximos de 9 y 7 m de profundidad máxima y final respectivamente. Respecto a velocidades, existe un alto nivel riesgo relacionado a velocidades de flujo máximas en diversas zonas, llegando a alcanzar hasta los 5 ms^{-1} en zonas específicas.

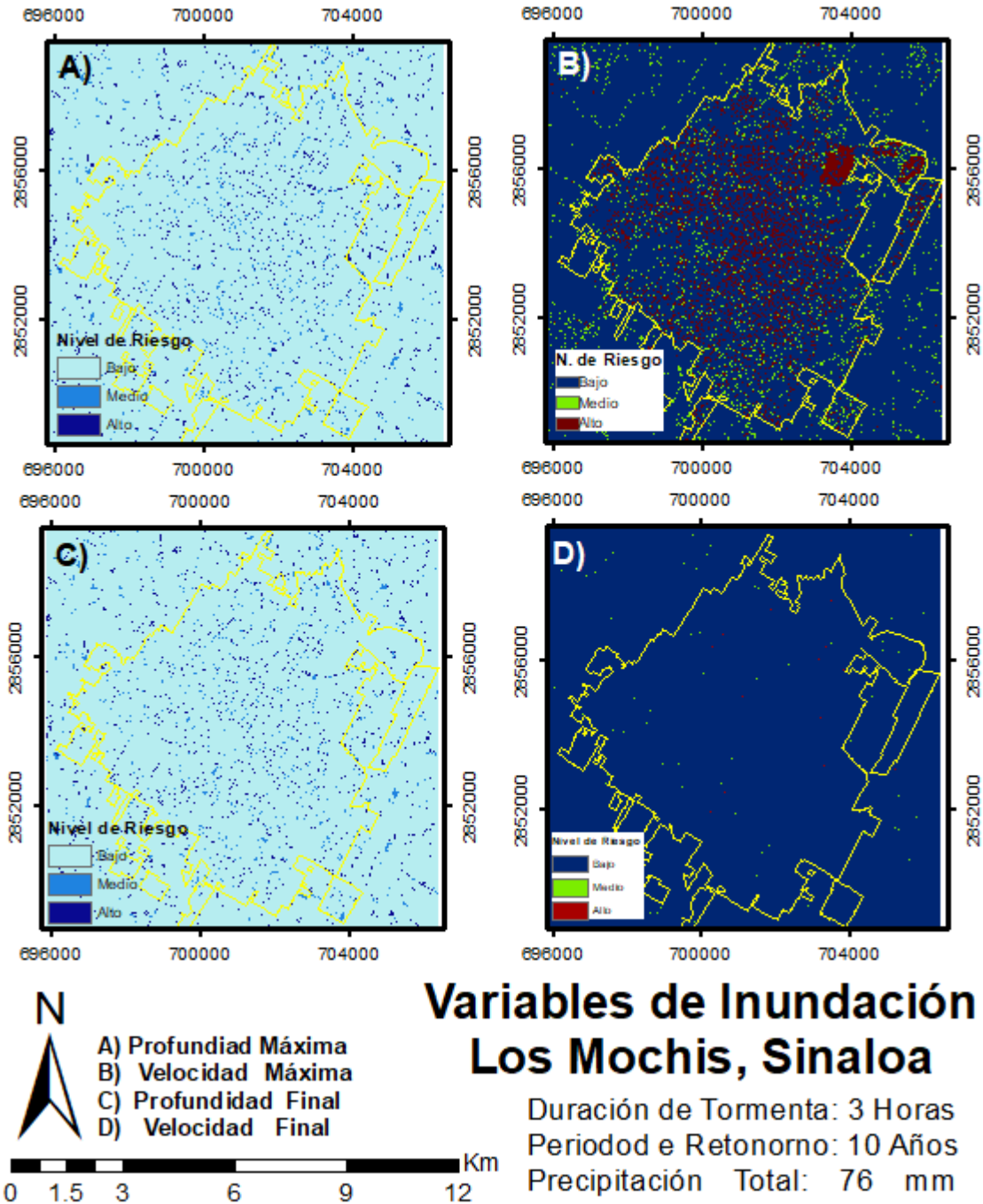


Figura 51. Resultados de la simulación del escenario Tr: 10_3 hrs en la zona urbana de los Mochis, Ahome, Sinaloa. El conjunto de mapas corresponde a: A Profundad máxima de flujo, B: Velocidad máxima, C: Profundidad Final y D: velocidad final

La Figura 52, corresponde al escenario con periodo de retorno de 10 años y duración de 6 horas. Se observan diversos puntos con un alto nivel de riesgo por tirante de agua en el interior de la ciudad tanto en máximos como en finales.

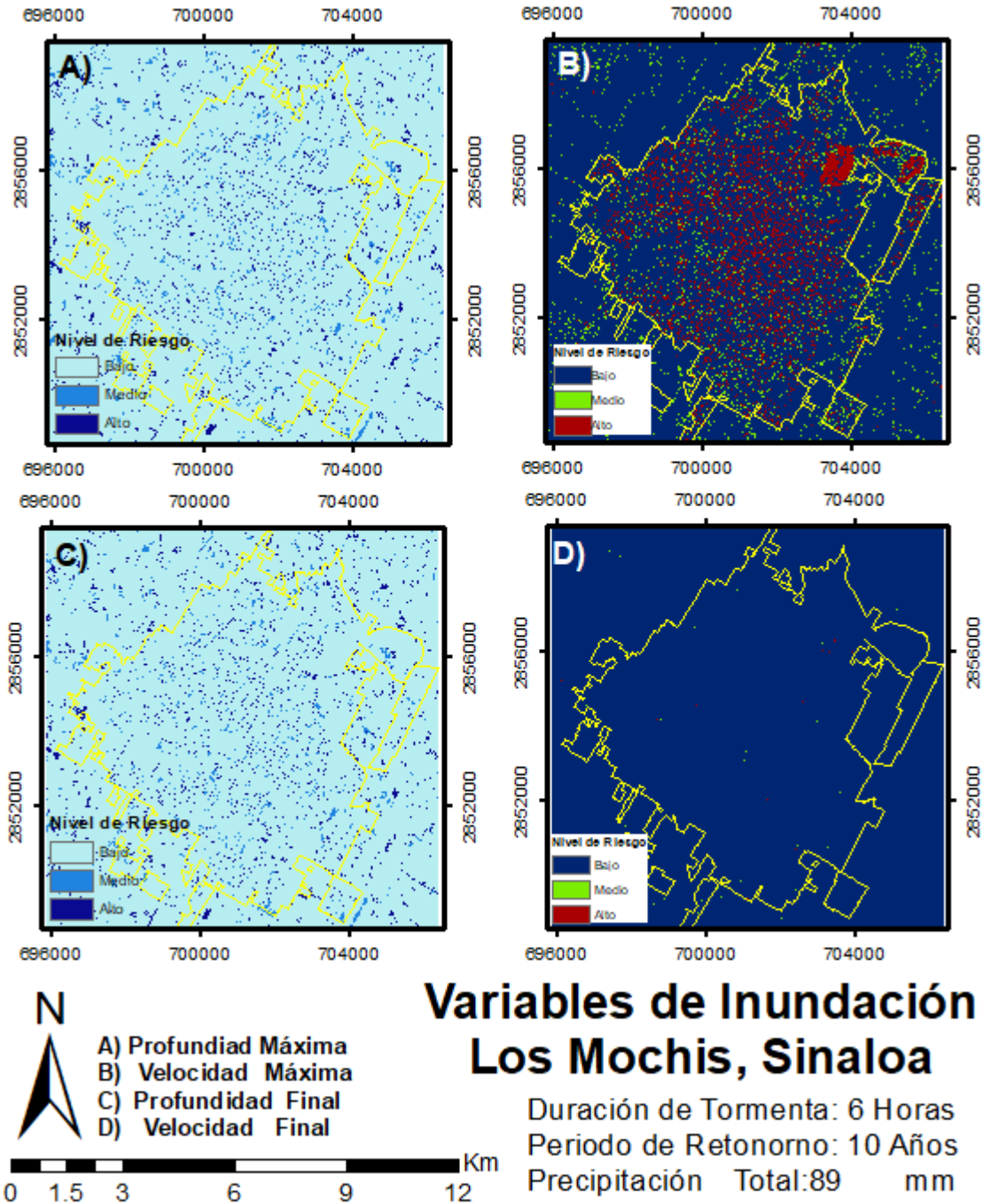


Figura 52. Resultados de la simulación del escenario Tr: 10_6 hrs en la zona urbana de los Mochis, Ahome, Sinaloa. El conjunto de mapas corresponde a: A Profundidad máxima de flujo, B: Velocidad máxima, C: Profundidad Final y D: velocidad final

Con respecto a velocidad de flujo máxima, esta se asocia con altos niveles de riesgo en el interior de la ciudad presentando valores máximos de hasta 5 ms^{-1} , los resultados finales por su parte, no muestran zonas de riesgo (Figura 52).

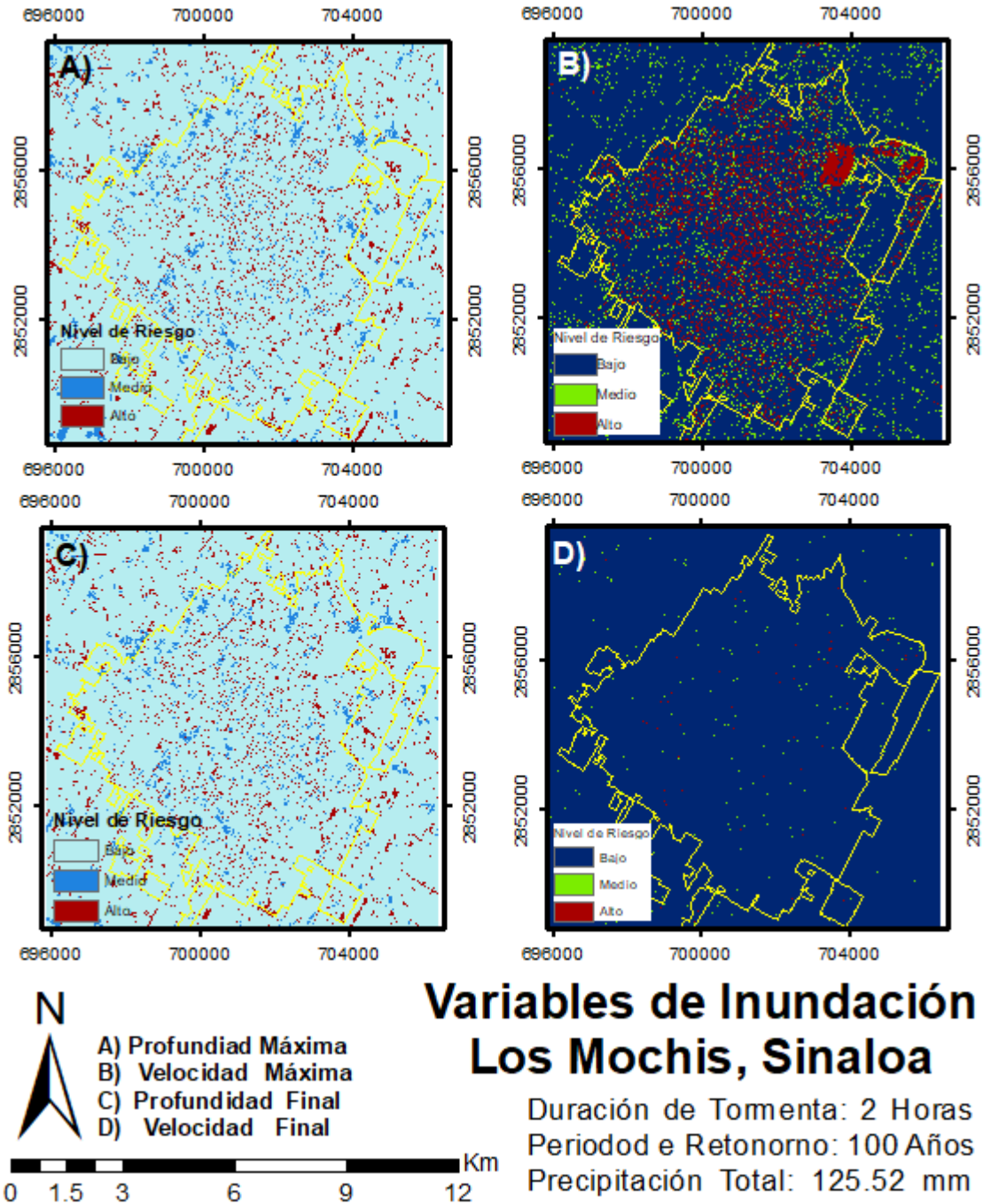


Figura 53. Resultados de la simulación del escenario Tr: 100_2 hrs en la zona urbana de los Mochis, Ahome, Sinaloa. El conjunto de mapas corresponde a: A Profundidad máxima de flujo, B: Velocidad máxima, C: Profundidad Final y D: velocidad final

Los escenarios con periodos de retorno de 100 años, presentan precipitaciones por encima de los 120 mm, razón por la cual, estos son más intensos y por

consecuencia, presentan una mayor distribución de zonas de alto riesgo tanto en profundidad de flujo como en velocidad. La Figura 53 corresponde al escenario $T_r=100$ años y duración de 2 hrs. Se observa una amplia distribución de zonas con alto nivel de riesgo por profundidad de flujo tanto en valores máximos como en finales los cuales guardan mucha similitud posiblemente debido a la poca duración de la tormenta. Respecto a valores de velocidad, se presentan una gran cantidad valores asociados a peligro en los resultados máximos en contraste con las pocas zonas de riesgo medio apenas visibles en los resultados finales.

Para el escenario $T_r=100$ años y

rá a presentar bajo las condiciones actuales del medio físico. El caso de las velocidades duración de 3 hrs (Figura 54), la precipitación estimada, es incluso mayor que la registrada por la estación Camajoa para la Depresión Tropical 19-E, razón por la cual se aprecia una gran cantidad de zonas con alto riesgo por altura de flujo, donde se estiman valores máximos de hasta 9 m (muy posiblemente asociados a drenes o canales). De igual forma, el mapa de velocidades máximas indica un aumento en las zonas de mayor riesgo.

El último y más severo escenario corresponde al de $T_r=100$ con una tormenta de 6 hrs de duración (Figura 54). Aumentan las zonas de alto peligro por altura de flujo considerablemente tanto en resultados máximos como en finales. Se observa el desborde de diversas obras de infraestructura, las cuales corrieron en seco al momento inicial de la simulación (lo cual es una condición ideal debido a que muchas de estas obras conducen importantes volúmenes de agua todo el año), lo cual permite inferir que esta situación sería mucho más grave si se llegará a presentar de forma similar, presentan grandes extensiones de terreno donde los límites de riesgo alto son superados, a pesar de ello, parece estabilizarse esta situación al final de la tormenta.

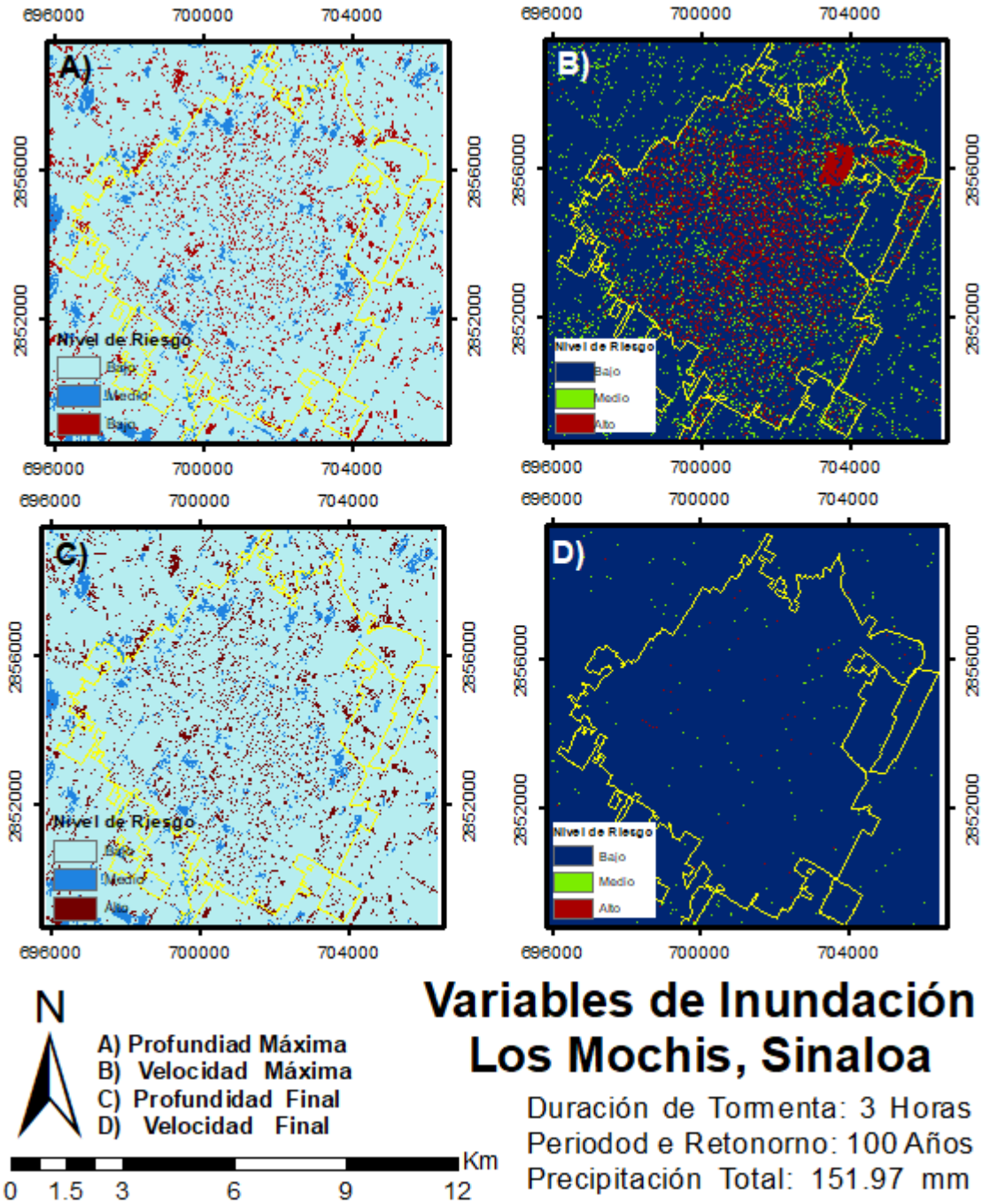


Figura 54. Resultados de la simulación del escenario Tr: 100_3 hrs en la zona urbana de los Mochis, Ahome, Sinaloa. El conjunto de mapas corresponde a: A Profundidad máxima de flujo, B: Velocidad máxima, C: Profundidad Final y D: velocidad final

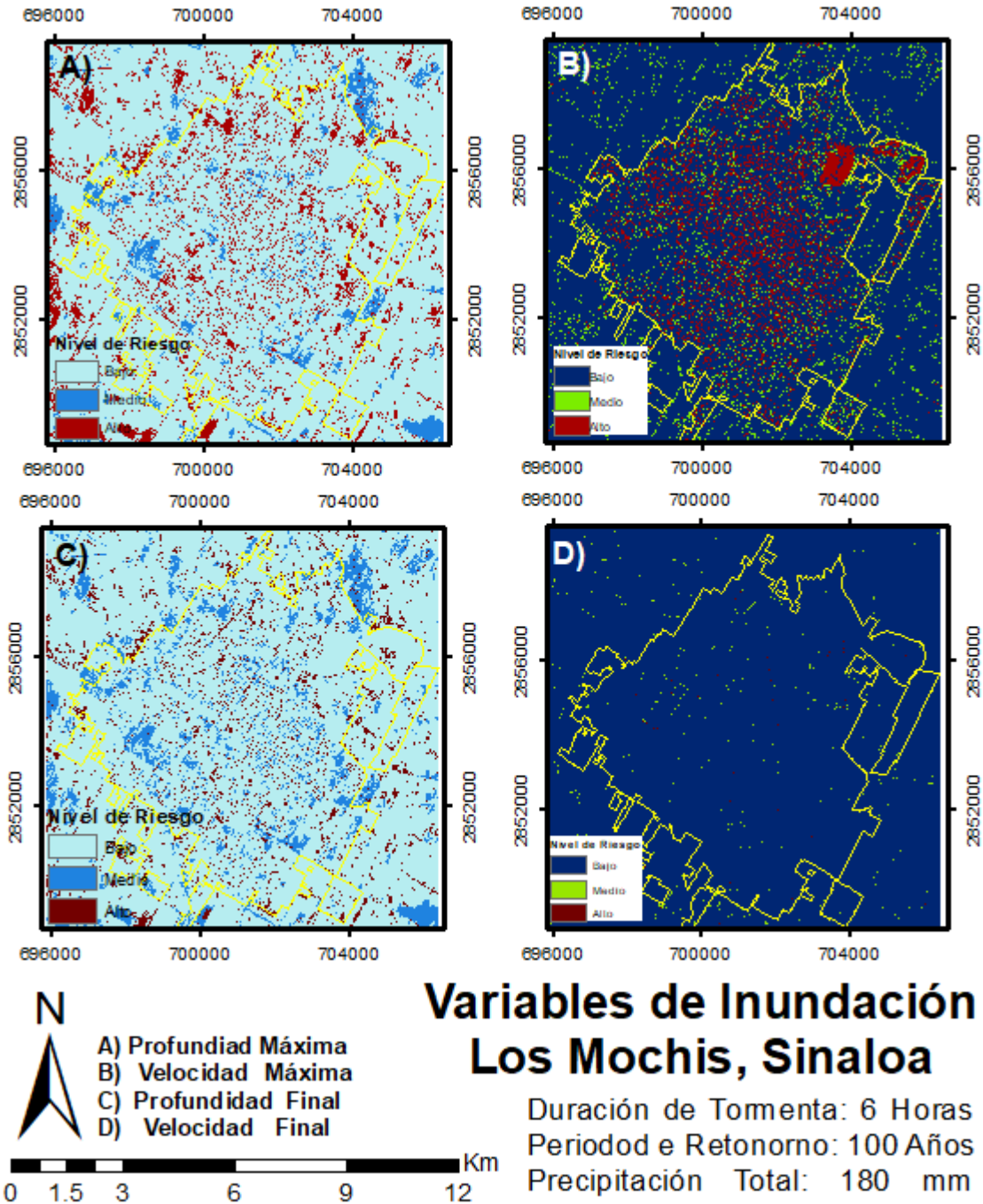


Figura 55. Resultados de la simulación del escenario Tr: 100_6 hrs en la zona urbana de los Mochis, Ahome, Sinaloa. El conjunto de mapas corresponde a: A Profundidad máxima de flujo, B: Velocidad máxima, C: Profundidad Final y D: velocidad final

Capítulo 6. Conclusiones

Las modelaciones numéricas realizadas sugieren que lluvias extremas como la ocurrida durante el mes de septiembre del 2018 es un factor detonante en la presencia de inundación; sin embargo, los resultados obtenidos también sugieren que el efecto de inundación se puede maximizar a consecuencia de la infraestructura urbana.

Los datos satelitales (multiespectrales y SAR) son una muy buena fuente de información permitiendo identificar áreas inundadas pero su aplicación y éxito depende en gran medida de su resolución temporal y la disponibilidad de las escenas.

Para lograr una completa correspondencia y validar los resultados obtenidos de la simulación numérica es necesario contar con mediciones de estaciones hidrométricas que permitan cuantificar los flujos de los principales cauces.

En el caso de los resultados por fuentes satelitales debido a su resolución temporal es necesario ampliar el tiempo de simulación del modelo numérico con la intención de hacer comparables (en tiempo) ambos resultados.

El modelo FLO-2D es una herramienta muy poderosa que permite recrear de forma aceptable el evento de inundación de septiembre 2018 ocurrido en Los Mochis, Sinaloa.

El modelo de inundación pluvial regional, a nivel cuenca, determinó que no existe un aporte significativo de escurrimientos de flujo hacia la ciudad de Los Mochis, siendo entonces el fenómeno de inundación consecuencia de factores más locales.

De acuerdo con los resultados de simulación eventos con un periodo de retorno de 10 años (precipitación ~89 mm) pueden generar inundaciones en diversas zonas de la Ciudad de Los Mochis, Sin. Datos obtenidos de la estación meteorológica midieron ~120 mm en el evento ocurrido en septiembre del 2018 conocido como Depresión Tropical 19-E.

Se modeló la Depresión Tropical 19-E con ayuda del modelo hidrológico, FLO-2D, determinando así las condiciones de riesgo asociadas a tal evento, aunado esto, se exploraron técnicas alternativas a la modelación numérica a través de elementos de percepción remota activa y pasiva para establecer una metodología de validación. No obstante, es necesario profundizar más en este aspecto a través de la integración de diferentes enfoques, técnicas o fuentes de información, con el fin de estandarizar una metodología robusta y aplicable en diferentes áreas de estudio.

Se generó un set de experimentos de acuerdo a los registros de precipitación históricos analizados en la zona de estudio, identificando las potenciales zonas de vulnerabilidad por altura de tirante de agua y velocidad de flujo ante eventos de precipitación severos.

El trabajo desarrollado, permite generar mapas de riesgo considerando topografía y las condiciones físicas superficiales de la zona de estudio, bajo diferentes escenarios de precipitación.

Trabajo futuro

El presente trabajo a pesar de utilizar una alta resolución, existen actividades/ procesos que pueden ser mejorados con la intención de aumentar la certidumbre de los resultados. A continuación, se enlistan algunas recomendaciones que pueden realizarse como trabajo futuro:

- Incrementar la resolución espacial del dominio de la simulación. Esto representa un mayor esfuerzo computacional; sin embargo, permitirá reproducir un comportamiento más apegado a las condiciones reales de la zona de estudio
- Integrar en la modelación numérica infraestructura superficial y subterránea. El alcance del trabajo y tiempo para la finalización de tesis no permitió implementar casos donde se consideren el efecto de canales, desagües, drenajes, drenes y colectores pluviales, no obstante, se ha realizado un esfuerzo importante en la caracterización de la infraestructura hidráulica y de los parámetros que el modelo emplea, para su esquematización.
- Realizar escenarios de simulación donde se considere el ordenamiento territorial y proyección urbana futura, con la intención de identificar y prevenir, nuevas zonas de inundación propiciadas por construcciones con una deficiente planeación.
- Explorar nuevas y más sofisticadas técnicas de identificación de superficies inundadas a través de productos satelitales, espectrales e imágenes de RADAR.

El modelo numérico FLO-2D, es una poderosa herramienta para la simulación de inundaciones, debido a la gran cantidad de módulos que posee, módulo de precipitación, para hidrogramas, de infiltración, de evaporación, de canales, de alcantarillas, de ruptura de presas, de diques, de flujos hiperconcentrados, etc. Además, permite trabajar con altas resoluciones de forma optimizada, debido a sus algoritmos de propagación en 8 direcciones, etc. Sin embargo, posee ciertos inconvenientes, por ejemplo, sus interfaces para la generación de archivos de

entrada, así como su programa para mapeo de resultados, están ciertamente limitados. Así mismo, trabajar con grandes volúmenes de flujo y una resolución espacial fina, implica altos costos computacionales, en ese sentido, se puede decir que existe una gran limitante de procesamiento. Para trabajos futuros, se evaluará la metodología empleada en este trabajo de investigación con la finalidad de estandarizarla y poder aplicarla a zonas con problemas de incidencia de inundaciones de forma sencilla e integrando las técnicas y métodos explorados en esta tesis.

Referencias

- Alcocer-Yamanaka, V. H., Rodríguez-Varela, J. M., Bourguett-Ortiz, V. J., Llaguno-Guilberto, O. J., & Albornoz-Góngora, P. M. (2016). Metodología para la generación de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(5), 33–55.
- Anees, M. T., Abdullah, K., Nawawi, M. N. M., Rahman, N. N. N. A., Piah, A. R. M., Zakaria, N. A., ... Omar, A. K. M. (2016). Numerical modeling techniques for flood analysis. *Journal of African Earth Sciences*, 124, 478–486. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.10.001>
- Arduino, G., Reggiani, P., & Todini, E. (2005). Recent advances in flood forecasting and flood risk assessment. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 9(4), 280–284.
- Bautista Sosa, G. (2017). *La producción social del espacio urbano en la ciudad de Villahermosa, Tabasco: El riesgo por inundación del actual Distrito X "Las Gaviotas" (1970-2008)* (Tesis para obtener el grado de Maestro en Gestión Sustentable del Agua, El Colegio de San Luis, A.C.). Recuperado de <https://biblio.colsan.edu.mx/tesis/BautistaSosaGerardo.pdf>
- Bedient, P. B., Huber, W. C., & Vieux, B. E. (2007). *Hydrology and Floodplain Analysis* (4 th ed.). USA: Prentice Hall PTR.
- Berkhahn, S., Fuchs, L., & Neuweiler, I. (2019). An ensemble neural network model for real-time prediction of urban floods. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.066>
- Berlanga-Robles, C. A., Ruiz-Luna, A., Covarrubias-Legaspi, H. O., & Hernández-Guzmán, R. (2011). Patrones de escurrimiento en la Cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa, asociados a cambios de uso del suelo: Una aproximación con el modelo del número de curva. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(1), 39–52.
- Bhuiyan, Md. J. A. N., & Dutta, D. (2012). Analysis of flood vulnerability and assessment of the impacts in coastal zones of Bangladesh due to potential sea-level rise. *Natural Hazards*, 61(2), 729–743. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-0059-3>
- Cabrera Martínez, J. (2018a, septiembre 19). Fuertes lluvias provocan inundaciones en Los Mochis, Sinaloa; suspenden clases. *El Universal*. Recuperado de <https://www.eluniversal.com.mx/estados/fuertes-lluvias-provocan-inundaciones-en-los-mochis-sinaloa-suspenden-clases>
- Cabrera Martínez, J. (2018b, septiembre 20). Lluvias en Sinaloa ocasionan inundaciones y accidentes reportan. *El Universal*. Recuperado de <http://www.eluniversal.com.mx/estados/lluvias-en-sinaloa-ocasionan-inundaciones-y-accidentes-reportan>
- Calderón Aragón, G. (2001). *Construcción y reconstrucción del desastre*. Recuperado de <http://www.plazayvaldes.es/libro/construccion-y-reconstruccion-del-desastre>

- Campos Aranda, D. F. (2008). Estudio de la precipitación máxima diaria anual en la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa), con base en Distancias Euclidianas. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, (65), 56–67.
- Campos Aranda, D. F. (2015). *Introducción a la Hidrología Urbana*. Recuperado de https://agua.org.mx/wp-content/uploads/filespdf/doc_pdf_43127.pdf
- Campos-Aranda, D. F. (2010). Intensidades máximas de lluvia para diseño hidrológico urbano en la República Mexicana. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 11, 179–188.
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. (2019). *Emergency Events Database (EM-DAT)*. Recuperado de <https://www.emdat.be/>
- Chavez, P. S., & others. (1996). Image-based atmospheric corrections-revisited and improved. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 62(9), 1025–1035.
- Chen, C. (1983). Rainfall intensity-duration-frequency formulas. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(12), 1603–1621.
- Chourushi, S., Lodha, P., & Prakash, I. (2019). A Critical Review of Hydrological Modeling Practices for Flood Management. *Pramana Research Journal*, 9(3). Recuperado de <https://www.pramanaresearch.org/gallery/prj-p592.pdf>
- Chow, V. T. (1959). *Open-channel hydraulics* (Vol. 1). Recuperado de <http://science.sciencemag.org/content/131/3408/1215.2>
- Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, L. W., Saldarriaga, J. G., & others. (1994). *Hidrología aplicada*. Santafé de Bogotá.
- CLICOM. (2016). *Base de Datos Climatológica Nacional. Servicio Meteorológico Nacional a través del CICESE*. Recuperado de <http://clicom-mex.cicese.mx>.
- CONAGUA. (2012). *Programa Hídrico Regional Visión 2030. Región Hidrológico-Administrativa III Pacífico Norte* (SEMARNAT, Ed.). Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/publicaciones/publicaciones/3-sgp-17-12pn.pdf>
- CONAGUA, & SEMARNAT. (2017). *Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego. Año Agrícola 2015-2016*. Recuperado de https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EA_2015-2016.pdf
- Conde, A. C., Hernández, G. E., Esquivel, N., López, J., López, F., Montes, R., ... Ruíz, K. (2016). Variabilidad climática y escenarios de cambio climático. Herramientas para los estudios de impactos potenciales y vulnerabilidad actual y futura. Ejemplos para México, Centroamérica y El Caribe. En A. C. Conde & J. López (Eds.), *Variabilidad y Cambio Climático. Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio Climático en América Latina y el Caribe* (pp. 25–72). Recuperado de <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD002498.pdf#page=27>
- Congedo, L. (2016). *Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. Release 6.0.1.1*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29474.02242/1>
- Corporación OSSO, & LA RED. (1994). *Sistema de Inventario de Desastres. DesInventar*. Recuperado de <https://www.desinventar.org/es/>

- Courant, R., Friedrichs, K., & Lewy, H. (1967). On the Partial Difference Equations of Mathematical Physics. *IBM Journal of Research and Development*, 11(2), 215–234. <https://doi.org/10.1147/rd.112.0215>
- Cunge, J. A., Holly, F. M., & Verwey, A. (1980). *Practical aspects of computational river hydraulics*. Recuperado de <https://trove.nla.gov.au/version/45262807>
- Curlander, J. C., & McDonough, R. N. (1991). *Synthetic aperture radar- Systems and signal processing*. Recuperado de <https://www.wiley.com/en-us/Synthetic+Aperture+Radar%3A+Systems+and+Signal+Processing-p-9780471857709>
- Davies, T., & Mehta, M. (2015, septiembre). *BENCHMARKING 2D MODELS - HEC-RAS 5.0 versus INFOWORKS ICM*. Conference presentation presentado en TFMA Fall Technical Summit. Recuperado de https://cdn.ymaws.com/www.tfma.org/resource/resmgr/2015_Fall_Summit_Presentations/Benchmarking_2D_Models_HEC-R.pdf
- Dhami, B., & Pandey, A. (2019). *COMPARATIVE REVIEW OF RECENTLY DEVELOPED HYDROLOGICAL MODELS*.
- Dimitriadis, P., Tegos, A., Oikonomou, A., Pagana, V., Koukouvinos, A., Mamassis, N., ... Efstratiadis, A. (2016). Comparative evaluation of 1D and quasi-2D hydraulic models based on benchmark and real-world applications for uncertainty assessment in flood mapping. *Journal of Hydrology*, 534, 478–492. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.020>
- Domeneghetti, A., Schumann, G. J.-P., & Tarpanelli, A. (2019). Preface: Remote Sensing for Flood Mapping and Monitoring of Flood Dynamics. *Remote Sensing*, 11(8), 943. <https://doi.org/10.3390/rs11080943>
- Donezar Hoyos, U., Larrañaga Urien, A., Tamés Noriega, A., Sánchez Gil, C., Albizua Huarte, L., Ciriza Labiano, R., & del Barrio Arellano, F. (2017). Aplicación de imágenes Sentinel-1 y Sentinel-2 en la detección y delineación de información de crisis de desastres naturales en el marco de los servicios Copernicus EMS. *Revista de teledetección: Revista de la Asociación Española de Teledetección*, 50, 49–57.
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., ... Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- El Debate. (2018a, abril 11). Taponamiento del dren Juárez causa ensalitramiento de tierras. *El Debate*. Recuperado de <https://www.debate.com.mx/losmochis/dren-juarez-entaponamiento-salinidad-salitre-tierras-agricolas-mochis-20180411-0173.html>
- El Debate. (2018b, septiembre 18). 90 mm de lluvia y 12 toneladas de basura; el recuento de daños. *El Debate*. Recuperado de <https://www.debate.com.mx/losmochis/fuertes-lluvias-mochis-sinaloa-inundaciones-danos-20180918-0013.html>
- El Debate. (2018c, septiembre 21). Depresión 19-E baja su fuerza pero deja a Ahome bajo el agua. *El Debate*. Recuperado de <https://www.debate.com.mx/losmochis/los-mochis-sinaloa-inundaciones-depresion-tropical-lluvias-20180921-0021.html>

- El Debate. (2018d, septiembre 21). Depresión 19-E baja su fuerza pero deja a Ahome bajo el agua. *El Debate*. Recuperado de <https://www.debate.com.mx/losmochis/los-mochis-sinaloa-inundaciones-depresion-tropical-lluvias-20180921-0021.html>
- El Debate, J. (2019, septiembre 17). A un año que Los Mochis quedó bajo el agua. *El Debate*. Recuperado de <https://www.debate.com.mx/losmochis/A-un-ano-que-Los-Mochis-queda-bajo-el-agua-20190917-0121.html>
- El Heraldo de México. (2019, febrero 28). Invierten 120 mdp en drenaje Rehabilitarán colectores de agua en Los Mochis para desalojar aguas pluviales. *El Heraldo de México*. Recuperado de <https://heraldodemexico.com.mx/estados/invierten-120-mdp-en-drenaje/>
- ESA. (2019). ESA Sentinel Online. Recuperado de <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>
- Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F., & Massonet, D. (2007). *InSAR principles-guidelines for SAR interferometry processing and interpretation* (K. Fletcher, Ed.). Recuperado de http://www.esa.int/esapub/tm/tm19/TM-19_ptA.pdf
- FLO-2D Software Inc. (2017a). *FLO 2-D. Reference Manual*. Recuperado de www.flo-2d.com
- FLO-2D Software Inc. (2017b). *FLO 2-D. Reference Manual*. Recuperado de www.flo-2d.com
- Freer, J., Beven, K. J., Neal, J., Schumann, G., Hall, J., & Bates, P. (2013). Flood risk and uncertainty. En *Risk and Uncertainty Assessment for Natural Hazards*: (pp. 190–233). <https://doi.org/10.1017/CBO9781139047562.008>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., ... Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2, 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- García, E. (2004). *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen* (Quinta Edición). Recuperado de http://www.igeograf.unam.mx/sigg/utilidades/docs/pdfs/publicaciones/geo_si_glo21/serie_lib/modific_al_sis.pdf
- Giles, L. (2017). *Channel Flow Routing Reading: Applied Hydrology Sections*. Presentación Online. Recuperado de <https://slideplayer.com/slide/8362452/>
- Golnaraghi, M., Etienne, C., Guha-Sapir, D., & Below, R. (2014). *Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate, and Water Extremes (1970-2012)* (M. Williams & C. Sylvie, Eds.). Recuperado de https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_1123_en.pdf
- Green, W. H., & Ampt, G. A. (1911). Studies on Soil Physics. *The Journal of Agricultural Science*, 4(1), 1–24. <https://doi.org/10.1017/S0021859600001441>
- Grimaldi, S., Petroselli, A., Arcangeletti, E., & Nardi, F. (2013). Flood mapping in ungauged basins using fully continuous hydrologic–hydraulic modeling. *Journal of Hydrology*, 487, 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.02.023>
- H. Ayuntamiento de Ahome. (2012a). *Manifestación de Impacto Ambiental. Modalidad Particular, Sector Hidráulico (25SI2012HD044) – Conexión del*

- Dren Juárez al Dren Buenaventura y rehabilitación mediante la interconexión de los tramos 0+000 al 2+445 (Dren D3-122) y del tramo 0+000 al 5+400 (Dren D-3 168) para la colecta de aguas pluviales y de excedentes agrícolas como obras de protección para la ciudad de Los Mochis, Ahome, Sinaloa.* Recuperado de <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/sin/estudios/2012/25SI2012HD044.pdf>
- H. Ayuntamiento de Ahome. (2012b). *Manifestación de Impacto Ambiental. Modalidad Particular, Sector Hidráulico (25SI2012HD044) – Conexión del Dren Juárez al Dren Buenaventura y rehabilitación mediante la interconexión de los tramos 0+000 al 2+445 (Dren D3-122) y del tramo 0+000 al 5+400 (Dren D-3 168) para la colecta de aguas pluviales y de excedentes agrícolas como obras de protección para la ciudad de Los Mochis, Ahome, Sinaloa.* Recuperado de <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/sin/estudios/2012/25SI2012HD044.pdf>
- H. Ayuntamiento de Ahome. (2014). *Actualización del Plan Director de Desarrollo Urbano de la Ciudad de Los Mochis.* Recuperado de http://www.implanahome.gob.mx/pddu_los_mochis_2014.html
- Herath, H. M. M., & Wijesekera, N. T. S. (2019). A State-of-the-Art Review of Flood Risk Assessment in Urban Area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 281, 012029. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/281/1/012029>
- Huber, W. C., Dickinson, R. E., & Barnwell, T. (1988). Storm water management model; version 4, User's Manual, EPA/600/3-88/001a (NTIS PB88-236641/AS). *Environmental Protection Agency, United States.* Recuperado de <http://www.dynsystem.com/netstorm/docs/swmm4manuals.pdf>
- IMPLAN. (2012a). *Atlas de Riesgos Naturales de la ciudad de Los Mochis 2011* (Núm. 125001-PP036855; p. 109). Recuperado de Instituto Municipal de Planeación de Ahome website: http://rmgir.proyectomesoamerica.org/PDFMunicipales/2011/vr_25001_AR_AHOME.pdf
- IMPLAN. (2012b). *MAPA 01.- RED DE CANALES* [[Plano Cartográfico]]. En *Mapas Técnicos. Los Mochis.* Recuperado de http://www.implanahome.gob.mx/mapas_tecnicos.html
- IMPLAN. (2012c). *MAPA 02.- RED DE DRENES* [[Plano Cartográfico]]. En *Mapas Técnicos. Los Mochis.* Recuperado de http://www.implanahome.gob.mx/mapas_tecnicos.html
- IMPLAN. (2012d). *MAPA 03.- RED DE COLECTORES* [[Plano Cartográfico]]. En *Mapas Técnicos. Los Mochis.* Recuperado de http://www.implanahome.gob.mx/mapas_tecnicos.html
- INEGI. (1995). *Estudio Hidrológico del Estado de Sinaloa.* Recuperado de http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825221362/702825221362_1.pdf
- INEGI. (2004). *Guías para la Interpretación de Cartografía. Edafología.* Recuperado de www.inegi.org.mx/inegi/SPC/doc/INTERNET/EDAFI.pdf

- INEGI. (2008). *Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000. Unidades climáticas* [[Formato Shapefile]]. En *Cartas Climatológicas*.
- INEGI. (2010). *Red Hidrográfica escala 1:50 000 edición 2.0* [[Formato Shapefile]]. En *Cartas Climatológicas* (2° Edición). Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/temas/mapas/hidrografia/>
- INEGI. (2013). *Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM)* [[Modelo Digital de Elevación]]. Recuperado de <http://www.beta.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- INEGI. (2017a). *Anuario estadístico y geográfico de Sinaloa 2017*. Recuperado de http://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/SIN_ANUARIO_PDF.pdf
- INEGI. (2017b). *Modelo digital de elevación de alta resolución Lidar* [[Modelo Digital de Elevación]]. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/>
- INEGI. (2017c). *Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie VI (continuo nacional)* [[Formato Shapefile]]. Recuperado de <http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463598459>
- INIFAP. (2018). *Red Nacional de Estaciones Agrometeorológicas Automatizadas. Instituto Nacional de investigaciones Forestales y Agropecuarias*. Recuperado de <https://clima.inifap.gob.mx/Inmysr/Estaciones/MapaEstaciones>
- INIFAP, & CONABIO. (2001). *Edafología* [[Formato Shapefile]]. En *Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad* (Instituto Nacional de investigaciones Forestales y Agropecuarias). Recuperado de <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=eda251mgw>
- Jain, S. K., Singh, R. D., Jain, M. K., & Lohani, A. K. (2005). Delineation of Flood-Prone Areas Using Remote Sensing Techniques. *Water Resources Management*, 19(4), 333–347. <https://doi.org/10.1007/s11269-005-3281-5>
- Julien, P. Y. (2018). Mechanics of Rivers. En *River Mechanics* (2a ed., pp. 14–46). <https://doi.org/10.1017/9781316107072.003>
- Junta de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Ahome. (2011). *Manifestación de Impacto Ambiental. Modalidad Particular (25SI2011HD100)—"Construcción, Operación y Mantenimiento" del Colector Oriente (segunda etapa), ubicado en la Ciudad de Los Mochis, Ahome, Sinaloa*. Recuperado de <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/sin/estudios/2011/25SI2011HD100.pdf>
- Khosravi, K., Shahabi, H., Pham, B. T., Adamowski, J., Shirzadi, A., Pradhan, B., ... Prakash, I. (2019). A comparative assessment of flood susceptibility modeling using Multi-Criteria Decision-Making Analysis and Machine Learning Methods. *Journal of Hydrology*, 573, 311–323. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.073>
- Kim, B., Choi, S. Y., & Han, K.-Y. (2019). Integrated Real-Time Flood Forecasting and Inundation Analysis in Small–Medium Streams. *Water*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/w11050919>
- Kordelas, G. A., Manakos, I., Aragonés, D., Díaz-Delgado, R., & Bustamante, J. (2018). Fast and Automatic Data-Driven Thresholding for Inundation Mapping

- with Sentinel-2 Data. *Remote Sensing*, 10(6), 910. <https://doi.org/10.3390/rs10060910>
- Lee, J. S., Jurkevich, L., Dewaele, P., Wambacq, P., & Oosterlinck, A. (1994). Speckle filtering of synthetic aperture radar images: A review. *Remote Sensing Reviews*, 8(4), 313–340. <https://doi.org/10.1080/02757259409532206>
- Lee, J.-S. (1983). Digital image smoothing and the sigma filter. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 24(2), 255–269. [https://doi.org/10.1016/0734-189X\(83\)90047-6](https://doi.org/10.1016/0734-189X(83)90047-6)
- Leitão, J. P., & Sousa, L. M. de. (2018). Towards the optimal fusion of high-resolution Digital Elevation Models for detailed urban flood assessment. *Journal of Hydrology*, 561, 651–661. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.043>
- López, A. (2018, octubre 27). Dren Álamo es el más dañino para la ciudad de Los Mochis. *El Debate*. Recuperado de <https://www.debate.com.mx/sinaloa/losmochis/dren-alamo-mas-peligroso-los-mochis-estudio-20181027-0006.html>
- López Orozco, J. A., Alcocer Yamanaka, V. H., Rodríguez Varela, J. M., & Albornoz Góngora, P. M. (2012, noviembre). *Modelación Hidráulica Integral, en Dos Dimensiones (2D), en Zonas Urbanas*. Presentado en XXII Congreso Nacional de Hidráulica, Acapulco, Guerrero, México. Recuperado de https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/32430524/442ART_LOJA1.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1546167950&Signature=mPjQjK16zMZMKmrilFy1CdJOaCw%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3D442ART_LOJA1.pdf
- Malinowski, R., Groom, G., Schwanghart, W., & Heckrath, G. (2015). Detection and Delineation of Localized Flooding from WorldView-2 Multispectral Data. *Remote Sensing*, 7(11), 14853–14875. <https://doi.org/10.3390/rs71114853>
- Martinis, S., Kersten, J., & Twele, A. (2015). A fully automated TerraSAR-X based flood service. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 104, 203–212. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.07.014>
- Molero Melgarejo, F. E. (2019). La modelización hidrológica-hidráulica y los sistemas de información geográfica. Recuperado de La Guía Nueva Cultura del Agua website: <https://www.fnca.eu/guia-nueva-cultura-del-agua/>
- Mollaei, Z., Davary, K., Hasheminia, S. M., Faridhosseini, A., & Pourmohamad, Y. (2018). Enhancing flood hazard estimation methods on alluvial fans using an integrated hydraulic, geological and geomorphological approach. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(4), 1159–1171. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1159-2018>
- Moran, M. S., Jackson, R. D., Slater, P. N., & Teillet, P. M. (1992). *Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output*. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(92\)90076-V](https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90076-V)
- NASA, & GOES-R Series Program Office. (2019). *GOES-R Series Data Book*. Recuperado de <https://www.goes-r.gov/downloads/resources/documents/GOES-RSeriesDataBook.pdf>
- Néelz, S., & Pender, G. (2013). Benchmarking the latest generation of 2D hydraulic modelling packages. *Environment Agency: Bristol, UK*.

- Neupane, R. P., & Kumar, S. (2015). Estimating the effects of potential climate and land use changes on hydrologic processes of a large agriculture dominated watershed. *Journal of Hydrology*, 529, 418–429. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.07.050>
- Niazi, M., Nietch, C., Maghrebi, M., Jackson, N., Bennett, B., Tryby, M., & Massoudieh, A. (2017). Storm Water Management Model: Performance Review and Gap Analysis. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, 3(2), 04017002. <https://doi.org/10.1061/JSWBAY.0000817>
- Njoku, E. G. (Ed.). (2014). *Encyclopedia of Remote Sensing*. Recuperado de <https://www.springer.com/gp/book/9780387366982>
- O'Brien, J., & Fullerton, W. (1999). Simulation of Rio Grande floodplain inundation using Flo-2D. En D. M. Finch, J. C. Whitney, J. F. Kelly, & S. R. Loftin (Eds.), *Rio Grande ecosystems: Linking land, water, and people: Toward a sustainable future for the Middle Rio Grande Basin*. (pp. 52–60). Recuperado de <https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/35764>
- OMM/UNESCO. (1974). *Glosario hidrológico internacional*. Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial: Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial.
- Organismo de Cuenca Pacifico Norte. (2017). *Plan Operativo de Inundaciones de la Ciudad de Culiacán, Sinaloa*. (SEMARNAT & CONAGUA, Eds.). Recuperado de <https://mapasin.files.wordpress.com/2017/07/conagua-plan-operativo-de-inundaciones-culiacc3a1n-2017.pdf>
- Organismo de Cuenca Pacifico Norte de la CONAGUA, & SEMARNAT. (2016). *Plan Operativo de Inundaciones de la Ciudad de Los Mochis, Sinaloa*. Recuperado de <https://mapasin.files.wordpress.com/2017/07/conagua-plan-operativo-de-inundaciones-los-mochis-2017.pdf>
- Ortiz-Villanueva, B., & Ortiz-Solorio, C. (1990). *Edafología*. México: Universidad Autónoma Chapingo, Departamentos de Suelos.
- Özer, I. E., Rikkert, S. J. H., van Leijen, F. J., Jonkman, S. N., & Hanssen, R. F. (2019). Sub-seasonal Levee Deformation Observed Using Satellite Radar Interferometry to Enhance Flood Protection. *Scientific Reports*, 9(1), 2646. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39474-x>
- Palafox Ávila, G. (2006). *Riesgo Potencial a Inundaciones en la Ciudad de Guasave, Sinaloa, México* (Tesis para obtener el grado de Maestría en Recursos Naturales y Medio Ambiente, Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional. Unidad Sinaloa). Recuperado de <https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/811?show=full>
- Parkinson, C. L. (2003). Aqua: An Earth-Observing Satellite mission to examine water and other climate variables. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(2), 173–183. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.808319>
- Pedroza González, E., & Hinojosa Cuéllar, G. (2014). *Manejo y distribución del agua en distritos de riego: Breve introducción didáctica* (2° Edición). Recuperado de https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/manejo-dadr/files/assets/common/downloads/publication.pdf

- Perevochtchikova, M., & de la Torre, J. L. (2010). Causas de un desastre: Inundaciones del 2007 en Tabasco, México. *Journal of Latin American Geography*, 9(2), 73–98. <https://doi.org/doi:10.1353/lag.2010.0010>
- Rajyalakshmi, D., Raju, K. K., & Varma, G. P. S. (2016, febrero). *Taxonomy of Satellite Image and Validation Using Statistical Inference*. 352–361. <https://doi.org/10.1109/IACC.2016.72>
- Refice, A., Capolongo, D., Pasquariello, G., D’Addabbo, A., Bovenga, F., Nutricato, R., ... Pietranera, L. (2014). SAR and InSAR for Flood Monitoring: Examples With COSMO-SkyMed Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(7), 2711–2722. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2305165>
- Refice, Alberto, D’Addabbo, A., & Capolongo, D. (Eds.). (2018). *Flood Monitoring through Remote Sensing*. Recuperado de <https://www.springer.com/gp/book/9783319639581>
- Saksena, S., & Merwade, V. (2015). Incorporating the effect of DEM resolution and accuracy for improved flood inundation mapping. *Journal of Hydrology*, 530, 180–194. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.069>
- Salas Salinas, M. A., & Jiménez Espinosa, M. (2004). *Inundaciones* (1 Ed; V. Ramos Radilla, Ed.). Recuperado de <https://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/3-FASCCULOINUNDACIONES.PDF>
- Sánchez Martínez, F. J., & Lastra Fernández, J. (Eds.). (2011). *Guía Metodológica para el Desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables*. Recuperado de https://www.miteco.gob.es/es/agua/publicaciones/guia_metodologica_ZI.aspx
- Sande, C. J. van der, Jong, S. M. de, & Roo, A. P. J. de. (2003). A segmentation and classification approach of IKONOS-2 imagery for land cover mapping to assist flood risk and flood damage assessment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 4(3), 217–229. [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(03\)00003-5](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(03)00003-5)
- Schall, J. D., Thompson, P. L., Zerges, Steve. M., Kilgore, R. T., & Morris, J. L. (2012). *Hydraulic Design of Highway Culverts* (Third Edition). Recuperado de https://www.xmswiki.com/wiki/HY8:Inlet_Configurations
- SCT. (2015). *Isoyetas de Intensidad—Duración—Periodo de Retorno para Sinaloa*. Recuperado de <http://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/isoyetas/>
- SEDENA. (2015). *Conjunto de datos vectoriales escala 1: 100 000 cubrimiento nacional, vegetación* [[Formato Shapefile]]. Recuperado de <http://w1.sedena.gob.mx/dgcart/>
- Senado de la República. (2018, septiembre 27). *Solicitud para la resolución de la: Proposición con punto de acuerdo por el que el Senado de la República exhorta la Secretaría de Hacienda y Crédito Público destine de manera inmediata los recursos financieros para ejecutar el proyecto denominado “Conexión de Dren Juárez al Dren Buenaventura mediante la interconexión de tramos para la colecta de aguas pluviales”*. Recuperado de http://www.senado.gob.mx/64/gaceta_del_senado/documento/83605

- Shapiro, L., & Stockman, G. C. (2002). *Computer Vision* (1st Edition). Prentice Hall.
- Shen, X., Wang, D., Mao, K., Anagnostou, E., & Hong, Y. (2019). Inundation Extent Mapping by Synthetic Aperture Radar: A Review. *Remote Sensing*, 11(7), 879. <https://doi.org/10.3390/rs11070879>
- SIATL-INEGI. (2016). *Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas*. [Software Online]. Recuperado de http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL/#
- Sjodin, B. (2016, abril). *What's The Difference Between FEM, FDM, and FVM?* Presentación Online. Recuperado de <https://www.machinedesign.com/fea-and-simulation/what-s-difference-between-fem-fdm-and-fvm#comments>
- Smith, L. C. (1997). Satellite remote sensing of river inundation area, stage, and discharge: A review. *Hydrological Processes*, 11(10), 1427–1439. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199708\)11:10<1427::AID-HYP473>3.0.CO;2-S](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199708)11:10<1427::AID-HYP473>3.0.CO;2-S)
- Strahler, A. H. (1980). The use of prior probabilities in maximum likelihood classification of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 10(2), 135–163. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(80\)90011-5](https://doi.org/10.1016/0034-4257(80)90011-5)
- Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F. W., Dutta, D., & Kim, S. (2017a). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental Modelling & Software*, 90, 201–216. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.006>
- Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F. W., Dutta, D., & Kim, S. (2017b). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental Modelling & Software*, 90, 201–216. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.006>
- Toledo González, J. F. (2012). *Manifestación de Impacto Ambiental. Modalidad Particular (25SI2012HD028)—Entubamiento del dren colector pluvial Mochis, tramo del km 5+724.75 al km 6+763.85, y construcción de estructuras complementarias*. Recuperado de <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/sin/estudios/2012/25SI2012HD028.pdf>
- Uribe-Alcántara, E. M., Montes-León, M. A. L., & García-Celis, E. (2010). Mapa Nacional de Índice de Inundación. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 1, 73–85.
- U.S. Army Corps of Engineers. (1981). Chapter 3. Rainfall –runoff simulation. En *HEC-1 Flood Hydrograph Package* (pp. 8–42). Davis, California, USA: Hydrologic Engineering Center.
- Valero Medina, J. A., & Alzate Atehortúa, B. E. (2019). Comparison of maximum likelihood, support vector machines, and random forest techniques in satellite images classification. *Tecnura*, 23(59), 3–10.
- van der Sande, C. J., de Jong, S. M., & de Roo, A. P. J. (2003). A segmentation and classification approach of IKONOS-2 imagery for land cover mapping to assist flood risk and flood damage assessment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 4(3), 217–229. [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(03\)00003-5](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(03)00003-5)
- Veci, L. (2015a). *SENTINEL-1 Toolbox. Polarimetric Tutorial*. Recuperado de <http://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20Polarimetry%20Tutorial.pdf>

- Veci, L. (2015b). *SENTINEL-1 Toolbox. TOPS Interferometry Tutorial*. Recuperado de <https://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20TOPSAR%20Interferometry%20with%20Sentinel-1%20Tutorial.pdf>
- Verpoorter, C., Kutser, T., & Tranvik, L. (2012). Automated mapping of water bodies using Landsat multispectral data. *Limnology and Oceanography: Methods*, 10(12), 1037–1050. <https://doi.org/10.4319/lom.2012.10.1037>
- Wu, H., Adler, R. F., Tian, Y., Huffman, G. J., Li, H., & Wang, J. (2014). Real-time global flood estimation using satellite-based precipitation and a coupled land surface and routing model. *Water Resources Research*, 50(3), 2693–2717. <https://doi.org/10.1002/2013WR014710>
- Yang, L., & Cervone, G. (2019). Analysis of remote sensing imagery for disaster assessment using deep learning: A case study of flooding event. *Soft Computing*. <https://doi.org/10.1007/s00500-019-03878-8>
- Yoo, C., Jun, C., & Park, C. (2015). Effect of Rainfall Temporal Distribution on the Conversion Factor to Convert the Fixed-Interval into True-Interval Rainfall. *Journal of Hydrologic Engineering*, 20(10), 04015018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001178](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001178)
- Zamorano García, C. (2003). *Propuesta de un Sistema para el Seguimiento de la Norma Establecida en la Elaboración de Proyectos de Servicios Públicos para Fraccionamientos en la Ciudad de los Mochis, Sinaloa* (Investigación para obtener el grado de “Maestro en Administración de la Construcción”, Instituto Tecnológico de la Construcción A.C.). Recuperado de https://infonavit.janium.net/janium/TESIS/Maestria/Zamorano_Garcia_Cuahutemoc_45118.pdf