

LOS EFECTOS DE LOS HUNDIMIENTOS DE LA ZONA ORIENTE DEL VALLE DE MÉXICO SOBRE LOS PATRONES HIDROLÓGICOS

*Mendoza Ramos Cynthia Lizette¹
Galván Fernández María Antonina²
Escobedo Guerrero Gabriela Guadalupe*

RESUMEN

El hundimiento progresivo de la Zona Oriente del Valle de México presenta patrones que son asociables a los depósitos aluviales desarrollados por las corrientes hídricas que llegaban al sistema de lagos; se identifican principalmente dos tipos: depósitos lineales producto de la llegada de las corrientes a la zona lagunar, y los depósitos en mancha, producto de los depósitos aluviales dentro del lago. La composición de estos sedimentos presenta tasas de compactación diferentes a los que le rodean, debido a la presencia de materia orgánica. Estos procesos de compactación de orden semi profundo a superficial afectan a la infraestructura urbana como drenaje, agua potable, alcantarillado, pavimentos y al patrimonio de los habitantes al afectar viviendas. Como segunda parte de la problemática, el arrastre de sedimentos hacia las zonas más bajas se ha incrementado debido al crecimiento de la mancha urbana y eliminación de la vegetación. Resulta así que la relación erosión-hundimiento modifica los patrones hidrológicos de la zona, y con ello demanda una política pública especialmente dirigida al manejo ambiental de la zona.

Palabras clave: evaluación de escurrimientos, análisis hidrológico

ABSTRAC

The progressive sinking of the Eastern Zone of the Valley of Mexico presents patterns that are associable to the alluvial deposits developed by the water currents that reached the lake system; two types are mainly identified: linear deposits resulting from the arrival of currents to the lagoon area, and spot deposits, product of alluvial deposits within the lake. The composition of these sediments has different compaction rates than those around it, due to the presence of organic matter. These semi-deep to superficial compaction processes affect urban infrastructure such as drainage, drinking water, sewage, pavements and the assets of the inhabitants by affecting housing. As a second part of the problem, the dragging of sediments to the lower areas has increased due to the growth of the urban spot and the elimination of vegetation. It turns out that the erosion-sinking relationship modifies the hydrological patterns of the area, and thus demands a public policy especially aimed at the environmental management of the area.

Key words: runoff evaluation, hydrological analysis

¹ Ingeniera Hidróloga. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa. Ciencias Básicas e Ingeniería.

² Doctora en Ciencias. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa. Ciencias Básicas e Ingeniería. Ing. Hidrológica. Correo electrónico: lorlalalik@gmail.com

INTRODUCCIÓN

La Cuenca del Valle de México era cerrada, los escurrimientos se concentraban en la parte central, dando origen al sistema de lagos. Existen dos serranías de baja elevación al interior de la cuenca, la Sierra de las Cruces y la Sierra de Santa Catarina, que por su ubicación sobre el lecho lagunar, generan 3 espacios bien diferenciados ambientalmente hablando: la zona sur, con Xochimilco como representativo, la zona centro con el Lago de Texcoco y la zona norte con el sistema Xaltocan-Zumpango.

Antes de su desecación, en época de estiaje esta condición generaba 5 cuerpos de diferentes profundidades y calidades de agua; el Lago de Texcoco presentaba la salinidad más alta, mientras que en la porción sur los Lagos de Chalco y Xochimilco, por ser alimentados por manantiales, eran de agua dulce y los más profundos; al noreste el Lago de Tlatelolco recibía escurrimiento de la Sierra de Las Cruces, y en el norte, el Lago de Zumpango dependía totalmente de los aportes y dinámicas de los anteriores. En contra parte, en época de lluvias los niveles se incrementaban, llegando a rebasar sus límites fisiográficos, hasta conectarse entre ellos y generando un solo cuerpo de más de 2000 km², y dando lugar a la mezcla de aguas. Esta dinámica hidrológica determinó la ubicación de los asentamientos humanos de la época prehispánica.

En la época de la colonia se desarrolló el concepto de *inundación*, como respuesta a la pérdida de infraestructura urbana y afectación de viviendas; la técnica de medición de las inundaciones en la ciudad fue por *vara*, que equivale a 0.836 m, se tomó como base al nivel del lago de Texcoco, al ser el más bajo de la cuenca (0 varas), los niveles de los otros lagos eran de +2.60 m para Xochimilco, +2.57 m para Chalco, +3.00 m para Xaltocan y de +2.57 m para Zumpango. De acuerdo con estos datos, el centro de la Ciudad de México se encontraba +1.5 m respecto al lago de Texcoco. Esta diferencia mínima de niveles entre los lagos provocaba que la ciudad se inundara de forma recurrente, además la presencia de ciclones de forma simultánea en ambos litorales, generaba lluvias de intensidad extraordinaria en la cuenca, como las ocurridas en 1449 y 1498. Este riesgo periódico obligó a los mexicas a construir un sistema de control hidráulico que mantenía a cada lago dentro de sus límites, además de ser parte de los accesos a la ciudad, con compuertas en operación conforme se requería (Ovando y Montiel, 1998).

Existen varias citas históricas sobre las inundaciones en la Cuenca de México del periodo de la Conquista hasta los años 50's, las más relevantes se presentan en la siguiente la Tabla 1.

Tabla 1. Inundaciones documentadas en la Ciudad de México.

Periodo	Año	Fecha	Observaciones	Consecuencias	Nivel (m)
CONQUISTA	1446		En época de lluvias habían fuertes afectaciones, la altura del agua subió hasta el ramaje de los árboles	Elevación en el nivel de los lagos, inundando la ciudad por completo	5
	1498		Era una época de lluvias fuertes y fue creado el vasto acueducto de Coyoacán a México	Escasez de grano. Creció tanto el agua que inundó la ciudad	3
	1553		Año del frío. Lluvia que duró por espacio de 22 horas	Pérdida de cosechas, escases, inundó la población y cuantas ciudades se hallaban situadas a la orilla de la laguna	-
	1555	17-sep	Primera inundación severa, lluvias excesivas cubriendo la Ciudad de México	Población emigra hacia Puebla de manera permanente	2
	1579		Severa inundación en el valle de México, ocurrido en los meses de diciembre y enero	Hubieron carestías debido a los impactos de la lluvia	-

	1590		Lluvias excesivas considerables y continuas	Afectación a la cosecha del trigo	-
COLONIA	1604		Gran inundación persistiendo varios meses	La ciudad estuvo a punto de anegarse por completo	-
	1629	22-sep	La duración de la lluvia fue de 36 horas, permaneciendo en ésta situación 5 años, siendo las precipitaciones de los años 1631 y 1634 las que acrecentaran el nivel del lago	20,000 personas muertas y destrucción de edificaciones. Debido a la epidemia desarrollada, habitantes españoles migraron hacia Puebla	2
	1707-1714		Inundación ocasionada por las lluvias excesiva	Daños a los albaradones, en conjunto con un temblor que destruyó parcialmente el desagüe	-
MÉXICO INDEPENDIENTE	1856		Lluvia considerable y continua	Conflictos políticos, se negó llevar a cabo el diseño del desagüe	3
	1865	26-oct	Excepcional aguacero, rebasada la capacidad del sistema lacustre	La zona urbana más vulnerable respecto a la inundación fue el oriente	-
PORFIRIATO	1876-1811		Continuas lluvias presentadas en éste periodo	Se abandonó la idea de la canalización a lo largo y ancho del valle	-
MÉXICO MODERNO	1943		Lluvia intensa (Lluvias de Invierno)	Desbordo del Río Consulado, quedando varias zonas bajo el agua y deslizamiento de tierra	-
	1951	13-jul	Lluvia intensa que duró todo el día	El Gran Canal del desagüe se desbordó llenando la ciudad de agua por completo	-

Como se aprecia, las inundaciones de la Ciudad de México son un evento recurrente, sin embargo la necesidad de habitar el Valle de México ha llevado al ser humano a modificar el espacio constantemente. Actualmente la mancha urbana de la CVM alberga más de 23 millones de habitantes, ha crecido principalmente sobre los lechos lagunares en un principio, y sobre los terrenos agrícolas posteriormente. La pérdida de estos espacios de control hidrológico provoca impactos económicos y sociales derivados de inundaciones, las que se derivan del cambio de los patrones hidrológicos: la velocidad de los escurrimientos se incrementa, si el espacio geográfico sufre cambios de vegetación/suelo, al mismo tiempo que las tasas de infiltración y escurrimiento; en particular se incrementa el lavado de nutrientes, deslave de tierras, erosión y sedimentación en cuerpos de agua y sistemas de drenaje y alcantarillado (Galván y Guadarrama, 2018).

DINÁMICA HIDROLÓGICA

Los escurrimientos de la cuenca originalmente drenaban de norte a sur, sobre dos ríos casi paralelos, ubicado uno al pie de las Sierras Nevada y de Río Frío del que queda como relicto el sistema Texcoco-Chapingo; otro río nacía al pie de las Sierras de las Cruces y de Tepoztlán, al poniente y se unían a la altura de la Sierra de Santa Catarina, para drenar juntos hacia la zona de Xochimilco, hacía la cuenca de Huautla en Morelos, para finalmente, llegar hasta el Océano Pacífico. Pero con el inicio de un largo proceso de erupciones volcánicas, nació entre el volcán del Ajusco y el Popocatepetl, la Sierra del Chichinautzin, que hoy separa a los Valles de México y Cuernavaca con más de 3,500 m.s.n.m. que cerró este paso y drenaje de la cuenca, revirtiendo completamente la dinámica hidrológica (Mooser, 1975).

Se formó una represa natural que dio origen un gran lago de gran profundidad en la actual zona de Xochimilco-Tláhuac, al ser la parte más baja de la cuenca. Debido al arrastre de sedimentos de las serranías, éstos se depositaron en el fondo de los lagos; estos depósitos son de limos, arenas y gravas finas, producto de las cenizas volcánicas, son materiales más o menos permeables, con un grado medio-alto de compactación definido como endurecimiento, y que actualmente constituyen los acuíferos profundos de los que se extrae alrededor del 60% del volumen del agua potable que se consume en el área metropolitana (Tamez, 1997).

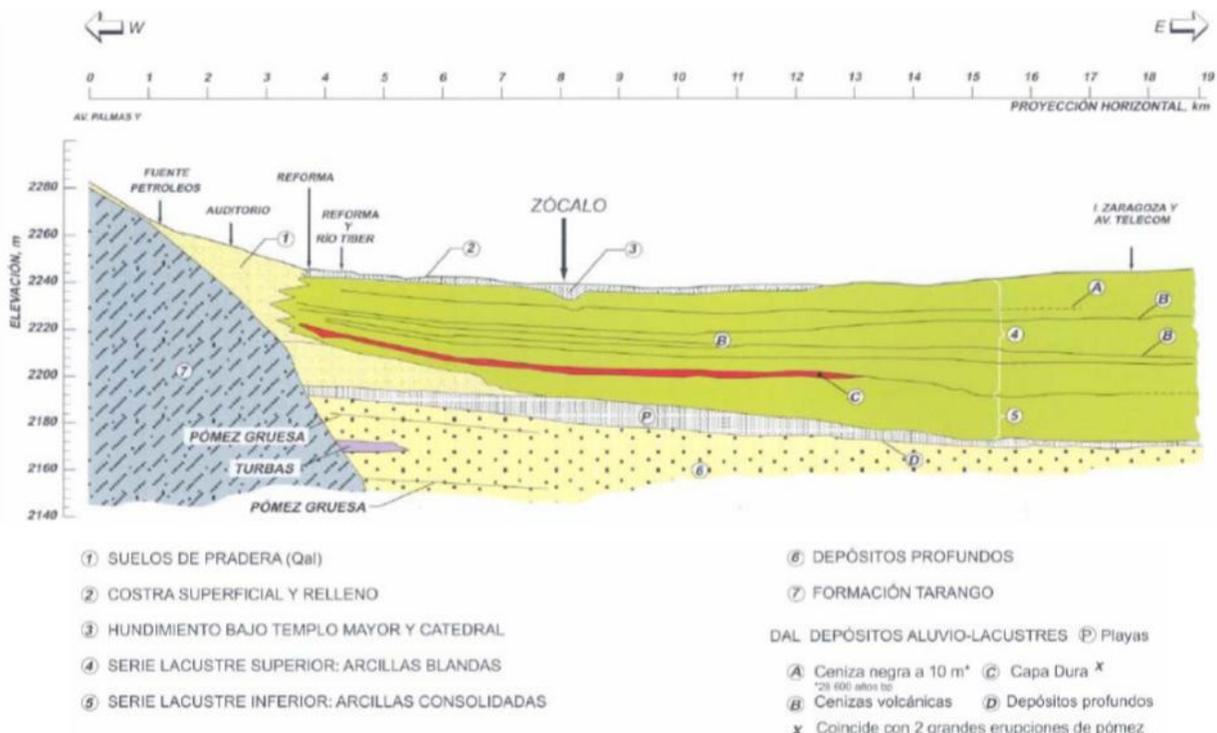


Figura 1. Secuencia estratigráfica de la Ciudad de México (Mooser, 1975)

Con el tiempo, la erosión combinada con el depósito de sedimentos modificó el relieve, al grado de invertir la dirección de los escurrimientos, aunque se conservan rasgos de la conformación inicial; este proceso genera los 5 cuerpos lagunares que en épocas de baja precipitación se mantenían independientes, y que conforme las precipitaciones se incrementaban en el año, estos cuerpos se unían.

Respecto al comportamiento de lluvias, el Valle de México presenta un comportamiento bimodal en cuanto al ciclo anual. El primer pico se relaciona con la humedad que proviene del Golfo de México, y que inicia a finales de marzo, y se extiende hasta mediados de junio. El segundo ciclo se asocia a la humedad procedente del pacífico, a partir de huracanes, y que se inicia a finales de junio y se extiende hasta mediados de octubre. Entonces, durante una parte del año, la humedad llega de la dirección sureste entonces las lluvias se presentan en la zona de Xochimilco, Chalco, Tláhuac, Texcoco, hasta la Sierra de Santa Catarina; mientras que en el otro periodo entra por el flanco noroeste, y afectan principalmente la Sierra de las Cruces, Sierra de Guadalupe y centro de la cuenca.

Durante un breve tiempo, entre los dos picos, ambos sistemas se empalman, provocando que las lluvias aparezcan de forma indistinta por el sureste o el norponiente: esta es la época cuando las lluvias se generalizan en toda la zona metropolitana, y aunque son de baja intensidad, su extensión sobre casi toda

la cuenca genera escurrimientos altos y sostenidos por intervalos de tiempo largos, afectando a toda la cuenca. Es en esta época que los cuerpos lagunares se unían.

De acuerdo con el fenómeno descrito, el comportamiento de los lagos era, si la lluvia provenía del sureste, el sistema Chalco, Mixquic, Tláhuac y Xochimilco crecía y su característica es que era agua dulce; si la lluvia provenía del noroeste, el sistema México centro, Tlatelolco y Azcapotzalco era el que crecía con aguas salobres de muy baja concentración. Y si la humedad era en toda la cuenca, se afectaba primero Xochimilco (parte más baja) una vez que se llenaba, conectaba con el sistema centro-norte (parte media) y finalmente derramaba sobre la zona Texcoco-Xaltocan-Zumpango que era la más norteña y altamente salobre. Debido a esta dinámica los cuerpos lagunares mantenían inundada permanente alrededor del 35% del área de la cuenca, pero de forma alternada entre los tres sistemas, permitiendo la producción agrícola intensiva.

Bajo este funcionamiento hidrológico, se consideran a 30 ríos como los principales escurrimientos que daban origen a los lagos; de ellos, 8 son los que históricamente han tenido los mayores escurrimientos: en orden de importancia por volumen son Río Cuautitlán, Tepoztlán y el de la Magdalena Contreras; le siguen los ríos de Tlalnepantla, Los Remedios, Texcoco, Amecameca y Tlalmanalco.

El otro aspecto importante es el depósito de sedimentos, que gracias a la dinámica descrita se dan de forma alternada en tiempo: hay depósitos aluviales de alto contenido de materia orgánica, intercalados con cenizas volcánicas endurecidas, lo que confiere distintas propiedades a la mecánica de suelos. La Ciudad de México y la Zona Metropolitana está asentada en su mayor parte, sobre el fondo estos lagos y por ende, de los depósitos mencionados.

MECANICA DE SUELOS

El origen de los suelos del Valle de México es durante las épocas de climas de húmedos-templados a cálidos. La presencia de vegetación en las laderas montañosas del valle generó residuos orgánicos que se desplazaban junto con el suelo con los escurrimientos; al ser descompuestos por el suelo, generan bióxido de carbono que, en combinación con el agua y el oxígeno del aire, provocan la descomposición química de los minerales presentes en las cenizas volcánicas, transformándolas en arcillas coloidales. Estos materiales son arrastrados por la lluvia y transportadas hasta los lagos donde, en presencia de agua con un alto contenido de sodio, las arcillas en forma coloidal forman flóculos de estructura hueca, pero de densidad suficiente para favorecer su sedimentación. Este proceso desarrollo la estructura porosa de los depósitos de arcilla lacustre que cubren la mayor parte del fondo del Valle de México. En contra parte, en los tiempos de clima seco, la falta de agua inhibió la generación de materia orgánica y la producción de dióxido de carbono; la ausencia de gas carbónico minimizó el proceso de generación de arcilla por descomposición química de las cenizas volcánicas, dando pie a los depósitos de cenizas duras.

Adicional a lo anterior, la alternancia de periodos de lluvia y sequía reducían considerablemente el área de embalse de los lagos, dejando expuesta una gran parte del fondo de los lagos a la desecación por los rayos solares. Este fenómeno produjo manchones de estratos endurecidos intercalados entre los estratos de arcillas.

La Ciudad de México se ha desarrollado desde las épocas prehispánicas sobre estos sedimentos; se puede hablar de tres tipos: las áreas de sedimentos permanentemente sumergidas (fondos de lagos), áreas de depósitos alternados de cenizas-arcillas (áreas que alternadamente se inundaban y desecaban), y las áreas de poco sedimento que son las que esporádicamente se inundaban y donde prevalecen las cenizas endurecidas y rocas basálticas. El comportamiento de los suelos de la ciudad depende del tipo de

sedimento que presenta y su profundidad, definido como capacidad de carga y que depende del espesor y resistencia de la roca madre.

MARCO TEÓRICO

Un hundimiento, de acuerdo con la SEMARNAT (2004), se define como el movimiento de la superficie terrestre en el sentido vertical descendente y tiene lugar en áreas que presentan características de suelo heterogéneas y cambios de pendiente. Este movimiento se da con velocidades desde muy rápidas hasta muy lentas, según sea la mecánica de suelos. Si el movimiento es del orden de cm/año, y afecta a una superficie amplia (km^2) se habla de *subsistencia*; si el movimiento es del orden de m/año, se define como *colapso*.

Normalmente la subsistencia es la respuesta de los materiales geológicos a los esfuerzos tectónicos, y sobre carga mecánica de las construcciones y vialidades. Por su parte, los colapsos implican el fallo de la estructura geológica a gran profundidad, que provoca el reacomodo de las estructuras supra yacentes hasta llegar al nivel de la superficie terrestre. Los hundimientos son comunes en donde el material que existe debajo de la superficie es una estructura química que se disuelve naturalmente, dando paso a la compactación del terreno.

Inundación

De acuerdo con el Glosario Internacional de Hidrología (GIH), una inundación se presenta cuando el nivel del agua aumenta por arriba del nivel normal de su cauce, siendo el *nivel normal* la elevación en msnm, de la superficie del agua *no causante de daños*; esto es, una inundación es una elevación del nivel del agua que genera pérdidas. Entonces, una inundación es producto de un evento hidrológico como precipitación, oleaje, marea de tormenta, que rebasa el comportamiento *normal*; adicionalmente, si se combina con el fallo de alguna estructura hidráulica de desalojo de aguas, provoca la invasión de agua en sitios donde usualmente no la hay, provocando daños a la población, agricultura, ganadería e infraestructura urbana (Salas y Jiménez, 2004).

En general, las inundaciones están consideradas un *riesgo* y están catalogadas dentro de los *riesgos geológicos*; junto con los deslaves son los que causan mayores catástrofes naturales, son recurrentes y se distribuyen de forma homogénea en todo el territorio nacional.

Escurrimiento

El escurrimiento superficial se refiere al volumen de agua que se presenta sobre la superficie de un terreno, a partir de las precipitaciones que caen sobre un espacio geográfico dado; el caso de que la lluvia caiga sobre terrenos naturales, el volumen de es igual al volumen de lluvia, menos la retención superficial y la infiltración. El escurrimiento superficial es función de la *intensidad* (I) de la precipitación y de la permeabilidad de la superficie del suelo (C), de la duración de la precipitación (d), de la extensión del área de captación (A), y de la pendiente de la superficie del suelo (s_0). El aporte de una cuenca al escurrimiento en canales se representa por el *hidrograma*. Existen dos modelos que representan este fenómeno, uno asociado a cuencas naturales, donde se presupone que parte de la lluvia ingresa al suelo como infiltración (F), y otro asociado a cuencas urbanas, donde el supuesto es contrario: no existe infiltración.

Es método de Número de Curva un modelo empírico desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos que determina un umbral de escorrentía ($H_{p_{exc}}$) a través de una constante hidrológico o número de curva (CN); toma un valor de 0 a 100 según sea la capacidad de una tormenta (I)

de generar escurrimientos. Valores cercanos a 0 representan condiciones de permeabilidad muy alta-suelos muy secos, mientras que valores cercanos a 100 representan condiciones de impermeabilidad.

El modelo depende de las siguientes propiedades: 1) tipo hidrológico de suelo; 2) manejo edafológico, y 3) condición previa de humedad (θ_o). El método fue desarrollado a partir de registros de lluvia y escorrentía en 24 horas, por lo que no considera explícitamente la variación temporal de la escorrentía. Matemáticamente, la ecuación parte de lo siguiente.

$$Q_p = \frac{(H_p - 0.2S)^2}{H_p + 0.8S} \text{ (1)}$$

Donde:

H_p = Altura de precipitación acumulada en 24 hrs. [mm]

S = Factor de retención del suelo [0]

El factor de retención S depende del Número de Curva, tal que:

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \text{ (2)}$$

Donde CN depende del tipo de suelo, su comportamiento hidrológico, composición, textura y profundidad del nivel freático.

Infiltración

En este modelo la premisa fundamental es que existe infiltración y esta es dominante en el fenómeno; es el proceso por el cual el agua se transfiere de la superficie del terreno hacia el suelo primero y después al acuífero. Depende del relieve terrestre y el tipo de suelo. La infiltración depende de la ley de Darcy:

$$q_L = k_n \frac{\Delta H}{\Delta L} \text{ (3)}$$

Donde:

q_L = Lámina infiltrada [m]

k_n = Conductividad hidráulica [m/hr]

ΔH = Desnivel del terreno [m]

ΔL = Longitud del desnivel [m]

Método Racional

El segundo modelo para estimar escurrimiento parte de la premisa de que no existe infiltración, debido a que la superficie del terreno es impermeable. El método Racional se expresa por:

$$Q_p = CiA \text{ (4)}$$

Donde:

Q_p = Gasto pico [m^3/s]

C = Coeficiente de escurrimiento [0]

i = Intensidad de la precipitación [mm/ hr]

A = Área de drenaje [m^2]

El coeficiente de escurrimiento del método Racional (C) es una función de la cubierta del suelo y la pendiente de la cuenca de drenaje.

Intensidad de Precipitación

La intensidad de precipitación es igual a

$$I = \frac{hp}{\Delta t} \text{-----} (5)$$

Donde:

Hp = precipitación [mm]

Δt = intervalo de tiempo [hr]

ZONA DE ESTUDIO

La CVM se localiza en la zona centro de la república mexicana con una extensión de 7,954 km² aproximadamente. La conforman tres entidades federativas: Estado de México, Hidalgo y Tlaxcala. La zona oriente (ZO) de la CVM se define por el parteaguas trazado sobre la Sierra de Santa Catarina, Cerro de la Estrella y Cerro de Chimalhuacán; abarca territorio de 11 municipios del Estado de México, Acolman, Atenco, Chiautla, Chicoloapan, Chimalhuacán, Chiconcuac, Ecatepec, Ixtapaluca, La Paz, Papalotla y Texcoco y una Alcaldía de la Ciudad de México Iztapalapa; su crecimiento es de casi el 25%, y es determinado por los municipios de Chimalhuacán, Chicoloapan, Atenco, Ixtapaluca, Chimalhuacán y la Paz y se ha mantenido así por 15 años; es en esta zona donde se presentan las inundaciones de mayor incidencia-intensidad (Galván y Guadarrama, 2018)

La ZO es la parte más baja de toda la cuenca, debido a esto los escurrimientos se acumulan en ella sobre un área muy pequeña; la relación escurrimiento-acumulación de la zona es de 1:4. Es por esto que las inundaciones se han incrementado, de tal forma que hasta los eventos de pequeña magnitud provocan severos encharcamientos, mientras que los eventos mayores provocan inundaciones que tardan más de 48 horas en drenar. Otro elemento de consideración, es la población que habita la zona presenta un crecimiento 5 veces mayor que en el resto de la CVM, por lo que el número de habitantes afectados es mayor que en cualquier otro punto de la metrópoli (Galván y Guadarrama, 2018).

JUSTIFICACIÓN

La ciudad es un activo social y económico compuesto por lo público y lo social-privado cuya conservación recae en las entidades de gobierno. Cada vez que se presenta una inundación, se produce una pérdida económica en las dos esferas; los eventos de inundación que inicialmente se consideraban esporádicos han adquirido una recurrencia tan alta que ha obligado a los gobiernos a desarrollar planes de reacción.

Partiendo de la base de que el escurrimiento depende directamente de la cobertura vegetal y del relieve, se entiende que el crecimiento de la mancha urbana ha afectado el funcionamiento hidrológico de la cuenca, en el documento "*Cambio de uso del suelo: los procesos de urbanización en el Valle de México y su relación con el Cambio Climático*" (Galván, 2018) se aborda el análisis de la zona desde la perspectiva del cambio del uso del suelo. Sin embargo la problemática en la zona estudiada también presenta modificaciones significativas del relieve, que se asocian con la subsidencia del suelo; esto sucede tanto de origen natural (complejidad de los materiales de origen lacustre, fluvial y volcánico) y antropogénico por sobre carga de construcciones en combinación con extracción de agua. La combinación de estos procesos provoca que los materiales geológicos se deformen de manera diferencial. El hundimiento progresivo y generalizado de la zona de estudio afecta a la infraestructura urbana; como segunda parte de la problemática, los desplazamientos y arrastres de sedimentos hacia las zonas más bajas se han incrementado debido al crecimiento de la mancha urbana. Las fallas, subsidencias y hundimientos derivados de la dinámica de los depósitos sedimentarios en la Cuenca del Valle de México, provocan los hundimientos diferenciales; este incremento en los desniveles del terreno provoca mayor acumulación de escurrimientos que derivan en inundaciones de mayor intensidad y frecuencia.

OBJETIVO

Este trabajo relaciona las características del relieve terrestre con el proceso lluvia-escurrimiento partir del año 2003. El objetivo es identificar los cambios en los patrones de acumulación derivados de la modificación del relieve por hundimientos y subsidencias.

MATERIALES Y MÉTODOS

El análisis es realizado a través de imagen satelital Landsat para el año 2003 a través de Sistemas de Información Geográfica; la proyección terrestre es WGS84, en escala 1:250,000.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

El análisis del relieve este se hace a partir de la restitución altimétrica de la imagen, con una calibración básica (1.8%) espacial, de la que se obtienen las curvas de nivel y el modelo de elevación terrestre, así como la distribución de la mancha urbana. La Figura 2 muestra la imagen satelital para el año 2003 y la delimitación de la zona de estudio.

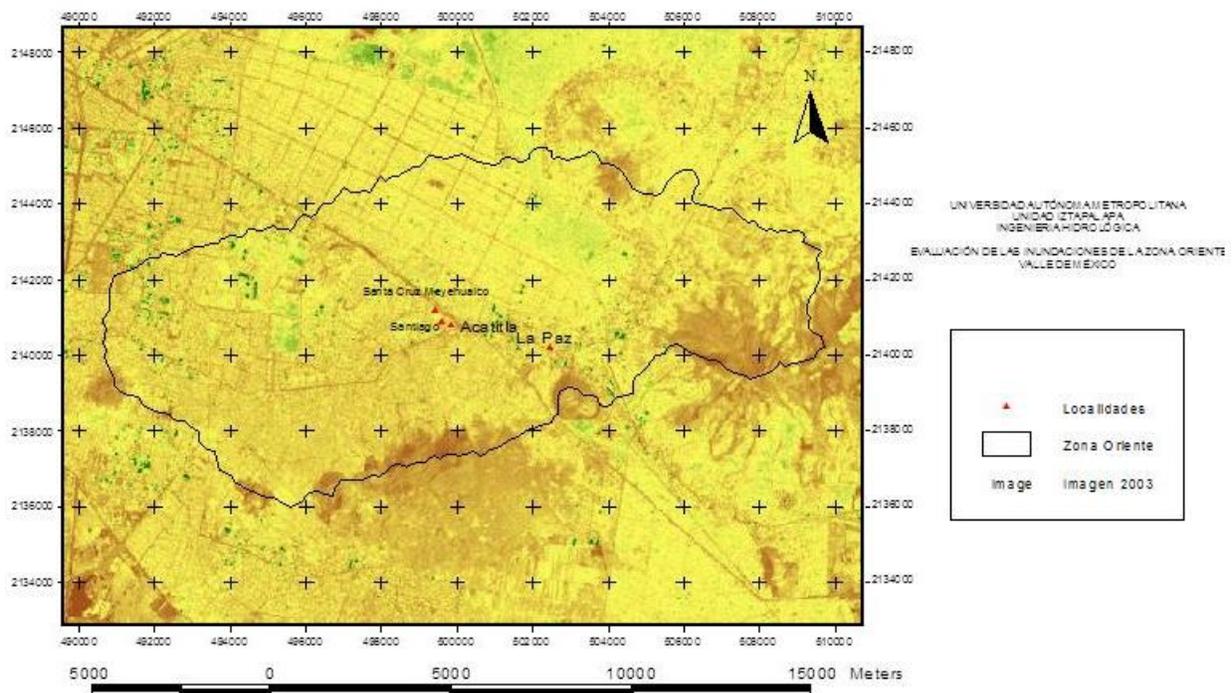


Figura 2. La zona de estudio (año 2003).

Con esta imagen se determina el uso del suelo para ese año; la Figura 3 muestra la distribución del uso del suelo.

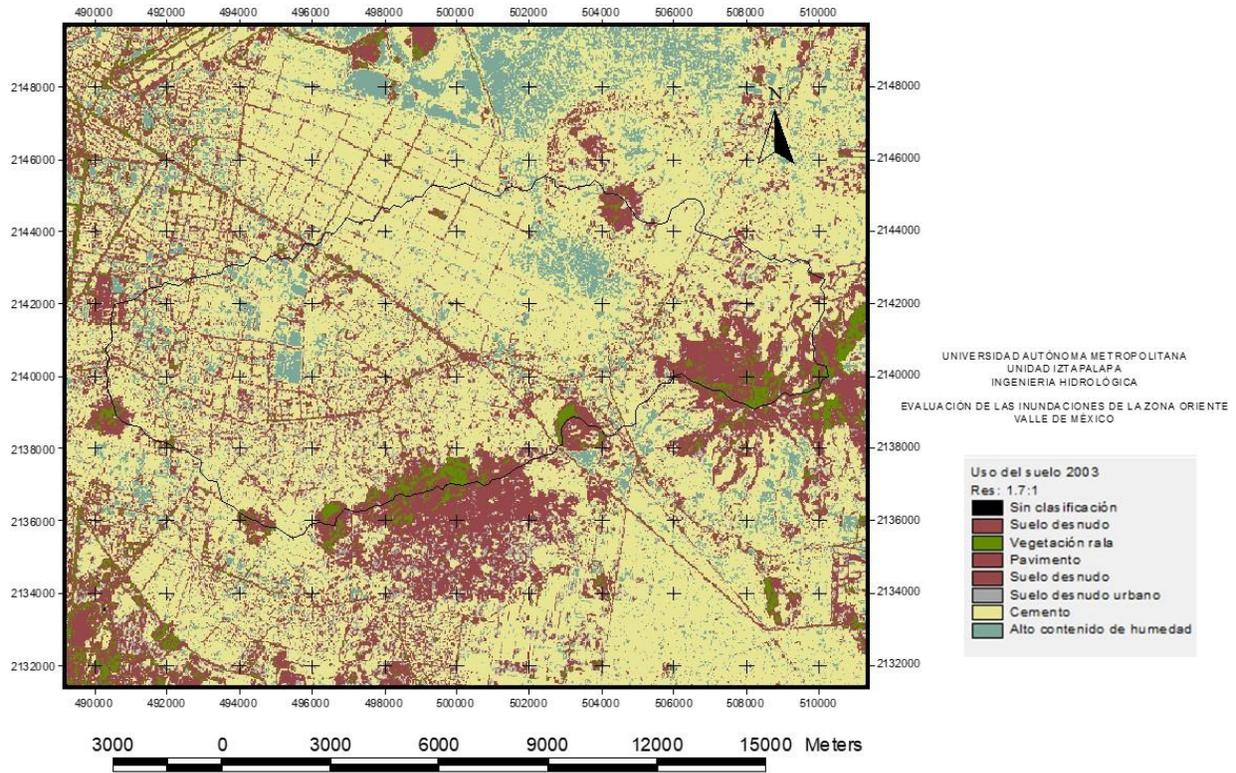


Figura 3. Uso del suelo, año 2003

A partir de la misma imagen se obtiene el relieve para el año 2003. La Figura 4 muestra el relieve.

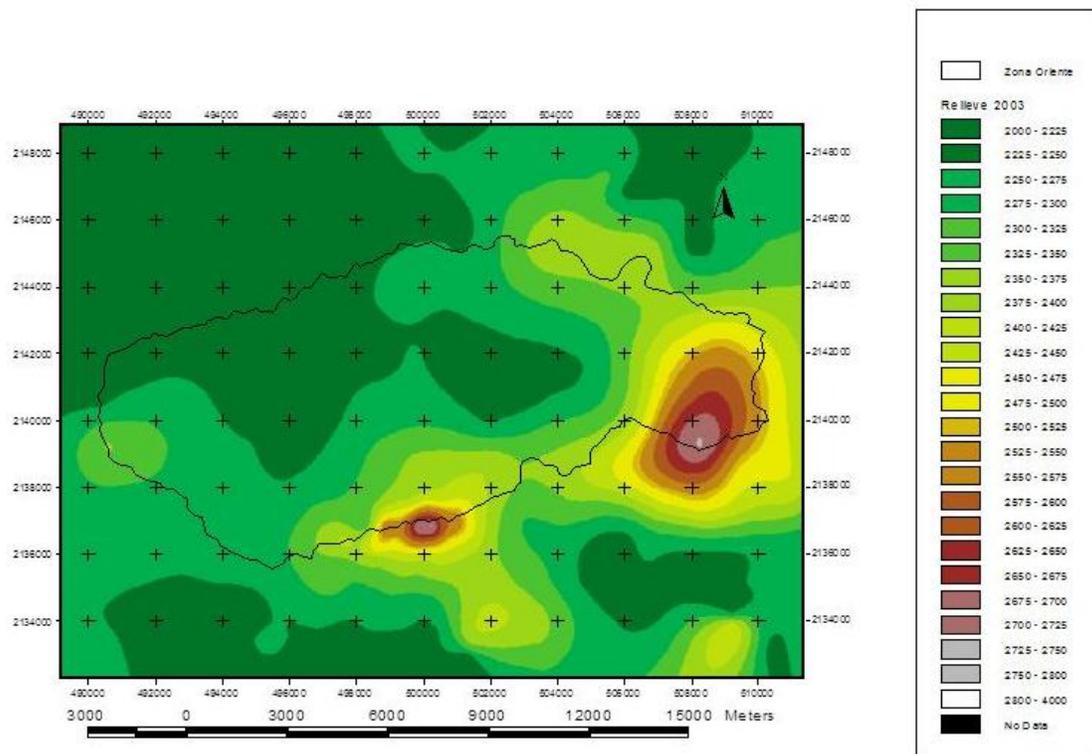


Figura 4. Relieve para el año 2003.

Posterior se tomaron 132 puntos físicos de control, en donde se presentan hundimientos, fallas y subsidencias, así como donde de forma recurrente se reportan encharcamientos e inundaciones; estos puntos se tomaron con un Geoposicionador Satelital marca Garmin, durante el año 2018. Con esta base de datos se realizan interpolaciones del relieve, para revelar los cambios en cuanto a puntos de acumulación de agua. La Figura 5 muestra los puntos adicionales.

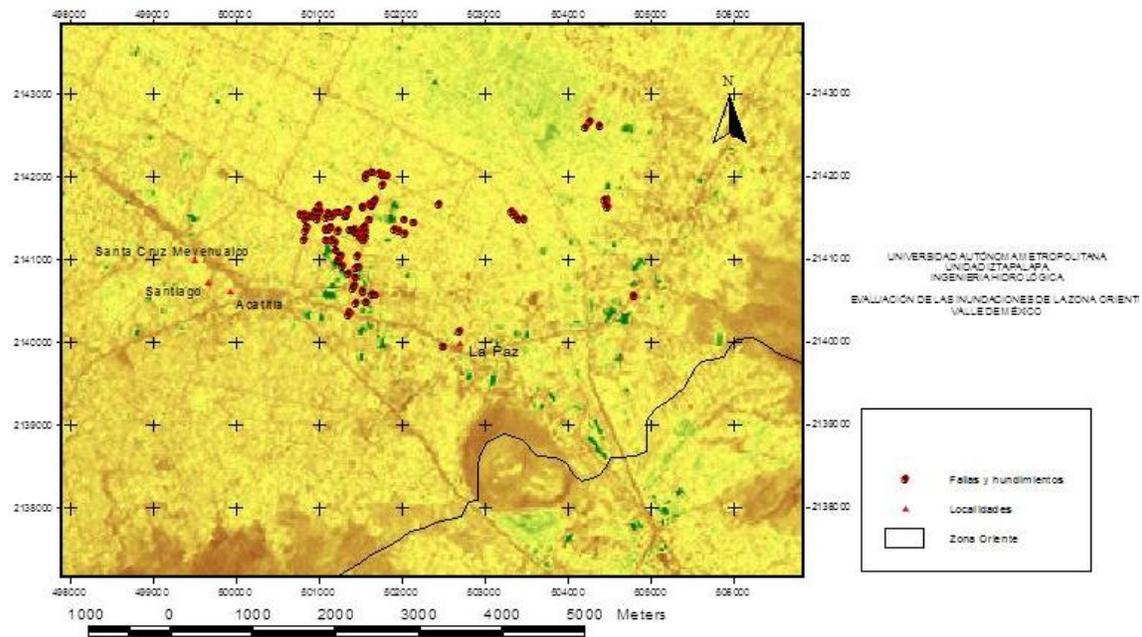


Figura 5. Base de datos de subsidencias y hundimientos.

Se realiza una segunda interpolación, donde se integran los nuevos niveles del relieve. La Figura 6 muestra esta segunda interpolación.

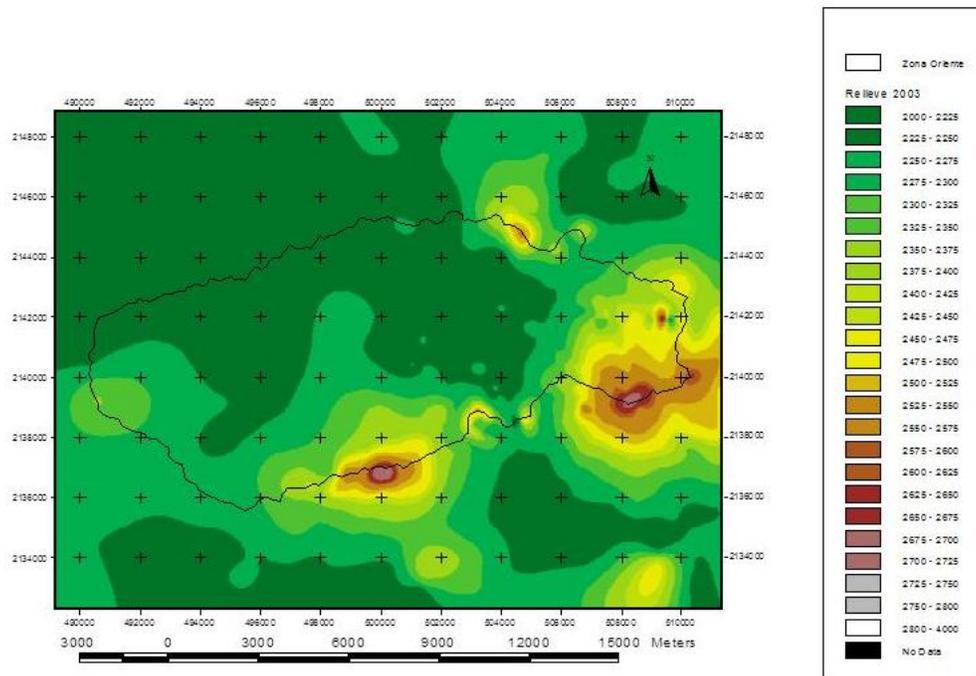


Figura 6. Interpolación con cambio de relieve.

Modificación de los patrones de escurrimientos

Para evaluar el cambio en la acumulación de escurrimientos, se utiliza la estimación volumétrica de los escurrimientos realizada en "*Cambio de uso del suelo: los procesos de urbanización en el Valle de México y su relación con el Cambio Climático*", bajo las 4 condiciones hidrológicas descritas (Galván y Guadarrama, 2018). La Tabla 2 muestra los volúmenes de escurrimiento para cada condición, para el año de evaluación.

Tabla 2. Volumen de escurrimientos, año 2003.

Condición Hidrológica	Volumen de Q (m ³)
Condición I	571,606,025.63
Condición II	1,173,908,402.44
Condición III	38,694,572,469.25
Condición IV	96,826,580,767.69

Con esta información se simula la acumulación de los escurrimientos, a partir del relieve sin hundimientos (2003) y con hundimientos (2018). La Figura 7 presenta la acumulación para el año 2003, mientras la Figura 8 para el año 2018.

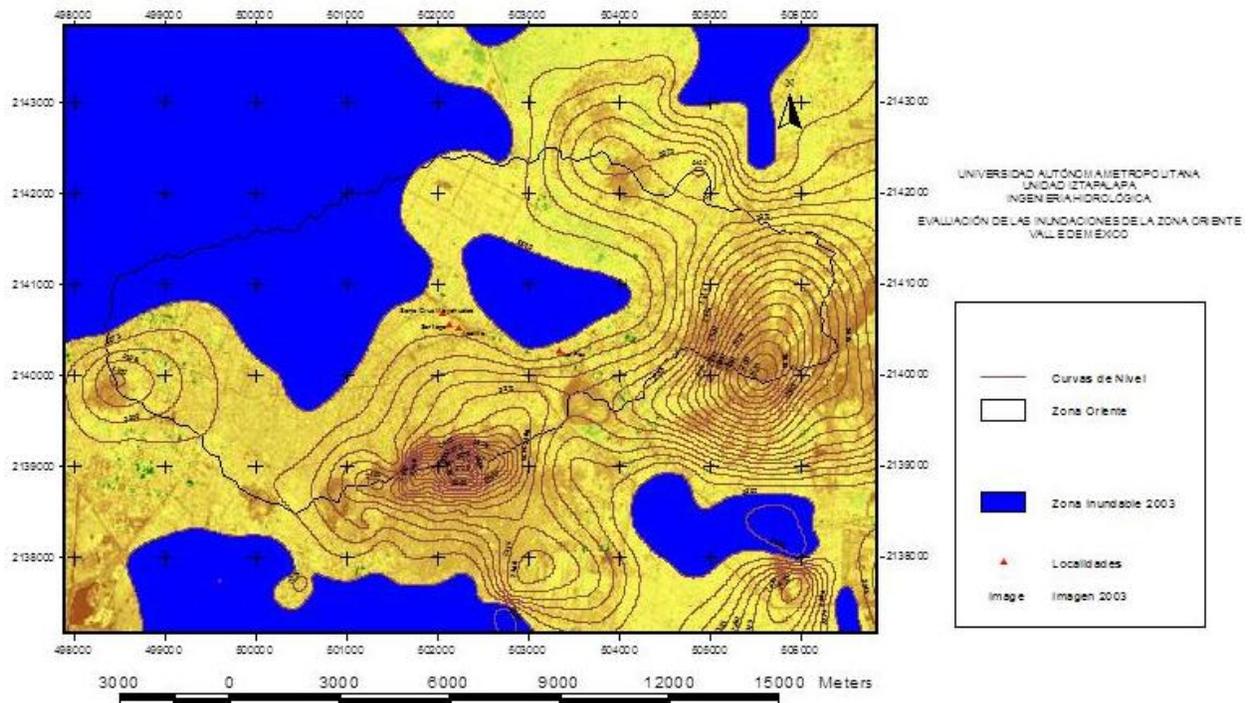


Figura 7. Zona inundable año 2003.

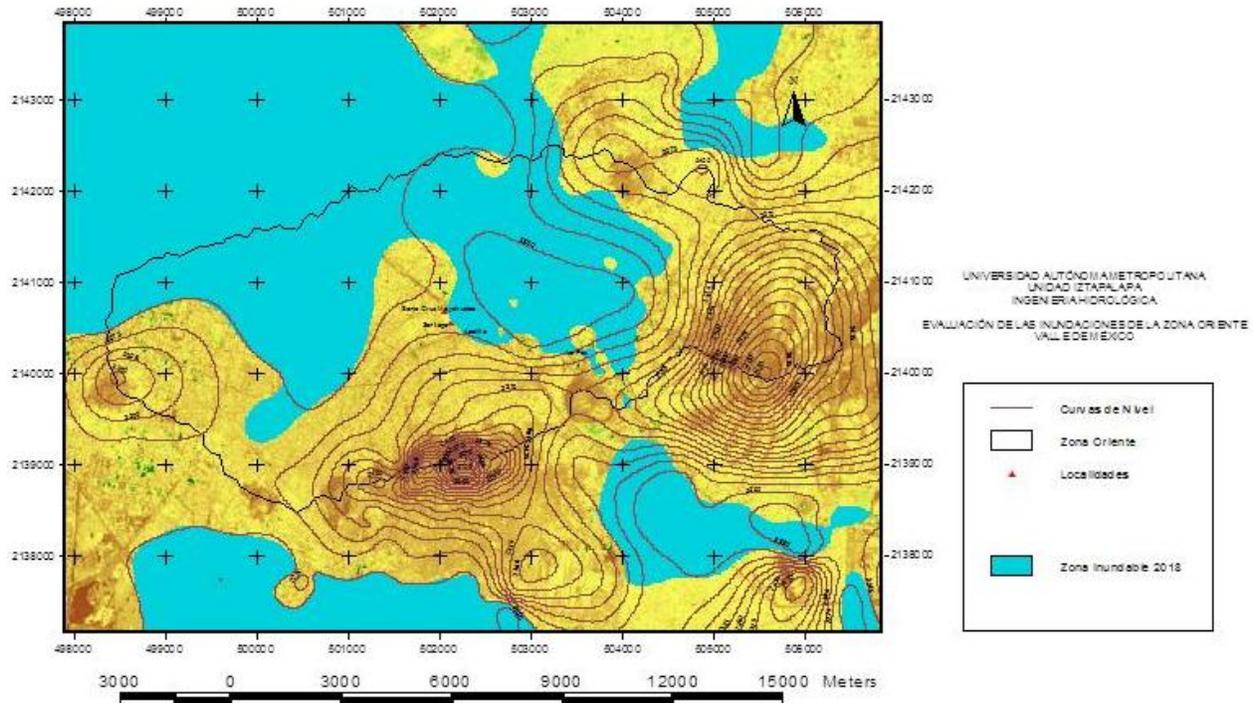


Figura 8. Zona inundable año 2018.

DISCUSIÓN

De acuerdo con la definición de estas áreas, para el año 2003 la zona inundable máxima (condición IV) era de 34.34 km², mientras que para el 2018 esta es de 51.49 km², un incremento de 49.90%; como se aprecia en las dos últimas figuras, nuestra zona de interés pasa de ser un espacio aislado, a ser un sistema continuo.

Transformando el volumen en lámina de acumulación, tenemos que de acuerdo a la condición de lluvia, el incremento de la lámina es exponencial. La Tabla 3 muestra el incremento en la lámina de acumulación.

Tabla 3. Láminas de acumulación de escurrimientos.

Condición Hidrológica	Año de evaluación		Incremento (cm)
	2003	2018	
Condición I	11.10	16.64	5.54
Condición II	22.80	34.18	11.38
Condición III	751.50	1126.57	375.07
Condición IV	1880.51	2819.05	938.55

Como se observa, para el año 2003 la lámina máxima esperada era de 1.9 m, mientras que para la misma condición, para el año 2018 es del doble.

Esta evaluación nos muestra que los escurrimientos están determinados por dos variables independientes y de igual magnitud en impacto: el uso del suelo y el relieve terrestre. Ambas son determinantes en la forma en que el sistema responde a los eventos de lluvia. Los montos de lluvia,

como ya se evaluó en el documento “Análisis del cambio climático de la región de Zumpango de Ocampo, Estado de México como base del desarrollo regional” (Correa et al., 2018) son apenas de 0.13%, no son lo suficientemente significativos para afirmar que es un problema derivado de la fase atmosférica. En cambio, las tasas de denudación de suelos y su posterior agregación a suelo urbano, si modifican en un 150%, mientras que la modificación del relieve nos dan una modificación del 100%, siendo estos dos mucho más impactantes que los cambios en la lluvia.

CONCLUSIONES

El impacto de los escurrimientos sobre la Zona oriente está fuertemente correlacionada con el crecimiento espacial de la mancha urbana y la forma en que se produce la acumulación de los escurrimientos estrictamente en la zona, que se traduce en el *tiempo de concentración*; este concepto involucra al relieve directamente y es la síntesis de cómo responde el espacio geográfico a los eventos de lluvia. En esta zona tenemos los cambios del uso del suelo más dinámicos de la cuenca, y los picos de escurrimientos más agresivos, lo que se explica solamente a través del análisis del *hidrograma de respuesta*, donde se integran las variables de volumen de escurrimiento con el tiempo que tarda en acumularse dicho escurrimiento. Dicho hidrograma se modifica en sus dos variables fundamentales: escurrimiento y tiempo de concentración.

Adicionalmente los escurrimientos se concentran en pequeñas áreas (hundimientos), que se dan en la parte más baja de la cuenca sobre lechos lagunares compuestos por arcillas impermeables que no permiten la infiltración, lo que a su vez inutiliza los drenajes, agregando la problemática de un lento vaciado de los drenajes.

Por tanto, la búsqueda de soluciones a la problemática de las inundaciones debiera centrarse en el manejo de estos dos elementos.

REFERENCIAS

Correa Quintos M. A., Galván Fernández M. A. y Guadarrama Brito M. E., (2018) Libro Electrónico. “Análisis del Cambio Climático de la Región de Zumpango de Ocampo, Estado de México Como Base del Desarrollo Regional”. Publicado en línea como capítulo del libro electrónico: “Desarrollo Regional Sustentable y Turismo”. Coeditada por la Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional A.C. Y El Instituto de Investigaciones Económicas de la UNAM, Segundo Volumen, Título “Nuevos Escenarios Mundiales, Repercusiones en México y potencialidades regionales”. ISBN UNAM: 978-607-02-9997-1 ISBN AMECIDER: 978-607-96649-4-7

Galván F. A. y Guadarrama B. M. E., Memorias del 23° Encuentro Nacional Sobre Desarrollo Regional en México. “Cambio de uso del Suelo: Los Procesos de Urbanización en el Valle de México y su Relación con El Cambio Climático”. AMECIDER 2018. Ciudad de Puebla. Volumen V, Capítulo 1. 16-19 de octubre 2018. Primera Edición 15 de octubre de 2018. ISBN UNAM: 978-607-30-0969-0, ISBN AMECIDER: 978-607-8632-00-8. <https://www.amecider.org/agenda-publica-2018>

Lugo H. J. y Salinas M. A., (1996) *Morfología de la Sierra de Guadalupe (al norte de la Ciudad de México) y su relación con peligros naturales*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. Volumen 13, No. 2. P. 240-251 UNAM instituto de Geología, México, D.F.

Mooser, F., (1975) *Historia geológica de la Cuenca de México*. Memoria de las Obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal: Mexico, D.F., Departamento del Distrito Federal, 1, 7–38.

Ovando-Shelley, E., y Montiel, A. J., (1989) *Estudio sobre el problema del agrietamiento en la unidad habitacional Cananea, Iztapalapa*. Reporte técnico inédito.

Salas S. M. A. y Jiménez E. M., (2004) *Inundaciones*. 1ª edición 2004. SERIE FASCÍCULOS. CENAPRED.
<http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/3-FASCCULOINUNDACIONES.PDF>

SEMARNAT (2004)

Tamez, 1997