

Revisión de literatura del vínculo entre crecimiento urbano y las inundaciones (agosto 2020).

Autor: Fidel Serrano Candela

Tabla de contenido

1.	Metodología para la selección de las publicaciones	3
2.	Descripción de los casos de estudio	5
2.1	La urbanización como factor que modifica los patrones de inundaciones	5
2.2	La gravedad de desarrollos urbanos en zonas inundables	8
2.3	Comparaciones entre modelos de inundación urbana	9
3.	Modelos más usados	10
3.1	Urbanización	10
3.1.1	SLEUTH.....	10
3.1.2	Dinámica-EGO.....	10
3.2	Esorrentía e inundaciones.....	10
3.2.1	Curva Numérica (SCS)	10
3.2.2	MODCEL.....	11
3.2.3	IBER	11
3.2.4	SWMM	12
4.	Conclusiones.....	13
	Bibliografía.....	14

1. Metodología para la selección de las publicaciones

Herramientas de búsqueda de publicaciones científicas:

- Publish or Perish
- Google Scholar

Combinación de palabras clave usadas en la búsqueda:

- Urbanization flooding model
- Flooding urban model
- Urban floods model
- Urbanization flooding
- Urban flooding

Criterios de selección:

- Alto número de citas o citas por año
- Que los casos de estudio fueran diversos para incluir casos de estudio en países en desarrollo con datos escasos y poder analizar las estrategias en esos casos y no solo en los países desarrollados con datos accesibles y confiables.

Obtuve 32 artículos de los cuales seleccioné 19 que se ajustaban mejor al interés de esta revisión de literatura.

En la **Tabla 1** se muestran las publicaciones que analicé, el lugar del caso de estudio, el periodo de análisis y los modelos involucrados.

Tabla 1 Publicaciones y sus modelos

Artículo	Lugar	Tipo de territorio	Período de análisis	Modelo de escorrentia-inundación	Modelo de urbanización
(Moe et al., 2017)	Jakarta, Indonesia	Ciudad costera con río	2010-2050	(Kure et al., 2008)	SLEUTH
(Votsis, 2017)	Helsinki, Finlandia	Ciudad costera con río	2010-2040	Mapas de riesgo a inundaciones	SLEUTH
(Sekovski et al., 2015)	Costa Emilia-Romagna, Italia	Costa con varias ciudades y varios ríos	2011-2050	Mapas históricos de mareas altas en tormentas	SLEUTH
(García & Loáiciga, 2014)	San Diego- Tijuana	Ciudad costera con río	2010-2050	HEC-RAS	SLEUTH
(Miguez et al., 2017)	Barcelona, España	Ciudad costera con río	Histórico (2005-2006)	MODCEL, SWMM	---
(Nardini et al., 2018)	Riohacha, Colombia	Ciudad costera con río	Histórico (2011)	MODCEL, IBER	---
(Miguez et al., 2015)	Rio de Janeiro, Brasil	Ciudad costera con río y un pueblo río arriba	Futuro ambiguo	MODCEL	Plan maestro de la ciudad
(Fernández & Lutz, 2010)	San Miguel de Tucumán, Argentina	Ciudad interior con río	Histórico (2007-2008)	AHP	---
(Areu-Rangel et al., 2019)	Villahermosa, México	Ciudad con río cerca de la costa	2010-2050	IBER	Arbitrario
(Löwe et al., 2017)	Melburne, Australia	Ciudad costera con río	2010-2060	MIKE FLOOD (ArcMap)	DAnCE4Water
(Han et al., 2020)	Cuenca del río Yangtze	Cuenca con un gran río que desemboca al mar	Histórico (1990-2014)	---	---
(Al-Ghamdi, 2012)	Mecca, Arabia Saudita	Ciudad interior sin río	Histórico (1990-2010)	Curva Numérica (SCS)	---
(Pumo et al., 2017)	Baron Fork at Eldon, Estados Unidos	Cuenca interior con río	2010-2110	tRibs	Desarrollo propio
(Wang et al., 2020)	Beijing, China	Ciudad con río cerca de la costa	Histórico (1980-2015)	VIC	---
(Pérez-Molina et al., 2017)	Kampala, Uganda	Ciudad en la costa de un lago	2015-2020	openLISEM	Desarrollo propio
(Ahmed et al., 2018)	Dhaka, Bangladesh	Ciudad en el delta de un gran río	2014-2035	SOBEK	Dinamica-EGO
(Campana, N. A.; Tucci, 2001)	Porto Alegre, Brazil	Ciudad costera con río	Futuro ambiguo	IPH IV	Plan maestro de la ciudad
(Du et al., 2015)	Delta del Río Pearl	Delta de un gran río	1990-2030	Curva Numérica (SCS)	Desarrollo propio
(Huong & Pathirana, 2013)	Can Tho, Vietnam	Ciudad a la orilla de un río cerca de la costa	1989-2100	SWMM-Brezo	Dinamica-EGO

2. Descripción de los casos de estudio

En las publicaciones que analicé hay una diversidad de formas para enfrentar el problema de las inundaciones y su relación con la urbanización. Algunos utilizan modelos muy complejos para simular las inundaciones usando como insumo las escorrentías y modelando el flujo dentro los conductos del drenaje, mientras que otros solo calculan la diferencia en escorrentía dado un escenario de uso de suelo u otro. Algunos tienen modelos prospectivos del cambio de uso de suelo, en algunos casos incluyendo políticas públicas dentro de la simulación, mientras que otros solo analizan las relaciones históricas entre las inundaciones y la urbanización.

Para describir las publicaciones que consulté las dividiré en tres categorías, las que estudian cómo la urbanización modifica los patrones de inundaciones y los que analizan la gravedad de nuevos desarrollos urbanos en zonas inundables, y las que comparan modelos de inundación urbana entre sí.

2.1 La urbanización como factor que modifica los patrones de inundaciones

Entre los que analizan como la urbanización modifica los patrones de inundación están los que estudian el fenómeno históricamente como: **a) Al-Ghamdi (2012)** que analiza la relación entre el crecimiento urbano y las escorrentías en la ciudad La Meca en Arabia Saudita, considerando dos escenarios históricos de uso de suelo, uno de 1990 y otro de 2010, para estimar el volumen de escorrentía para una tormenta de retorno de 50 años. Concluyendo que la urbanización es la mayor causa del aumento en la escorrentía ya que la mayor parte de la urbanización se da sobre sedimentos reduciendo la infiltración; y **b) Wang et al. (2020)** que estudian la influencia de la urbanización y el cambio climático en la escorrentía en la ciudad China de Beijing en el periodo 1980-2015. Utilizando un modelo hidráulico llamado VIC y mapas de urbanización obtenidos a partir de imágenes Landsat para concluir que la urbanización es el factor dominante en el aumento de escorrentías en Beijing.

Por otro lado, están los que estudian como la urbanización futura podría modificar los patrones o la intensidad de las inundaciones como: **a) Moe et al. (2017)** que simulan las inundaciones en Yakarta, Indonesia, con una combinación de escenarios considerando la subsidencia y el cambio de uso de suelo. Utilizando el modelo SLEUTH para el cambio de uso de suelo y un modelo de físico de inundaciones que contiene 3 módulos, uno para las escorrentías de las subcuencas, un modelo hidrodinámico de una dimensión para la red de ríos, y un modelo de inundaciones de dos dimensiones para las superficies inundables. Reportan el incremento en inundaciones con el volumen total anual. Y concluyen que el

efecto de la urbanización es más importante que el de la subsidencia; **b) Miguez et al. (2015)** que analizan dos alternativas de infraestructura de contención de inundaciones al ponerlas a prueba bajo tres escenarios de urbanización en una parte de la ciudad brasileña de Rio de Janeiro. Las dos alternativas de infraestructura son: una tradicional con un canal rectangular de concreto más grande para encausar la escorrentía, y otra más distribuida con pequeños reservorios y parques inundables. Y los tres escenarios de urbanización que usan son: uno basado en el plan maestro urbano de Duque de Caxias, otro basado en el mismo plan maestro, pero limitando la superficie impermeable y un tercero de saturación que urbaniza todas las superficies urbanizables. Utilizan el modelo de inundaciones MODCEL y concluyen que con un costo similar de construcción la alternativa más distribuida que considera los principios de drenaje sostenible se desempeña mejor. Pero que si no se limita la impermeabilización del suelo se reduce su efectividad. En la alternativa de un canal rectangular se hace notar que, aunque resuelve localmente aumenta la escorrentía río abajo y pone en riesgo zonas que antes no lo estaban, además de que para eventos de 50 años de retorno o más se sobrepasa su capacidad y se inunda gravemente la zona. Además, concluyen que MODCEL muestra su virtud al permitir incluir diferentes alternativas de infraestructura para el cálculo de inundaciones futuras; **c) Campana, N. A.; Tucci (2001)** que simulan el efecto de la urbanización planeada en el plan maestro de la ciudad de Porto Alegre Brasil. Utilizando tres escenarios de urbanización: el histórico de 1980, el histórico de 1990 y un escenario basado en el plan maestro de la ciudad de Porto Alegre. Para modelar las inundaciones usan un modelo hidrológico-hidrodinámico que calcula la escorrentía en las partes altas y rurales y luego calcula los flujos en los canales del drenaje ya en la ciudad. El modelo se llama IPH IV y fue desarrollado en el instituto de investigaciones hidráulicas en la universidad federal de Rio Grande do Sul en Brasil. Utilizan tormentas de retorno de 2, 5, 10 y 25 años para las simulaciones y concluyen que de seguirse el plan maestro de la ciudad de Porto Alegre se esperan picos de flujo en la ciudad entre 20-50% superiores al escenario de urbanización de 1980; **d) Areu-Rangel et al. (2019)** que analizan la relación de la urbanización y los cambios de uso de suelo en las partes altas de la cuenca de Villahermosa Tabasco. Para los escenarios de crecimiento urbano toman la tasa de crecimiento poblacional y posicionan arbitrariamente el crecimiento en el territorio en 3 diferentes escenarios. Para las escorrentías calculan el número de curva promedio para las subcuencas utilizando las series de uso de suelo y vegetación de INEGI de la 1 a la 5. Y utilizan el modelo de inundaciones IBER con tormentas de tiempo de retorno de 5 10 25 50 y 100 años. Concluyen que los cambios de uso de suelo en las cuencas son el mayor factor de aumento de profundidad en las inundaciones y que el crecimiento urbano juega un papel menor; **e) Ahmed et al. (2018)** que analizan la relación de la urbanización y el cambio climático en la gravedad de las inundaciones en Dhaka, Bangladesh. Utilizan Dinámica-EGO para modelar el crecimiento urbano, SOBEK para modelar las inundaciones urbanas y una combinación de escenarios de cambio climático para estimar el aumento en el caudal de los ríos y en el nivel del mar. Usan una tormenta real que ocurrió en 2004 con 340 mm de precipitación en un día para todas las simulaciones de inundación. Y concluyen el efecto del cambio climático es mayor que el de la urbanización no planeada; **f) Pumo et al. (2017)** que analizan la relación entre el crecimiento urbano y el cambio climático con la

escorrentía, usan un modelo estocástico de generación de clima (precipitación por hora entre otras) y un modelo de crecimiento urbano que es probabilístico y basado en autómatas celulares que desarrollaron ellos mismos y dicen que tiene la ventaja de poderle dar como parámetro la cantidad de superficie que debe crecer. Para modelar la escorrentía usan tRIBS. Corren una gran cantidad de experimentos y concluyen que para su zona de estudio que fue Baron Fork at Eldon y Peacheater Creek at Christie en Oklahoma (USA) el cambio climático tiene un mayor impacto que la urbanización y que los cambios en cuencas pequeñas son mayores que en cuencas grandes; **g) Huong & Pathirana (2013)** que trata sobre los posibles agravantes en el futuro de las inundaciones en Can Tho Vietnam. Analizan tres agravantes: cambio climático global, cambio climático local debido a la urbanización y cambios de uso de suelo. Utilizan los modelos WRF-Noah para analizar el cambio de clima local debido a la urbanización, SWMM- Brezo para modelar el flujo en los tubos y canales de drenaje y el flujo superficial acopladamente, y Dinámica-EGO para modelar el crecimiento urbano. Además, incluyen estimaciones de estudios previos de los caudales en el río Mekong dados ciertos escenarios de cambio climático. Con respecto al cambio en el clima local debido a la urbanización concluyen que, para tormentas severas de más de 40 mm de precipitación, el cambio podría ser de hasta 10% más precipitación. Para las inundaciones afectadas por la urbanización concluyen que en 2050 para un evento como el de 2009, la profundidad máxima de las inundaciones podría aumentar en 20% (18cm) y el área inundada aumentaría en 18%. Para las inundaciones dado un aumento del nivel del mar de 100 cm (predicción para 2100) estimaron que la profundidad máxima de sería 60% mayor. Y para los efectos combinados del cambio climático y cambio de uso de suelo estimaron que la profundidad máxima sería 80% mayor, para un total de 1.51 m; **h) Pérez-Molina et al. (2017)** que simulan las inundaciones futuras utilizando un modelo de crecimiento urbano basado en autómatas celulares que ellos desarrollan y que considera la cercanía al centro y a los subcentros de actividad económica entre otros factores. Para modelar las inundaciones usan en modelo openLISEM. El objetivo del estudio fue estimar la eficacia de la política pública de restringir la urbanización en humedales y según sus resultados, dadas las tendencias, la política pública resulta ineficaz para la ciudad de Kampala, Uganda; **i) Du et al. (2015)** que estudian la correlación entre el cambio de uso de suelo y la incidencia de inundaciones en la región del delta del Río Pearl en China. Primero analizando la correlación de 1990 a 2010 y luego en el futuro aplicando un modelo de cambio de uso de suelo que ellos mismos desarrollan para incluir la “New Land Administration Law” (NLAL) establecida en china en 1999 que obliga a que todo desarrollo urbano que se haga sobre tierras agrícolas debe conllevar el remplazo de esas tierras agrícolas en alguna otra parte. Para modelar la escorrentía usan el método de la curva numérica del Soil Conservation Service de Estados Unidos. Desarrollan 3 escenarios de cambio de uso de suelo, uno tendencial con la urbanización y las nuevas tierras agrícolas de remplazo siguiendo la tendencia actual, otro con la urbanización siguiendo la tendencia actual, pero sin crear nuevas tierras agrícolas de remplazo, y un tercero que cambia la tendencia de urbanización por una más compacta y tampoco remplace tierras agrícolas. Para analizar la relación entre la incidencia de inundaciones y el cambio de uso de suelo, calculan las escorrentías de las subcuencas dados los mapas históricos de uso de suelo y calculan el coeficiente de correlación de

Pearson entre escorrentías calculada e inundaciones registradas y encuentran que, si están significativamente correlacionados. De manera similar para la correlación entre cambio de uso de suelo e incidencia de inundaciones encuentran una correlación significativa. Al calcular las escorrentías asociadas a los 3 escenarios de cambio de uso de suelo concluyen que en el escenario tendencial habría un incremento de 9% en la escorrentía total mientras que en los otros dos sería mucho menor el aumento; **j) Löwe et al. (2017)** que analizan 32 combinaciones de estrategias de adaptación y 9 distintos escenarios de urbanización en Melbourne, Australia. Para los escenarios de urbanización utilizan DANCE4Water que es un modelo basado en agentes que simula la evolución urbana a nivel parcela, es decir, modela como se separan parcelas grandes en varias más pequeñas o al revés como varias parcelas pequeñas se unen para desarrollar edificaciones mayores. Para las inundaciones usan un módulo de ArcMap llamado MIKE FLOOD que integran con los distintos escenarios de urbanización. Las estrategias de adaptación que usan son: 1) el plan maestro sensible al agua que consiste en encausar la urbanización hacia una urbanización más compacta con edificios de departamentos y cuadras con negocios, a diferencia de la tendencia que es hacer casas individuales en nuevos lotes; 2) Agrandar los tubos del drenaje; 3) Zonificar las zonas con mayor riesgo a inundaciones e ir comprando a los dueños para deshabilitar esas casas; y 4) Captación de agua de lluvia. Y hacen todas las combinaciones posibles entre esas estrategias. Los resultados muestran para su caso de estudio que agrandar tubos, el plan maestro sensible al agua y comprar paulatinamente las propiedades en zonas de riesgo a inundaciones, son las mejores estrategias mientras que la captación de agua de lluvia mejora solo marginalmente las inundaciones.

2.2 La gravedad de desarrollos urbanos en zonas inundables

Las publicaciones que analizan la gravedad de desarrollos urbanos en zonas inundables también se pueden dividir entre las que lo hacen analizando patrones históricos y las que utilizan modelos prospectivos para estudiar posibles consecuencias en el futuro.

En esta categoría y que se limitan a hacer un análisis histórico solo consulte una publicación: **a) Han et al. (2020)** que analizan los modos de crecimiento urbano en la cuenca del río Yangtzé en China y su correlación con las inundaciones. Clasifican los modos de crecimiento en tres clases: crecimiento en los bordes de lo ya urbanizado, nuevas manchas urbanas no conexas con lo previamente urbanizado y crecimiento interno o sea densificación. Hacen un análisis estadístico entre los modos de crecimiento urbano y los registros de inundaciones en el periodo 1992-2015. Y concluyen que las nuevas manchas urbanas no conexas con las urbanizaciones previas tienen una mayor correlación con la incidencia de inundaciones, seguidas por el crecimiento de borde. La densificación por otro lado no muestra una alta correlación con la incidencia de inundaciones.

Mientras que las que analizan el problema en el futuro con esfuerzos de modelación están: **a) Votsis (2017)** que simula el crecimiento urbano en Helsinki, Finlandia, usando SLEUTH, agregando la probabilidad de inundaciones en la capa de exclusión para producir escenarios. Curiosamente asocia la probabilidad de inundaciones con un menor valor de mercado y por consecuencia una restricción para el crecimiento (en ciudades como la CDMX es totalmente al revés, es decir un valor reducido, aunque implique mayor riesgo incentiva el crecimiento). Utiliza tres escenarios de urbanización: uno tendencial, uno que reduce el crecimiento en zonas inundables y otro reduce el crecimiento en zonas inundables y favorece el crecimiento en zonas seguras. Concluye que políticas públicas flexibles que se ajusten al comportamiento del mercado tienen resultados similares en la reducción del riesgo que las políticas públicas de prohibición total en ciertas zonas, pero sin el costo económico que suponen estas últimas; **b) Sekovski et al. (2015)** que simulan el crecimiento urbano en la región Emilia-Romagna en Italia y analizan las consecuencias dado un mapa de riesgo a inundaciones establecido. Para simular el crecimiento urbano usan SLEUTH, hacen distintos escenarios modificando la capa de exclusión y los coeficientes de SLEUTH. Las inundaciones solo tienen que ver con agua que viene del mar, es decir no se toman en cuenta las escorrentías y por lo tanto no hay una retroalimentación del crecimiento urbano en las inundaciones. Concluyen que, si el crecimiento urbano se da de manera compacta que es lo más probable, el área urbana inundable para 2050 podría aumentar hasta el doble de la actual; **c) Garcia & Loáiciga (2014)** que calculan el daño anual esperado en función del aumento del nivel del mar y de la urbanización, para la urbanización usan SLEUTH, para el aumento del nivel del mar usan los modelos del IPCC y para los volúmenes esperados en el río Tijuana utilizan un estudio previo. Utilizan dos escenarios de crecimiento urbano: uno en el que los nuevos desarrollos urbanos se dan solo sobre tierra privada, y otro que se dan en tierras públicas y privadas. Utilizan el modelo HEC-RAS para calcular las zonas de inundación para tormentas con periodo de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años y con esas zonas de inundación e información catastral detallada calculan en costo en millones de dólares dado un escenario de crecimiento urbano y un incremento del nivel del mar. Y concluyen que la urbanización es el factor dominante en la determinación del costo de las pérdidas materiales.

2.3 Comparaciones entre modelos de inundación urbana

En esta categoría analicé dos publicaciones: **a) Miguez et al. (2017)** que comparan MODCEL y SWMM aplicándolos para una zona específica de Barcelona, y a unos datos de prueba propuestos por la British Environmental Agency. Al hacer la comparación de resultados para los datos de prueba de referencia, entre aplicar SWMM o MODCEL concluyen que los resultados son muy similares pero el costo computacional de correr MODCEL es mucho menor al tener solo 163 celdas contra los 97,000 elementos que requirió SWMM para modelar el mismo evento; **b) Nardini et al. (2018)** que comparan IBER con MODCEL en la ciudad de Riohacha en Colombia. Para la comparación utilizan un evento específico para calibrar y otro para validar. Los autores concluyen que IBER

representa satisfactoriamente las inundaciones urbanas en Riohacha, pero MODCEL fue mejor en la comparación. Los autores dicen que es posible que la razón de que MODCEL fuera mejor es que IBER necesita información topográfica detallada que no tenían. También mencionan que la interfaz de usuario de IBER es más amigable que la de MODCEL.

3. Modelos más usados

3.1 Urbanización

3.1.1 SLEUTH

SLEUTH es un modelo de crecimiento urbano basado en autómatas celulares que simula la urbanización del futuro basado en series de tiempo de la urbanización histórica junto con datos de pendiente caminos y carreteras y zonas de exclusión.

SLEUTH es un modelo ampliamente difundido con casos de estudio en todos los continentes y aunque no se puede decir que sea el estándar si es el modelo de crecimiento urbano mas usado en el mundo.

SLEUTH fue desarrollado por Dr. Keith Clarke del Department of Geography, UC Santa Barbara.

3.1.2 Dinámica-EGO

Dinámica EGO es un programa libre creado para para el análisis ambiental y la dinámica de paisajes, que permite la creación de tendencias futuras a partir de un auto-entrenamiento utilizando mapas previos de distintos factores. Uno de los usos mas comunes es la creación de escenarios de urbanización

Dinámica EGO fue desarrollado en el Instituto de Geociencias de La Universidade Federal de Minas Gerais en Brasil.

3.2 Escorrentía e inundaciones

3.2.1 Curva Numérica (SCS)

El método de la curva numérica consiste en la estimación de la escorrentía para un evento de lluvia específica dadas las características del suelo en una cuenca y de su cobertura. Las

ecuaciones se desarrollaron empíricamente para asociar a cada tipo de suelo y cobertura natural o urbana coeficientes de infiltración y flujo superficial.

Este método ha sido usado en una gran variedad de cuencas alrededor de todo el mundo y se podría decir que es el estándar para calcular la escorrentía superficial.

El método de la curva numérica fue desarrollado por el *USDA Natural Resources Conservation Service* de Estados Unidos, que originalmente se llamaba *Soil Conservation Service (SCS)* por lo cual el método es conocido popularmente como el método de la curva numérica del SCS.

3.2.2 MODCEL

MOCEL es un modelo de inundaciones basado en unidades geográficas poligonales que comparten ciertas propiedades que ellos llaman celdas. El modelo tiene la virtud de usar ecuaciones de una dimensión para modelar el flujo, pero incluir conexiones entre distintas partes del sistema (celdas) de modo que los resultados son parecidos a los modelos que resuelven ecuaciones de flujo en dos dimensiones como SWMM.

El modelo tiene los siguientes tipos de celdas:

- Ríos o canales
- Tubos de drenaje
- Superficies urbanas
- Superficies naturales
- Reservorios

El modelo usa ecuaciones de una dimensión tanto para simular el comportamiento del agua en cada celda como para las conexiones entre celdas, lo cual hace que el modelo sea muy eficiente en términos de recursos computacionales. La dificultad para implementar este modelo en casos específicos es que requiere crear manualmente cada uno de los elementos que componen la red de drenaje y cada celda urbana o natural.

MODCEL fue desarrollado en la Universidade Federal do Rio de Janeiro.

3.2.3 IBER

IBER es un modelo 2D “físico” de inundaciones que resuelve las ecuaciones de Saint-Venant en dos dimensiones sobre una malla no estructurada triangular o cuadrada. Las aplicaciones de IBER incluyen:

- Hidrodinámica de ríos
- Simulaciones de ruptura de presas

- Evaluación de zonas de inundación
- Cálculo de transporte de sedimentos
- Cálculo de flujo de marea en estuarios

La dificultad para implementar IBER en casos específicos es que requiere de información topográfica de alta resolución.

IBER fue desarrollado por el Instituto Flumen y CIMNE de la Universidad Politécnica de Cataluña y GEAMA de la universidad de la coruña.

3.2.4 SWMM

SWMM es un modelo de inundaciones urbanas en dos dimensiones, que tiene la capacidad de modelar una diversidad de elementos en una red drenaje. Sus capacidades específicas incluyen:

- Manejar redes de drenaje de cualquier tamaño
- Usar una gran variedad de canales abiertos o cerrados, incluso canales naturales
- Modelar elementos especiales como unidades de tratamiento de agua divisores de flujo, bombas, diques, y orificios.
- Aplicar flujos externos y escorrentías considerando la calidad de agua, flujos subterráneos, infiltración que depende de la precipitación y flujos basales en temporada de estiaje.
- Utiliza ya sea mareas cinéticas o dinámica completa de flujos de marea para determinar las rutas del flujo de agua.

La variabilidad espacial de estos procesos es manejada mediante una subdivisión del espacio en subcuencas homogéneas, cada una con sus propiedades de infiltración y superficie impermeable. El flujo superficial puede ir entre subcuencas o hacia puntos de entrada del drenaje.

La dificultad para usar SWMM es que requiere información detallada del sistema de drenaje y sus componentes y propiedades.

SWMM fue desarrollado por la Environmental Protection Agency de Estados Unidos.

4. Conclusiones

Entre las publicaciones que analizan la urbanización como factor que modifica los patrones de inundación, hay resultados contrastantes, algunos concluyen que en sus casos de estudio la urbanización es el factor dominante que causa un aumento en las inundaciones (Al-Ghamdi, 2012), (Wang et al., 2020), (Moe et al., 2017), mientras que otros le atribuyen la mayor influencia en las inundaciones a otros factores como el cambio de uso de suelo en las partes altas de las cuencas (Areu-Rangel et al., 2019), (Du et al., 2015) o al cambio climático (Ahmed et al., 2018), (Pumo et al., 2017), (Huong & Pathirana, 2013).

Los modelos de inundación más avanzados incluyen tres partes: una de cálculo de escorrentías generalmente modelada mediante el método de curva numérica (SCS), otra de cálculo de saturación de canales y tubos de drenaje generalmente modelados con ecuaciones de una dimensión y una tercera de cálculo de superficies inundadas a partir de los puntos de saturación del drenaje generalmente modelados con ecuaciones en dos dimensiones.

Todos los estudios que simulan inundaciones toman como referencia tormentas de diseño con un periodo de retorno entre 2 y 100 años o un evento histórico específico. Y algunos dan un paso extra al calcular estimaciones anuales de daños o de volumen total (Moe et al., 2017), (Garcia & Loáiciga, 2014).

Algo que es común a todas las publicaciones que consulté es que tanto los analizan el problema con datos históricos como los que utilizan modelos para analizar la evolución del problema en el futuro, concuerdan en que las inundaciones urbanas son un fenómeno que va en aumento.

Hay una tendencia a analizar posibles estrategias para enfrentar el creciente problema de las inundaciones urbanas dentro los de esfuerzos de modelación, ya sea en el desarrollo de escenarios de urbanización o en la modelación hidrodinámica de inundaciones con diferentes propuestas de infraestructura.

Las publicaciones que analicé abarcan una gran variedad de casos de estudio, sin embargo, ninguna de ellas tiene una cuenca endorreica modificada como la de la Ciudad de México.

Bibliografia

- Ahmed, F., Moors, E., Khan, M. S. A., Warner, J., & Terwisscha van Scheltinga, C. (2018). Tipping points in adaptation to urban flooding under climate change and urban growth: The case of the Dhaka megacity. *Land Use Policy*, 79(May), 496–506. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.05.051>
- Al-Ghamdi, K. (2012). Impacts of urban growth on flood hazards in Makkah City, Saudi Arabia. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 4(February), 23–34. <https://doi.org/10.5897/IJWREE11.128>
- Areu-Rangel, O. S., Cea, L., Bonasia, R., & Espinosa-Echavarria, V. J. (2019). Impact of urban growth and changes in land use on river flood hazard in Villahermosa, Tabasco (Mexico). *Water (Switzerland)*, 11(2), 1–15. <https://doi.org/10.3390/w11020304>
- Campana, N. A.; Tucci, C. E. M. (2001). Predicting floods from urban development scenarios: case study of the Diluvio Basin. *Urban Water*, 3, 113–114.
- Du, S., van Rompaey, A., Shi, P., & Wang, J. (2015). A dual effect of urban expansion on flood risk in the Pearl River Delta (China) revealed by land-use scenarios and direct runoff simulation. *Natural Hazards*, 77(1), 111–128. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1583-8>
- Fernández, D. S., & Lutz, M. A. (2010). Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Engineering Geology*. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.12.006>
- Garcia, E. S., & Loáiciga, H. A. (2014). Sea-level rise and flooding in coastal riverine flood plains. *Hydrological Sciences Journal*, 59(1), 204–220. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.798660>
- Han, Y., Huang, Q., He, C., Fang, Y., Wen, J., Gao, J., & Du, S. (2020). The growth mode of built-up land in floodplains and its impacts on flood vulnerability. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134462>
- Huong, H. T. L., & Pathirana, A. (2013). Urbanization and climate change impacts on future urban flooding in Can Tho city, Vietnam. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(1), 379–394. <https://doi.org/10.5194/hess-17-379-2013>
- Löwe, R., Urich, C., Sto. Domingo, N., Mark, O., Deletic, A., & Arnbjerg-Nielsen, K. (2017). Assessment of urban pluvial flood risk and efficiency of adaptation options through simulations – A new generation of urban planning tools. *Journal of Hydrology*, 550, 355–367. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.05.009>
- Miguez, M. G., Battemarco, B. P., de Sousa, M. M., Rezende, O. M., Veról, A. P., & Gusmaroli, G. (2017). Urban flood simulation using MODCEL-an alternative quasi-2D conceptual model. *Water (Switzerland)*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/w9060445>
- Miguez, M. G., Rezende, O. M., & Veról, A. P. (2015). City growth and urban drainage alternatives: Sustainability challenge. *Journal of Urban Planning and Development*, 141(3), 1–10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)UP.1943-5444.0000219](https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000219)
- Moe, I. R., Kure, S., Januriyadi, N. F., Farid, M., Udo, K., Kazama, S., & Koshimura, S. (2017). Future projection of flood inundation considering land-use changes and land subsidence in Jakarta, Indonesia. *Hydrological Research Letters*, 11(2), 99–105. <https://doi.org/10.3178/hrl.11.99>

- Nardini, A., Mercado, L. C., & Montiel, J. P. (2018). MODCEL vs. IBER: a comparison of flooding models in Riohacha, a coastal town of La Guajira, Colombia. *Contemporary Engineering Sciences*, 11(66), 3253–3266. <https://doi.org/10.12988/ces.2018.87336>
- Pérez-Molina, E., Sliuzas, R., Flacke, J., & Jetten, V. (2017). Developing a cellular automata model of urban growth to inform spatial policy for flood mitigation: A case study in Kampala, Uganda. *Computers, Environment and Urban Systems*, 65, 53–65. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.04.013>
- Pumo, D., Arnone, E., Francipane, A., Caracciolo, D., & Noto, L. v. (2017). Potential implications of climate change and urbanization on watershed hydrology. *Journal of Hydrology*, 554, 80–99. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.002>
- Sekovski, I., Armaroli, C., Calabrese, L., Mancini, F., Stecchi, F., & Perini, L. (2015). Coupling scenarios of urban growth and flood hazards along the Emilia-Romagna coast (Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(10), 2331–2346. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-2331-2015>
- Votsis, A. (2017). Utilizing a cellular automaton model to explore the influence of coastal flood adaptation strategies on Helsinki's urbanization patterns. *Computers, Environment and Urban Systems*, 64, 344–355. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.04.005>
- Wang, Y., Xie, X., Liang, S., Zhu, B., Yao, Y., Meng, S., & Lu, C. (2020). Quantifying the response of potential flooding risk to urban growth in Beijing. *Science of the Total Environment*, 705(xxxx), 135868. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135868>