

Evaluación de amenazas por inundaciones en el centro de México: el caso de Iztapalapa, Distrito Federal (1998-2005)

Recibido: 3 de abril de 2009. Aceptado en versión final: 9 de octubre de 2009.

Mónica Vera Pérez*

Jorge López Blanco*

Resumen. Se consideraron los diferentes factores biofísicos que influyen en la presencia de inundaciones y subsidencia en la delegación Iztapalapa, Distrito Federal, a partir del análisis de sobreposición cartográfica y valoración de pesos de factores. Se evaluó el nivel de peligro a partir de la consideración de las variables que describen las características propias de las inundaciones (frecuencia, altura máxima y extensión máxima) y por otro lado, las variables que influyen en la presencia de las mismas (hundimientos o subsidencia, inclinación del terreno, capacidad potencial de la infraestructura hidráulica). Asimismo, el análisis se apoyó tanto en la evaluación meteorológica para determinar su influencia en la magnitud de las inundaciones, como en el trabajo de campo

para el levantamiento y verificación de los resultados. De las 17 colonias evaluadas en campo, ocho son de nivel de peligro muy alto de inundaciones, correspondiente al 6% de la superficie de la delegación, estas áreas están localizadas al oriente, coincidiendo espacialmente con los sitios de mayor peligro de hundimientos o subsidencia y con los sistemas de colectores con mayor volumen de derrame. La mayoría de las inundaciones son de origen pluvial, sin embargo, esta variable no determina la presencia espacial de las inundaciones.

Palabras clave: Inundaciones, amenazas, subsidencia del terreno, Iztapalapa, México.

Flood hazard assessment in Central Mexico: the case of Iztapalapa, Federal District (1998-2005)

Abstract. The different biophysical factors that have influenced the floods and subsidence incidence in the delegation of Iztapalapa, Distrito Federal, Central Mexico were considered. The analysis taken into account a procedure based on in cartographic overlaying and evaluation of factor weights. The hazard level was evaluated starting from the consideration of the variables that allow describing the flood characteristics (frequency, maximum height and maximum extend) and on the other hand, the variables that have influence in the presence of them (subsidence magnitude, slope inclination and, hydraulic infrastructure capacity). As well, the analysis was based on the meteorological analysis to determine

its influence in the magnitude of floods, as well as in the fieldwork for checking and confirmation of results. Of the seventeen colonies evaluated in field, eight of them have the very dangerous level of floods, corresponding to 6% of the delegation area. These areas are located to the east, coinciding spacially with the places of more subsidence level or and with the hydraulic-collector systems of more spill volume. Most of floods are from rain origin; however, this variable was not decisive in their spatial presence.

Key words: Floods, Hazard, Land Subsidence, Iztapalapa, Central Mexico.

*Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica, Cd. Universitaria, 04360, Coyoacán, México, D.F. E-mail: monicaverape@yahoo.com.mx, jlopezblanco@hotmail.com

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones son eventos naturales y recurrentes que se producen en las planicies aluviales o en las áreas planas y más bajas del terreno, como resultado de lluvias intensas o continuas, que al sobrepasar la capacidad de retención del suelo y de los cauces, desbordan e inundan las llanuras, o en general, aquellos terrenos bajos o aledaños a los cursos de agua (IDEAM, 2007). Por otra parte, el término encharcamiento se refiere a una pequeña acumulación de agua del tamaño de una lámina delgada, debida principalmente a la saturación del suelo y que se estanca en lugares planos o con leve inclinación y de poca extensión, que puede permanecer por horas o por pocos días¹ (*Ibid.*).

En la actualidad, a nivel mundial, la cantidad e intensidad de las inundaciones extremas han aumentado considerablemente, como lo ha cuantificado la Cruz Roja Internacional entre 1919 y 2004 (85 años) se han presentado 499 casos, rebasando ampliamente a los eventos sucedidos en los primeros periodos con registros (CENAPRED, 2004). En el caso de la República Mexicana, dentro de los eventos de inundación que se han considerado como catastróficos se encuentran el sucedido en 1976 en La Paz, Baja California Sur, el cual ocasionó la muerte de entre 5 000 a 10 000 habitantes; y en 1988, el ciclón Gilberto que azotó a la ciudad de Monterrey, ocasionando más de 200 muertos (Domínguez *et al.*, 1994). Se estima que entre 1973 y 1990 las inundaciones generaron, en promedio anual, una pérdida de 173 000 millones de pesos; esto sin incluir el impacto en las condiciones de vida de los habitantes y los daños a la producción económica (*Ibid.*).

A nivel histórico, se tiene registro de diversas inundaciones en la Cuenca de México, entre las más desastrosas está la ocurrida en 1496, en la Gran Tenochtitlan, cuando reinaba Moctezuma Ilhuicamina; como consecuencia de ello se construyó el

albarradón de Nezahualcóyotl, un dique de 16 km de largo que partía desde el norte de Atzacolco hasta Iztapalapa (Ávila, 1991). De 1519 a 1521, como consecuencia de las inundaciones se presentaron epidemias y, a partir de la inundación de 1555, se decidió construir el Albarradón de San Lázaro (Perló, 1999). En 1604 y 1607 ocurrieron inundaciones de grandes dimensiones y fue entonces que Enrico Martínez presentó el primer proyecto, el Desagüe de Huehuetoca, para drenar la Cuenca de México, obra que fue terminada hasta 1900. La inundación de 1629, que se prolongó hasta 1635, se considera como la más grave que ha sufrido la ciudad, ya que causó muchas muertes, enfermedades y el abandono de la ciudad por muchos habitantes. Las inundaciones de 1925 reflejaron que las obras hidráulicas habían perdido eficacia por la disminución de la pendiente producto del proceso de subsidencia. En 1965 se finaliza la construcción del Drenaje Profundo y en 2006 se crea el Túnel de los Remedios, una ampliación del Drenaje Profundo, cuyo objetivo ha sido reducir las inundaciones registradas al oriente de la ciudad de México (DGCOH, s/f 2).

Para la población de la delegación Iztapalapa, los efectos que causan las inundaciones se manifiestan generalmente en daños a las viviendas, en la infraestructura y en conflictos viales que generan pérdidas económicas, debido al retraso laboral. Es por ello que dentro de los objetivos principales que se han planteado en esta investigación, se encuentran el generar la cartografía de niveles de peligro de inundación; detectar los eventos más importantes de inundaciones sucedidas en el periodo 1998-2005, bajo el criterio de los daños ocasionados en los bienes materiales de la población afectada, así como de las características físicas de las inundaciones sucedidas en dicho periodo.

Asimismo, se ha realizado el análisis cartográfico para determinar las causas que generan a las inundaciones, así como la evaluación de las condiciones meteorológicas de lluvia, locales, con el propósito de determinar si existe influencia principal de la precipitación pluvial en los eventos individuales, de igual forma, si existe relación funcional entre la cantidad de precipitación y el tirante inundado. Todo ello con la finalidad de contar con una infor-

¹ La diferencia que se estableció entre inundación y encharcamiento fue básicamente el tirante de inundación, de tal manera que aquellos eventos menores a 0.30 m, se consideraron encharcamientos.

mación consistente que permita aplicar medidas de mitigación adecuadas y oportunas.

Las causas principales que han generado las inundaciones en la delegación Iztapalapa del Distrito Federal en el periodo 1998-2005, se deben a la heterogénea distribución espacial de la lluvia, así como a su intensidad y duración, las condiciones planas del relieve, la falta de mantenimiento y de capacidad del drenaje, así como al vertido de desechos sólidos en la vía pública.

Localización del área en estudio

La delegación Iztapalapa se localiza dentro de la Cuenca de México, específicamente en la porción

oriental del Distrito Federal; cuenta con una extensión de 115 km², lo que representa aproximadamente el 8% de esa entidad. La altitud a la que se encuentra es de 2 240 msnm.

Las delegaciones con las que colinda son: al norte Iztacalco, al noreste con el municipio de Nezahualcóyotl, al noroeste Benito Juárez, al oeste Coyoacán y al sur Tláhuac y Xochimilco. Las elevaciones del relieve que existen en el área son, el Cerro de la Estrella, con 2 450 msnm, el del Peñón del Marqués, con una elevación de 2 370 m, y la Sierra de Santa Catarina, que está constituida por una serie de conos volcánicos, con una longitud de 12 km y una elevación de 2 750 msnm (Figura 1).

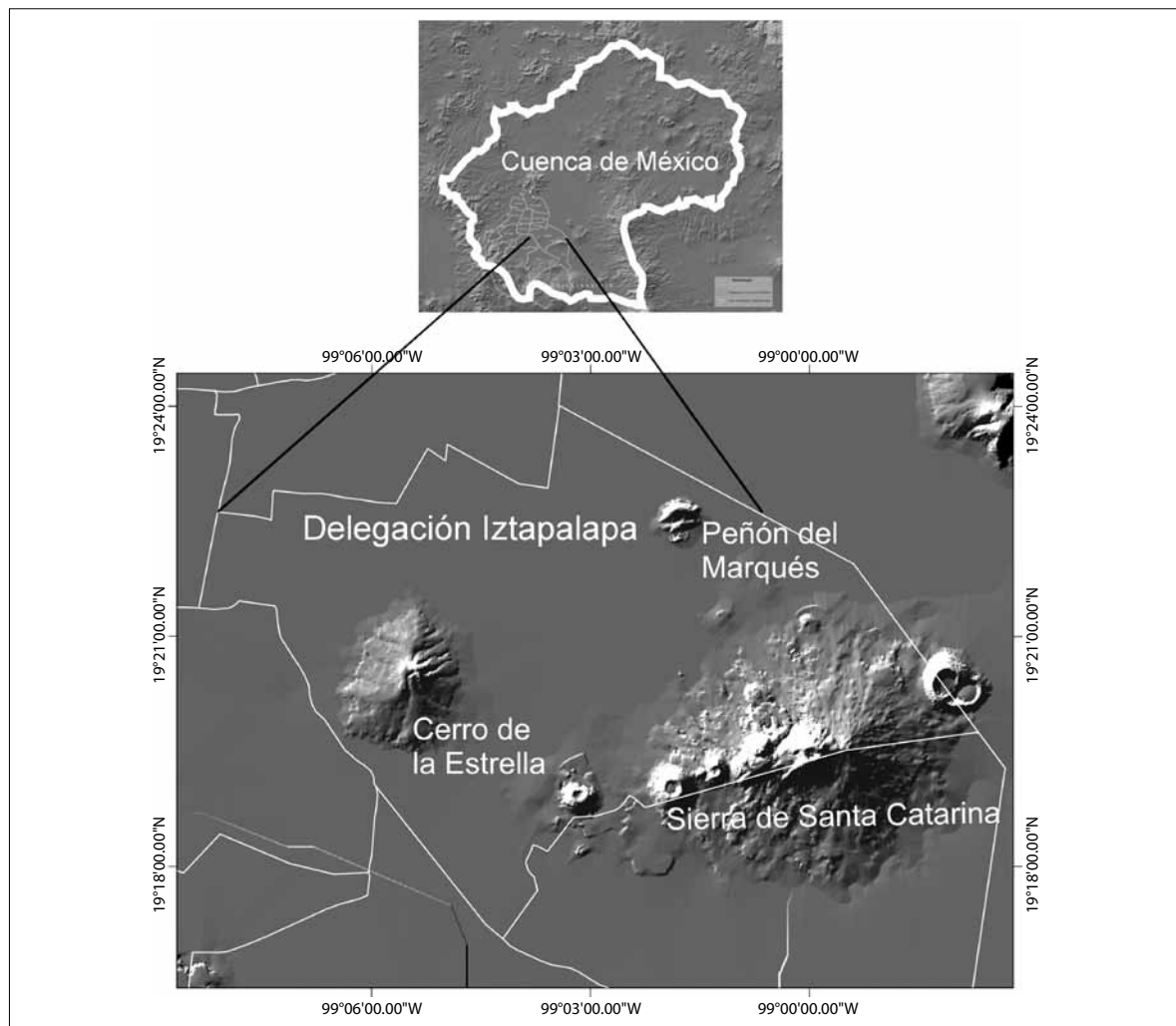


Figura 1. Localización del área en estudio.

Características biofísicas del área en estudio

En la Cuenca de México existe una diversidad de climas debido a la influencia orográfica. Por la latitud a la que se encuentra la ciudad de México, le correspondería un tipo de clima cálido, sin embargo, por su altitud se genera una considerable disminución de la temperatura media. De acuerdo con la modificación del sistema de clasificación climática de Köppen, modificado por García (Orellana y Vidal, 2005:41-58), el clima predominante de la cuenca es C(w) Templado subhúmedo con lluvias en verano, excepto en el área más baja, correspondiente al centro de la cuenca, en el área del ex lago de Texcoco y otra parte al nororiente, en los ex lagos de Zumpango y Xaltocan, que presentan el tipo de clima BS₁, semiseco (el menos seco de los BS).

Con respecto a Iztapalapa, el clima predominante es el Templado subhúmedo con lluvias en verano, de menor humedad C(Wo), correspondiente al 82% de la superficie delegacional y el 18% restante es BS₁K Semiseco (INEGI, 1998). La temperatura promedio es de 16.7° C, debido a que la temperatura del aire es mayor en los núcleos urbanos, por la capacidad de los materiales de construcción para almacenar calor (Jáuregui, 2000:69-76).

La Cuenca de México es resultado de diversos fenómenos de fallamiento, diferencia de presiones, calentamiento diferencial de la corteza, rejuvenecimiento de antiguas fracturas, que a lo largo de millones de años han dado su origen. Mooser (1975) estableció siete fases de volcanismo que dieron lugar a la cuenca, la última de ellas se originó durante el Cuaternario formando la Sierra Chichinautzin, lo que dio lugar a la generación de una cuenca endorreica.

La delegación Iztapalapa está asentada sobre una planicie de origen lacustre, la cual muestra un espesor de sedimentos de aproximadamente 700 m (Huizar, 1998). Dichos sedimentos fueron acreados por los cauces que descendían de las sierras existentes, como Xochitepec y Nevada (*Ibid.*).

Las características morfológicas del relieve de la delegación son de una superficie plana de origen lacustre (81%), y el resto pertenece a elevaciones volcánicas como la Sierra de Santa Catarina, El Ce-

rro de la Estrella y El Peñón del Marqués. La Sierra de Santa Catarina presenta siete conos volcánicos del Cuaternario: Yahualixqui, Xaltepec, Tetcón, Mazatepec, Tecuatzi, Guadalupe y La Caldera, constituidos principalmente de rocas basálticas intercaladas con piroclastos.

Sus laderas son de baja pendiente y no presentan una morfología fluvial importante. El estudio realizado por Lugo *et al.* (1994:43-52), indica que esta sierra presenta relieve de origen endógeno y exógeno; el endógeno es de tipo volcánico acumulativo y el exógeno es de tipo erosivo acumulativo y antrópico. Este último se debe a la extracción de material aprovechado para la construcción. La exposición de los derrames de lava indican que el volcán Guadalupe es el más joven con respecto a los conos mencionados anteriormente.

El Cerro de la Estrella tiene laderas poco inclinadas, constituidas por lavas basálticas cubiertas por piroclastos y tobas (Huizar, 1998). El Cerro del Peñón del Marqués es un volcán cinerítico formado por lavas y piroclastos, sus laderas son cortas y no presenta escurrimientos superficiales.

METODOLOGÍA

La investigación se llevó a cabo en tres fases: la primera fue la elaboración cartográfica que tuvo dos finalidades: *a)* dar un panorama general de la morfología del área en estudio, con base en la cartografía morfométrica y temática, y *b)* procesar el mapa final con base en la información hemerográfica correspondiente al periodo (1998-2005) y de la base de datos construida por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM),² la cual cubre registros disponibles en los años 2000 a 2005.

Se hizo un análisis de cada uno de los mapas procesados: inventario de inundaciones, intervalos de hundimiento, volumen máximo derramado de los principales sistemas de colectores, densidad de

² El Sistema de Aguas de la Ciudad de México actualmente es el organismo encargado de la infraestructura hidráulica del Distrito Federal, el cual tiene la función de dotar de agua potable y drenaje a la ciudad, para su saneamiento, y evitar inundaciones.

inundaciones, extensión máxima de inundaciones y tirante máximo de inundación. Estos tres últimos dieron lugar al *mapa descriptor* del fenómeno, el cual permite caracterizar el comportamiento de las inundaciones desde una perspectiva física.

Para la construcción de cada uno de los mapas se utilizó un procedimiento similar, que de manera general, consistió en elaborar bases de datos con formato de coordenadas de puntos x , y , z , éstas se exportaron a un programa de interpolación (*Surfer 8*), para aplicar esa técnica bajo los modelos *kriging* y distancia inversa cuadrática. Los mapas se exportaron al SIG ILWIS, versión 3.3 (ITC, 2007), en donde fueron editados y establecidos los intervalos de peligro, esto último se realizó con respecto al comportamiento que arrojó el histograma de cada mapa factor.

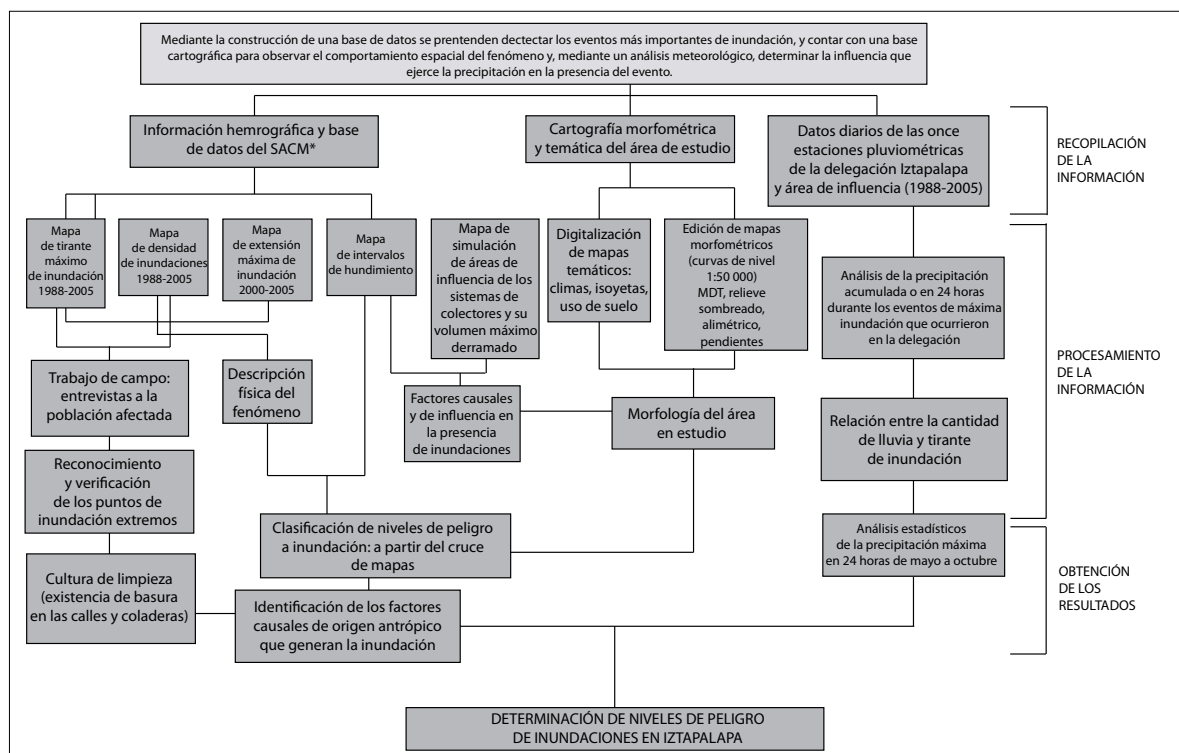
Para la obtención del mapa final de niveles de peligro, se realizó la sobreposición de los mapas factores, mediante la aplicación de operadores *booleanos* dentro de ILWIS, para ello fue necesario

considerar los tres mapas factores: 1. Descriptor del fenómeno, 2. Intervalos de hundimiento y 3. El mapa de posibilidad de inundaciones por grado de pendiente.

La segunda fase fue el procesamiento de datos meteorológicos y consistió en tres tipos de análisis: 1. De la precipitación máxima en 24 horas mensual y el promedio de precipitación mensual; 2. El análisis de la relación entre la precipitación y el tirante de inundación; y 3. La caracterización pluvial durante cada evento de inundación extrema (Figura 2).

El primero tuvo como objetivo determinar, de manera general, el comportamiento de la precipitación ante condiciones normales o frecuentes y, por otro lado, bajo condiciones extraordinarias. El segundo análisis tuvo como finalidad establecer si la cantidad de precipitación determina la magnitud de las inundaciones.

El método empleado consistió en la selección inicial de 29 eventos extremos que se presentaron durante el periodo de 1998 al 2005, que fueron



*Sistema de Aguas de la Ciudad de México.

Figura 2. Metodología aplicada para la determinación de los niveles de peligro a inundación en Iztapalapa, Distrito Federal.

contrastados con las fechas y estaciones pluviométricas más cercanas a los sitios de inundación. El tercer análisis indicó el comportamiento de la precipitación, ya sea en el término de 24 horas o bien la acumulada durante un periodo de días previos el evento de inundación.

En la tercera fase se realizó el trabajo de campo que tuvo como objetivo, por una parte, generar información a nivel local que pudiese ser integrada con la información evaluada en laboratorio, tal es el caso de las causas de las inundaciones a nivel local. Como segundo objetivo fue verificar si los resultados obtenidos en el análisis espacial fueron confiables.

Los criterios que se tomaron en cuenta para la selección de los sitios a verificar y para levantar datos de campo, fueron los siguientes: establecer por evidencias directas las áreas con mayor tirante de inundación, considerando los datos proporcionados por dos fuentes, el Sistema de Aguas de la Ciudad de México y, por otra, la base recopilada a partir de la información hemerográfica. Esto es, en la primera de ellas, aquellos eventos que se distinguieron por una inundación mayor o igual a 0.30 m de altura y, en el segundo caso, debido a que en las fuentes hemerográficas se tiende a aumentar la magnitud de los acontecimientos, se tomó en cuenta un tirante igual o mayor a 0.50 m, o que el tirante de agua acumulada haya ocasionado daños de consideración. En esta parte del proceso se utilizó un localizador satelital para posicionamiento geográfico (GPS); asimismo, se aplicaron formatos de campo para entrevistas y registro de información.

RESULTADOS

Análisis meteorológico

Precipitación máxima en 24 horas mensual y media de precipitación mensual

Los valores más altos de precipitación máxima en 24 horas (PM24 hr) durante el periodo 1998-2005, considerando aquéllas de más de 50 mm por día, se presentaron en cuatro de las estaciones pluviométricas de la delegación Iztapalapa con las claves: 20. Municipio Libre, 27. Xotepingo y 28. Aculco; estas tres se ubican al norte y noroeste

del área en estudio, en cambio la 31. Subestación Santa Catarina, es la única que se encuentra al sureste del área. El resto de las estaciones localizadas al centro y este de la delegación, no superan la precipitación máxima en 24 horas.

De los seis meses considerados como de mayor precipitación (mayo a octubre), dos muestran valores menores de precipitación media acumulada mensual, éstos son mayo y octubre, los cuales no superan el valor de 60 mm mensuales de precipitación (Figura 3). De manera general, se evidencia en esa figura, una disminución de la precipitación pluvial en sentido oeste-este, de tal manera que al este existe la menor cantidad de lluvia, sin embargo, estos resultados no corresponden con los sitios considerados de mayor peligro en términos de su densidad, tirante y extensión, lo cual queda de manifiesto en el mapa *descriptor* del fenómeno.

Las inundaciones de mayor magnitud en términos de su tirante máximo alcanzado se presentaron al oriente del área en estudio, y además la cantidad de precipitación que las ocasiona es mucho menor, con respecto a las que sucedieron al poniente de la delegación Iztapalapa. Es claro que no existe una relación funcional de cierta cantidad de lluvia para que se produzca un tirante de inundación determinado (Figuras 4 y 5).

Caracterización pluvial durante los eventos de inundación extrema

Para su realización se configuró el comportamiento espacial de la precipitación acumulada durante los dos días previos, en promedio, a la presencia de las inundaciones. Se analizaron en total veinte inundaciones extremas, calificadas de esta manera porque destacan en la magnitud de su tirante máximo alcanzado y de los daños ocasionados. De las veinte inundaciones extremas, catorce se presentaron en el oriente de la delegación, dos en el sur de la delegación, dos al poniente y la restante al norte de la delegación (Tabla 1).

Considerando lo anterior, es claro observar que las inundaciones son principalmente de origen pluvial; asimismo, se puede ver que los resultados que arrojó esta parte del análisis indican, por un lado, que antes o durante los días de las inundaciones extremas se presentó lluvia y, por otro lado,

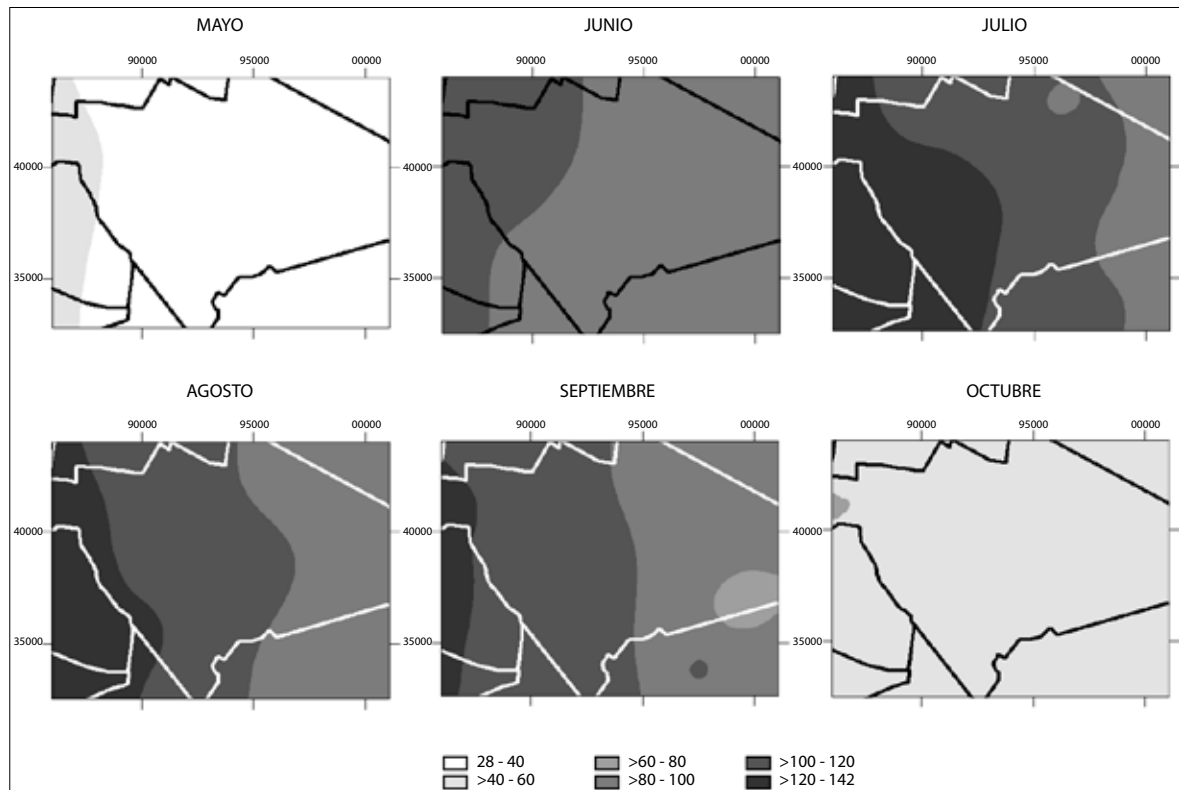


Figura 3. Promedio de precipitación acumulada en los meses de mayor precipitación.

la mayoría de los eventos extremos coincidieron espacialmente con las estaciones pluviométricas que registraron la precipitación máxima, ya sea acumulada o en 24 horas, previo al evento.

Sin embargo, a nivel local la precipitación no ejerce una gran influencia, en la magnitud del nivel de peligro de las inundaciones y esto se fundamenta por dos razones:

- El análisis de la relación entre la cantidad de precipitación máxima en 24 horas, o la acumulada previa a los eventos de inundación extrema, y el tirante registrado indican que no existe una relación estrecha entre ambas variables.
- La delegación Iztapalapa, presenta dos sectores muy diferenciados en términos de la cantidad de precipitación máxima en 24 horas (poniente y oriente), siendo la porción oriente la que presenta menor cantidad de lluvia; sin embargo, también es el área de mayor tirante de inundación.

Análisis espacial y ponderación de los factores

En la primera fase del procesamiento cartográfico se obtuvo el mapa *descriptor* del fenómeno, resultado de la sobreposición y ponderación de los siguientes mapas: densidad de inundaciones 1998-2005, tirante máximo 1998-2005 y extensión máxima 2000-2005 (Figuras 6a, 6b y 6c), su objetivo es describir las características físicas de las inundaciones en términos de los criterios antes señalados y muestra que el mayor nivel de peligro de las inundaciones, espacialmente, ocurre en la porción noreste del área en estudio.

Generalizando, las peores inundaciones en términos de su densidad, profundidad y extensión, espacialmente se localizan en sitios que presentan elevaciones aledañas, tales como la Sierra de Santa Catarina, el Cerro de la Estrella y el Peñón Viejo o del Marqués, con excepción de la U. H. Vicente Guerrero, la cual no es influida por este factor (Figura 7).

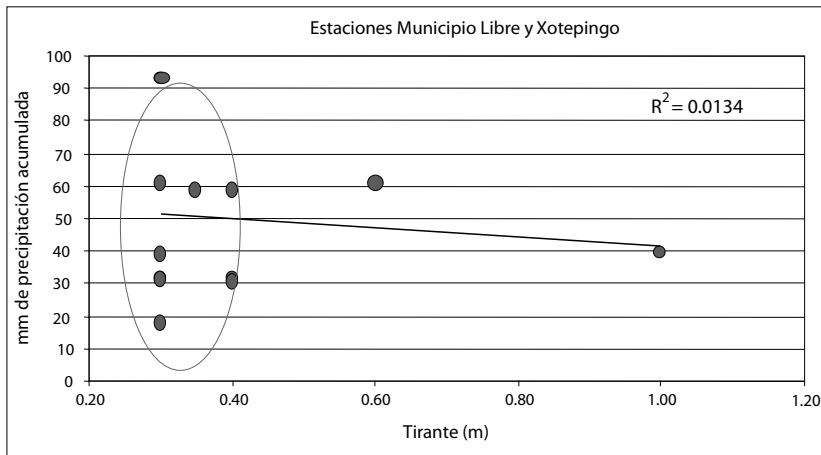


Figura 4. Relación entre los tirantes máximos de inundación y la cantidad de precipitación acumulada, previa al evento (poniente de la delegación).

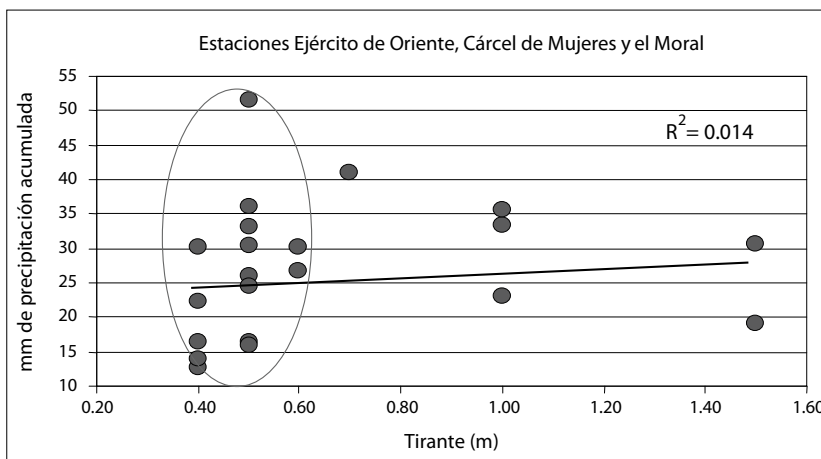


Figura 5. Relación entre los tirantes máximos de inundación y la cantidad de precipitación acumulada, previa al evento (oriente de la delegación).

La mayor área de nivel de peligro alto está localizada al oriente de la delegación y expuesta a los escurrimientos del Peñón Viejo, además, se encuentra relativamente cerca al ex lago de Texcoco, siendo la parte más baja de la Cuenca de México y altamente susceptible a sufrir inundaciones. Por otro lado, en la mayoría de los casos, las peores inundaciones coinciden con las áreas de influencia de los sistemas de colectores que sufren de mayor derrame, éstos son INDECO y las Torres, los cuales se encargan de drenar la porción oriental del área en estudio.

Mapa de intervalos de hundimiento o subsidencia

En el mapa de la Figura 8 se señalan las áreas que han sufrido de una mayor magnitud de asentamiento del terreno. Las áreas con mayor hundimiento

se caracterizan por ser sitios cuya dimensión del nivel de peligro de inundaciones en términos de su profundidad de la lámina del agua es mayor, con respecto al resto de las áreas circundantes y de la misma delegación.

Aunque los hundimientos son causados en primera instancia por factores antrópicos, las características estratigráficas del área son las que influyen de manera importante en este proceso, de tal manera que se consideró esta variable como un agente detonante del peligro.

La estratigrafía del área lacustre de la Ciudad de México está constituida por materiales arcillosos por lo cual al efectuar la extracción del agua subterránea del acuífero, mediante técnicas de bombeo, es común observar la presencia de hundimientos regionales, considerándolos como el descenso de

Tabla 1. Resultados obtenidos del análisis de las veinte inundaciones extremas y la configuración de la precipitación acumulada previa al evento

Fecha de la inundación	Sitio en donde se presentó la inundación	¿Existió la presencia de fenómenos meteorológicos extremos?	Máxima precipitación registrada en la delegación (A) mm	Máxima precipitación registrada en la estación pluviométrica más cercana del evento (B) mm	¿Existe relación entre A y B?
30/09/1998	Al oriente de la delegación	Si	150	31	No
28/05/2000	Desarrollo Urbano Quetzalcóatl	Si	38	38	Si
15/06/2000	Paraje Zacatepec y Ejército de Oriente Zona Peñón	Si	50	32	No
17/10/2000	Juan Escutia	Si	33	33	Si
23/09/2001	San Lorenzo Xicoténcatl	Si	25	25	Si
09/09/2002	Santa Martha Acatitla Sur	Si	52	52	Si
13/09/2002	Al poniente de la delegación	Si	61	61	Si
05/07/2003	Central de Abastos	No	30	30	Si
30/07/2003	San Lorenzo Xicoténcatl	No	60	36	No
04/09/2003	San Lorenzo Xicoténcatl	Si	46	16	No
27/09/2003	San Lorenzo Xicoténcatl	Si	72	41	No
09/06/2004	San Lorenzo Xicoténcatl	No	27	27	Si
12/06/2004	Al oriente de la delegación	Si	40	33	No
18/06/2004	San Lorenzo Xicoténcatl	No	22	15	No
26/06/2004	Santa María Aztahuacán	No	37	37	Si
21/07/2004	Minerva	No	38	32	Si
04/08/2004	Santa María Aztahuacán	Si	14	32	No
07/09/2004	Pueblo de Santa Martha Acatitla	Si	22	22	Si
20/07/2005	San Lorenzo Xicoténcatl	Si	70	50	No
12/10/2005	Triángulo de las Agujas	Si	40	40	Si

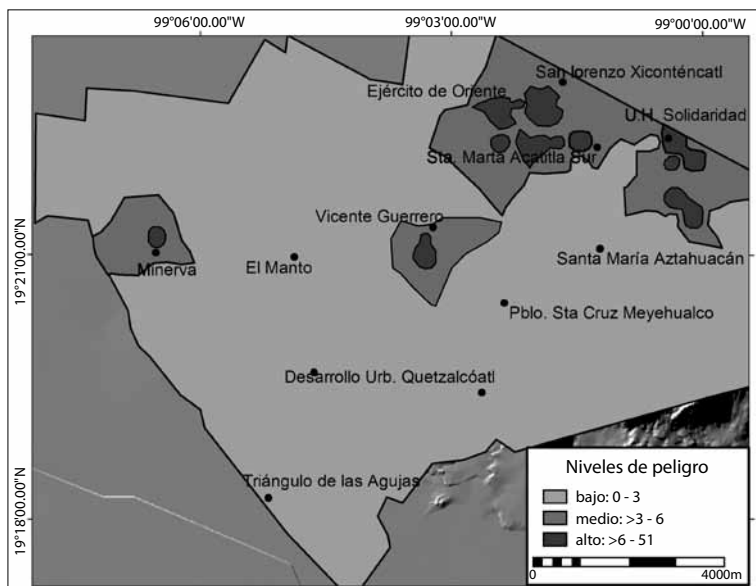


Figura 6a. Mapa de frecuencia de inundaciones (1998-2005).

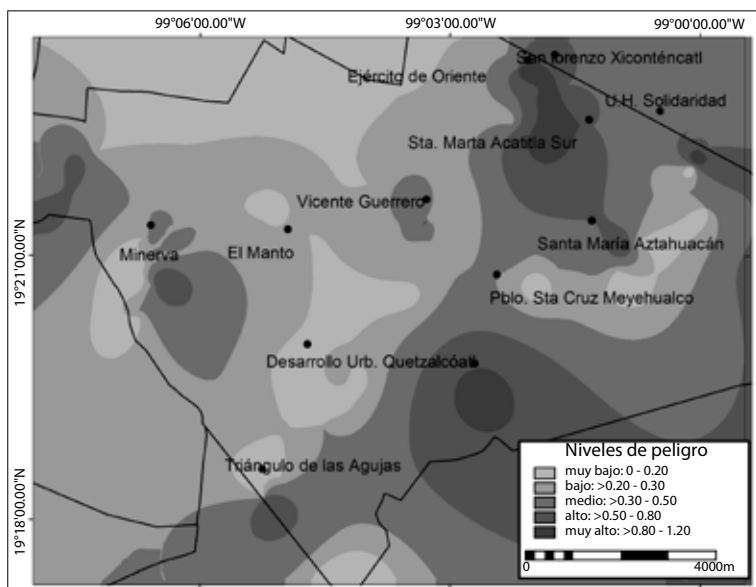


Figura 6b. Mapa de tirante máximo de inundación (1998-2005).

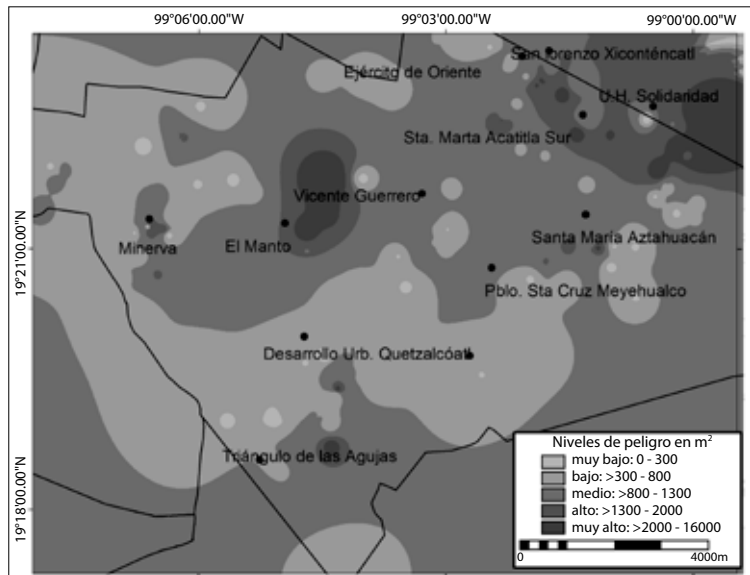


Figura 6c. Mapa de extensión máxima de las inundaciones (2000-2005).

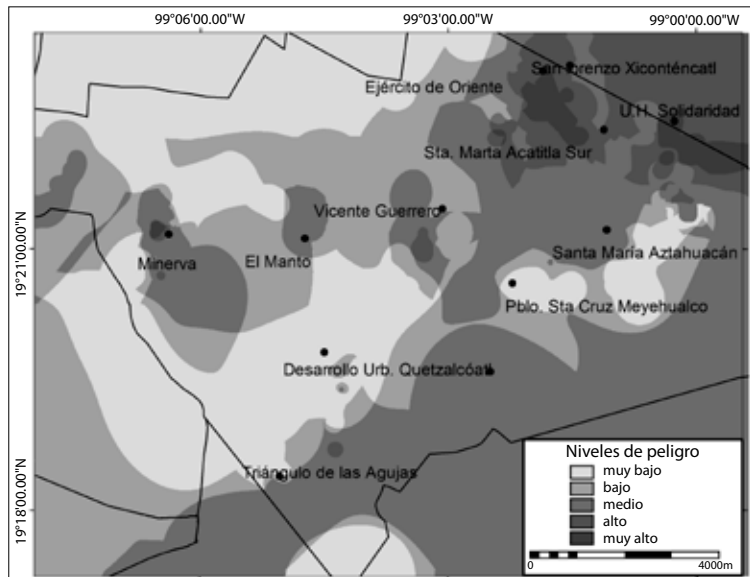


Figura 7. Características de las inundaciones en términos de su densidad, tirante y extensión máxima.

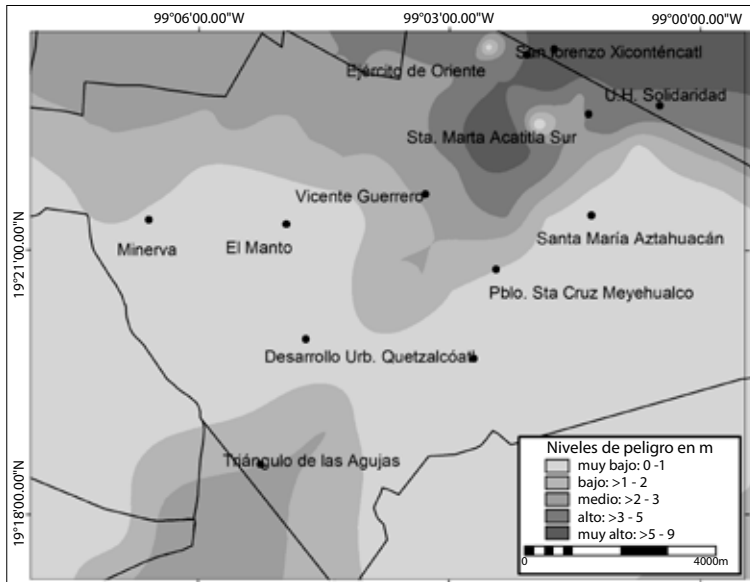


Figura 8. Mapa de intervalos de hundimiento o subsidencia (1985-2005).

Fuente: a partir de información de bancos de nivel del SACM.

un área de terreno de extensión determinada, con respecto a su nivel original (Estado de México, 2007).

Las áreas con mayor afectación por este tipo de fenómenos se concentran en las zonas de transición, entre un suelo de origen lacustre tipo arcilloso y otro de depósitos volcánicos, donde se produce un proceso de hundimiento diferencial, en el cual normalmente se presentan agrietamientos, definiendo esta última como “aberturas de la superficie del suelo, que se forman como consecuencia del esfuerzo de tensión en la masa del subsuelo, que siguen un comportamiento aproximadamente paralelo a las curvas de nivel o de los contornos de las formaciones de material distinto” (Gutiérrez *et al.*, 1991:98-108), son visibles al oriente de la ciudad, específicamente en la periferia del Peñón de los Baños, del Peñón Viejo, en este último en el tramo final de la Calzada Ignacio Zaragoza. En los años setenta, del siglo pasado, ya se observaban hundimientos y agrietamientos en las cercanías del Cerro de la Estrella, entre Churubusco y Apatlaco (Murillo *et al.*, 1991:79-94).

Murillo *et al.* (*op. cit.*:79-94), establecen que el Peñón Viejo está constituido de material piroclástico que favoreció la presencia de manantiales que fueron explotados intensamente para su uso, ocasionando un hundimiento diferencial y con ello

agrietamientos que afectan principalmente a las colonias Ejército de Oriente, José María Morelos y ejidal Santa Martha Acatitla.

Dicha zona está caracterizada por grandes espesores de arcilla blanda, altamente compresibles. De acuerdo con el mapa obtenido, esta área alcanza un intervalo de hundimiento >5-9 m a lo largo de 20 años (1985-2005). Existen varios factores que influyen en la presencia de los agrietamientos, uno de ellos es el de las lluvias intensas que generan encharcamientos, los cuales actúan como favorecedores en la propagación de las grietas, esto debido a la presión hidráulica que generan por la acumulación del agua (Auvinet y Arias, 1991:21-31).

Infraestructura hidráulica

El principal dren de la delegación Iztapalapa es el río Churubusco, pues en él se descargan la mayoría de los principales sistemas de colectores, y el resto es desalojado a través del canal Nacional y de Chalco. De acuerdo con el plan de acciones hidráulicas de la Delegación Iztapalapa (DGCOH, s/f 2), existe una cobertura del 91% del servicio de drenaje, en el área.

Para la elaboración del mapa de nivel de peligro del volumen máximo derramado de los sistemas de colectores fue necesario considerar el resultado de las simulaciones de la eficiencia actual de los

principales sistemas de colectores,³ posteriormente con apoyo de un mapa base de la localización de la infraestructura hidráulica (DGCOH, s/f 3) y de la información de las colonias drenadas por cada sistema de colector, se elaboró el mapa de áreas de influencia de los sistemas de colectores. Finalmente, se establecieron cinco intervalos de peligro con respecto a su volumen de derrame (Figura 9).

Se presume que la distribución espacial de los colectores influye considerablemente, pues aquellos que se encargan de drenar áreas que están expuestas al escurrimiento de las partes altas, como la Sierra de Santa Catarina, Cerro de la Estrella y Peñón Viejo, son de peligro alto en términos de su volumen máximo derramado, esto debido a las grandes cantidades de agua que deben desalojar por unidad de tiempo.

Para aquellos colectores que están distribuidos en áreas que no presentan elevaciones del relieve, disminuye gradualmente su amenaza. El caso del colector Zona Urbana INDECO es crítico, ya que además de drenar las áreas circundantes al Peñón Viejo, presenta graves problemas de hundimiento y agrietamiento, lo que ocasiona su ineficiencia. Con respecto al colector Iztapalapa II, aunque por ubicación no está cerca de elevaciones del relieve, el área que se encarga de drenar es muy extensa generando ineficiencia en su uso.

De lo anterior se concluye, que el nivel de peligro del volumen máximo derramado está en función de su localización, la dimensión de su área de influencia, la existencia de fenómenos de asentamiento regional y el tamaño del diámetro de los conductos de los sistemas de colectores.

Niveles de peligro por colonia mediante la evaluación directa en campo

A partir de la información obtenida directamente en campo, mediante observaciones y entrevistas, fue posible valorar localmente los diferentes niveles de peligro a la presencia de inundaciones

por colonia. De manera general, se realizó la observación y levantamiento de información sobre: datos precisos sobre las características de las inundaciones ocurridas durante el periodo estudiado (número de inundaciones/año, nivel del tirante de encharcamiento o inundación, calles con mayor afectación, y su extensión); los rasgos visibles de los daños ocasionados en las viviendas y en el espacio público, condiciones actuales en que se encuentra la infraestructura hidráulica, formas de organización y las medidas implementadas por parte de la población afectada para disminuir los efectos de los encharcamientos o de las inundaciones.

Para la elección de los sitios de evaluación directa se consideró la frecuencia de las mayores inundaciones en el periodo considerado, y se tomó como medida para ello las colonias que tienen entre 10 y 20, o más, inundaciones por año.

Las que presentaron esta condición fueron, la U. H. Ejército de Oriente, el Pueblo de Santa Martha Acatitla, San Lorenzo Xicoténcatl, Desarrollo Urbano Quetzalcóatl y Santa María Aztahuacán. Asimismo, de las 17 colonias que se evaluaron directamente en el trabajo de campo, se encontró que seis de ellas tienen un tirante de inundación mayor a 0.50 m. Las colonias que presentan estas características son: la U. H. Ejército de Oriente, la U. H. Solidaridad, La Colmena, Pueblo de Santa Martha Acatitla, San Lorenzo Xicoténcatl y Santa María Aztahuacán (Tabla 2).

Reclasificación, sobreposición cartográfica y mapa final de peligro

En la última fase de la investigación se seleccionó la cartografía para el procesamiento del mapa final y se clasificó en sus diferentes niveles de peligro. Se procedió a crear una tabla base de reclasificación, en la cual se muestra cada una de las capas o variables agrupadas en sus respectivas clases y a cada una de ellas se le asignó un peso factorial acumulativo, de tal manera que los pesos asignados variaban entre 0 como mínimo y 1 como máximo (Tabla 3).

Dado que se consideró que las variables, profundidad máxima de la lámina del agua, extensión máxima de la inundación, densidad de inundaciones, intervalos de hundimiento y grados de pendiente, son del mismo nivel de importancia, se les

³ La eficiencia actual de los principales sistemas de colectores resultó de un estudio que se llevó a cabo a partir de la DGCOH y el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México; dichos resultados se retomaron en este estudio (DGCOH, s/f 1).

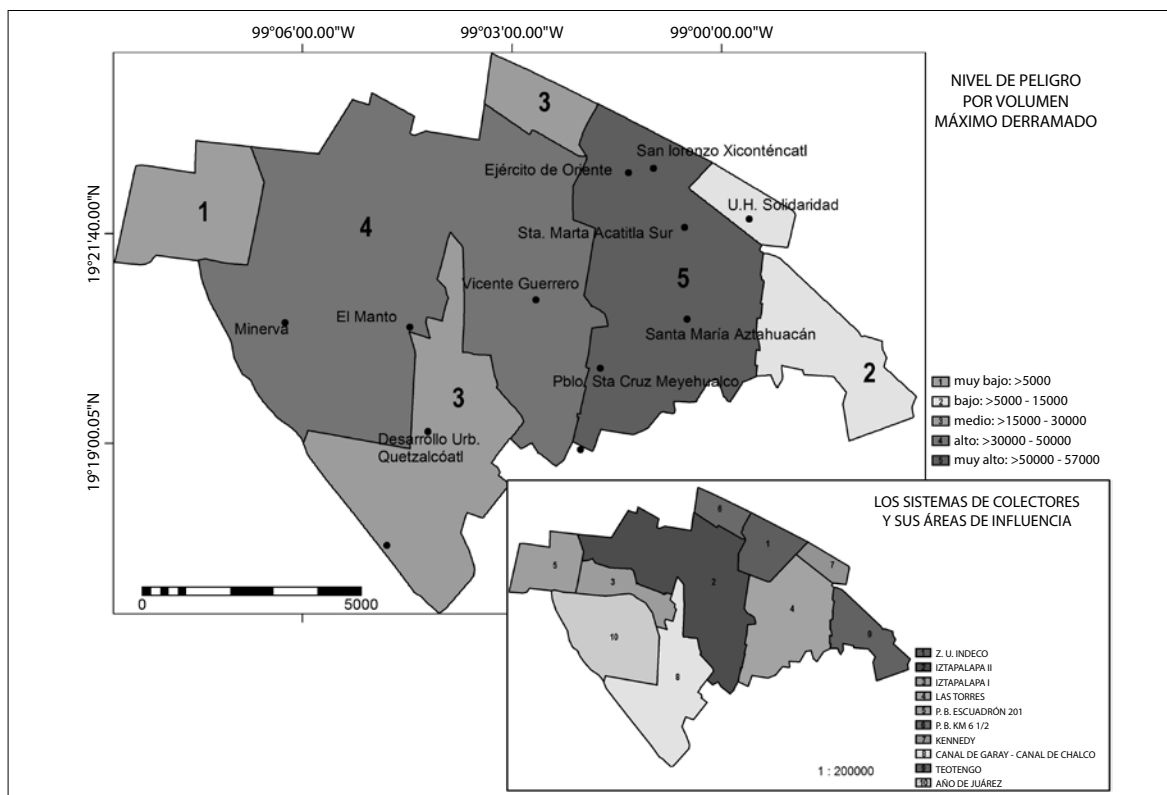


Figura 9. Mapa de nivel de peligro, en función del volumen máximo derramado de los sistemas de colectores de Iztapalapa.

asignó un coeficiente de peligro igual a 1, en todos los casos, de tal manera, que al sumarlos todos, el mayor nivel de peligro sería de cinco.

A partir de la Tabla 3, se aplicaron funciones de cálculo con mapas, usando operadores *booleanos* condicionales. Una vez obtenida la reclasificación en los cinco mapas se procedió a efectuar su superposición cartográfica mediante el operador de suma aritmética.

En una primera etapa se sumaron solamente tres mapas, a los cuales se les consideró como las variables que ayudaron a describir el comportamiento del fenómeno, éstas son, profundidad máxima de la lámina del agua, extensión máxima de la inundación y densidad de inundaciones.

Al mapa resultante se le denominó de *factores descriptivos*. Por otro lado, se realizó la suma de la variable resultante (niveles de hundimiento), al resultado de este mapa se le llamó *factor disparador de la magnitud del peligro*, ya que su presencia acentúa el nivel de peligro.

Al producto resultado de la suma de ambos factores expuestos, se le sumó el mapa de *posibilidad de inundaciones por grado de pendiente*, el cual tiene la función de anular aquellas áreas con una pendiente mayor a dos grados, resultando con ello el mapa final de niveles de peligro a inundaciones.

El mapa de niveles de peligro a inundaciones (Figura 10) muestra la proporción que guarda cada nivel de peligro en el área en estudio; de tal manera que el nivel de peligro medio es el que abarca más de la mitad del área con relieve plano de la delegación, con un 68%; por el contrario, el nivel más alto de peligro solamente se presenta en el 6% de la porción plana de la delegación.

En la Tabla 4 se indican las características de cada nivel de peligro de inundación, con respecto a las variables analizadas.

Por ejemplo, el nivel de peligro muy alto se aprecia en zonas que tienen intervalos de hundimiento mayores de cinco hasta nueve metros y las inundaciones que presenta son de un tirante máximo que

Tabla 2. Niveles de peligro por colonia a partir de la información de las entrevistas con la población local

Nivel de peligro	Colonia	DATOS REFERIDOS AL TRABAJO DE CAMPO			
		Calles con mayor afectación	Frecuencia de inundaciones/año	Tirante máximo de inundación	Nivel del tirante de encharcamiento o inundación
Muy alto	Ejército de Oriente zona Peñón	Joaquín Ibargüen, Carlos Ramírez módulos 1, 2 y 3. Av. Exploradores de Ejército de Oriente	Por lo menos dos veces al año	1.0 m	0.30 m
	U.H. Ejército de Oriente	Sobre la Calzada Ignacio Zaragoza y Av. México	20 veces	1.5 m	0.40 – 0.60 m
	U.H. Solidaridad	Entre Av. Texcoco y Ahuehuetes	> 2 veces	> 1.0 m	0.50 m
	La Colmena	Sobre Av. Texcoco hasta el límite de José María Gutiérrez	2 3 veces	1.20 m	0.50 m
	Minerva *	Trojes, Agricultores esquina con Sur 129 y Silos	2 veces	> 0.70 m	0.20 – 0.30 m
	Pueblo Santa Martha Acatitla	Calzada Ignacio Zaragoza, Cayetano Andrade, José Indelicato y Celio García	10-20 veces	1.5 m	0.70 – 0.80 m
	San Lorenzo Xicoténcatl	Balvanera, Ahome y Calzada Ignacio Zaragoza	10 20 veces	1.0 m	> 0.50 m
	Santa Martha Acatitla Sur	José Peña del Valle a la altura de Luis García y Solón Argüello	SDF	0.90 m	0.30 m
	U.H. Vicente Guerrero *	Av. Revolución Social a partir de Carlos Magaña hasta Carlos del Valle	Ocasionales	> 0.50 m	0.10 m
Alto	Ampliación Sinatel	Central Telefónica entre Lada y Sinatel	2 veces	> 0.50 m	0.10 m
	Desarrollo Urbano Quetzalcóatl *	Villa Franqueza, Villa Ce esquina con Villa Flor, Villa Cid, Av. Manuel Cañas y Villa Figueroa.	10 veces	1.5 m	0.30 m
	Santa María Aztahuacán	Av. Jalisco, San Miguel, Av. Primavera, Naranjo, Alcanfor	10 – 20 veces	> 1.0 m	0.50 m
	Sinatel	Sobre Río Churubusco	2 veces	> 0.90 m	0.30 m
Bajo	Cerro de la Estrella *	Lebrija, Marmolejo y Calzada de San Lorenzo	4 – 5 veces	0.70 m	0.20 m
	San Nicolás Tolentino *	Toda la manzana correspondiente a Bilbao y Catarroja esquina con Av.11 hasta la Calzada de San Lorenzo	4 – 5 veces	0.50 m	0.10 – 0.15 m
	Santa Isabel Industrial	Sobre la Av. Tláhuac, con afectación principalmente en locales comerciales	Ocasionales	0.50 m	0.20 m
	U.H.Fuerte de Loreto	Con afectación a estacionamientos	Ocasionales	0.50 m	0.10 m

* Sitios que conforme al trabajo de campo, son de distinto nivel de peligro. SDF Sin datos de frecuencia de las inundaciones/año.

Tabla 3. Reclasificación de las variables bajo estudio

Variable	Intervalos-clasificación		Peso factorial	Coefficiente de peligro
Profundidad de la lámina del agua m ²	0.15-0.20	Muy bajo	0.10	1
	>0.20-0.30	Bajo	0.25	
	>0.30-0.50	Medio	0.50	
	>0.50-0.80	Alto	0.75	
	>0.80-1.20	Muy Alto	1.00	
Extensión máxima de la inundación m ²	0-300	Muy bajo	0.10	1
	>300-800	Bajo	0.25	
	>800-1,300	Medio	0.50	
	>1,300-2,000	Alto	0.75	
	>2,000-16,000	Muy Alto	1.00	
Densidad de inundaciones	0-3	Bajo	0.25	1
	>3-6	Medio	0.50	
	>6-51	Alto	1.0	
Intervalos de hundimiento m ²	0-1	Muy bajo	0.10	1
	>1-2	Bajo	0.25	
	>2-3	Medio	0.50	
	>3-5	Alto	0.75	
	>5-9	Muy Alto	1.00	
Mapa de niveles de peligro por el grado de pendiente	0-20	Con posibilidad de inundarse	1.0	1
	>2-640	Con nula posibilidad de inundarse	0.0	

oscila de más de 0.80 m hasta 1.20 m, con una máxima extensión de 2 000 m² hasta 16 000 m² y su densidad ha alcanzado hasta 51 eventos en algunos casos.

CONCLUSIONES

En el mapa descriptor de las inundaciones en la delegación Iztapalapa se encontró que los sitios que coinciden en términos de su densidad, tirante máximo y extensión máxima de las inundaciones, están localizados al noreste de la delegación, dichos

sitios están directamente relacionados con las áreas de mayor magnitud de subsidencia.

El análisis de la caracterización pluvial durante los eventos de inundación extrema indica que las inundaciones que ocurren en Iztapalapa son de origen pluvial, siendo la mayoría de los eventos influenciados por la presencia de los fenómenos meteorológicos extremos, sin embargo, a nivel local, se observa que no existe una estrecha relación entre la cantidad de lluvia máxima en 24 horas y el tirante de inundación registrado.

Aunque la lluvia es el factor detonante para la presencia de las inundaciones, se encontró que los

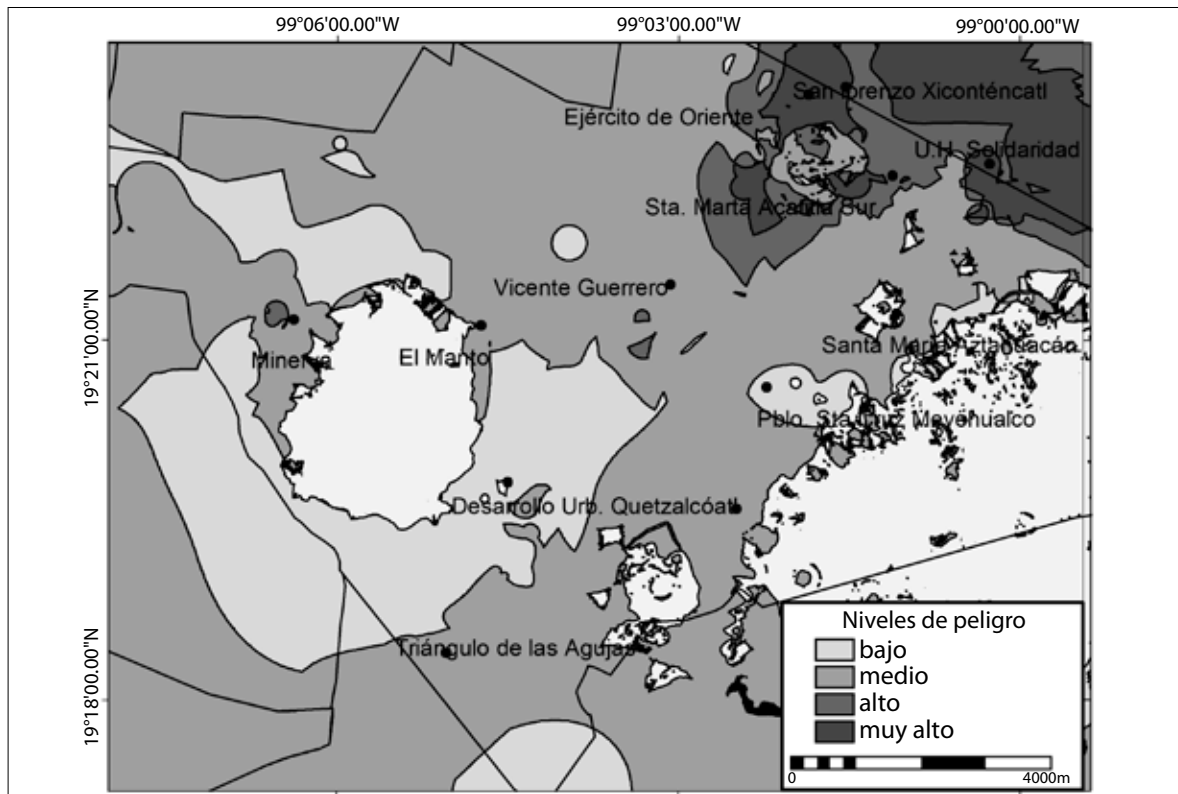


Figura 10. Mapa de niveles de peligro a inundaciones en la delegación Iztapalapa, Distrito Federal (1998-2005).

Tabla 4. Características de cada nivel de peligro, por variable considerada

Nivel Variables	Muy alto	Alto	Medio	Bajo
Hundimiento (m)	>5-9	>3-5	>2-3	<2
Densidad (núm. de eventos)	s/n	>6-51	>3-6	0-3
Tirante máximo m	>0.80-1.20	>0.50-0.80	>0.30-0.50	<= 0.30
Ext. Máx. m ²	>2 000-16 000	>1 300-2 000	>800-1 300	<= 800

s/n: sin nivel en ese intervalo.

cambios en el relieve, la presencia de los hundimientos, la falta de capacidad y de mantenimiento de la infraestructura hidráulica, son las variables que determinan la magnitud de las inundaciones.

Se determinó que existen ocho colonias que presentan un nivel de peligro muy alto de inundación: Ejército de Oriente zona Peñón, Ejército de Oriente zona ISSSTE, San Lorenzo Xicoténcatl, Santa Martha Acatitla Sur, Pueblo de Santa Martha Acatitla, Minerva, U. H. Solidaridad, U. H. La Colmena; siete de éstas están localizadas en la porción oriente del área en estudio. Todas estas áreas presentan un problema de falta de capacidad de los colectores y de mantenimiento del drenaje.

Con respecto al funcionamiento de los sistemas de colectores se encontró que el nivel de amenaza por volumen máximo derramado está en función de su ubicación, la dimensión de su área de influencia, la existencia de fenómenos de asentamiento regional y el tamaño del diámetro de sus conductos.

Se encontró que una de las variables principales que influyen en la presencia de las inundaciones en Iztapalapa son los hundimientos, tanto por la configuración topográfica resultante, como por los daños que ocasionan al sistema hidráulico.

Aproximadamente el 68% del relieve plano de la delegación Iztapalapa está dentro de los niveles medios de peligro a la presencia de inundaciones, asimismo, se encontró una confiabilidad alta del análisis espacial y la ponderación de los factores en la determinación de los niveles de peligro a inundaciones, con respecto a lo evaluado en el trabajo de campo.

El efecto de las inundaciones disminuye considerablemente en aquellas colonias en donde la población se encuentra organizada e implementa cambios de construcción tanto en las calles como en sus propias viviendas.

Las variables analizadas fueron significativas para la obtención del mapa de niveles de amenaza a la presencia de inundaciones en la delegación Iztapalapa en el Distrito Federal, y el método aplicado en este trabajo significa una alternativa viable para estudios de inundaciones en megaciudades de Latinoamérica.

REFERENCIAS

- Ávila López, R. (1991) "*Chinampas de Iztapalapa, D. F.*", Instituto Nacional de Antropología e Historia, México.
- Auvinet, G. y A. Arias (1991), "Propagación de grietas", en *Memoria de la Reunión sobre agrietamientos de suelos*, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, pp 21-31.
- Carballal Staedtler, M. y M. Flores Hernández (1997), "Tecnología de prevención de inundaciones en la Cuenca de México, durante el horizonte posclásico", en García Acosta, V., *Historia y desastres en América Latina*, La RED, CIESAS, ITDG, vol. II, pp 77-94.
- CENAPRED (2004), *Inundaciones*, Serie Fascículos, Centro Nacional de Prevención de Desastres, México.
- DGCOH (s/f 1), *Plan Maestro de Drenaje de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (1994-2010)*, Departamento del Distrito Federal, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, México.
- DGCOH (s/f 2), *Plan de Acciones Hidráulicas 2001-2005. Delegación Iztapalapa*, Departamento del Distrito Federal, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, México.
- DGCOH (s/f 3), *Infraestructura de drenaje de la delegación Iztapalapa*, plano 2, Gobierno del Distrito Federal, Secretaría del Medio Ambiente, México.
- Domínguez, M., E. Jiménez, J. García y S. Salas (1994), *Reflexiones sobre las inundaciones en México*, Cuadernos de Investigación No. 4, Centro Nacional de Prevención de Desastres, México.
- Estado de México (2007), *Protección Civil del Estado de México* [<http://www.edomexico.gob.mx/pls/portal/docs/page/proteccioncivil/imagenes/HUNDIMIEN-TOS.pdf>].
- Gutiérrez, S. C., R. A. Cuevas y M. B. Sánchez (1991), "Soluciones geotécnicas para el agrietamiento de suelos", en *Memoria de la Reunión sobre agrietamientos de suelos*, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, pp. 98-108.
- Huizar Álvarez, R. (1998), *Definición del control de la calidad del agua subterránea extraída de la subcuenca de México. Delegación Iztapalapa*, Instituto de Geología, UNAM, Convenio-CONSERVA, T.1, Aire-Agua, pp. 409-551.
- IDEAM (2007), *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia* [<http://www.ideam.gov.co/>]
- INEGI (1998), *Cuaderno Estadístico Delegacional. Iztapalapa, Distrito Federal*, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México.
- ITC (2007), *Integrated Land and Water Information System (ILWIS)*. Versión 3.3, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, The Netherlands.

- Jáuregui, E. (2000), "Clima", en Garza, G. (comp.), *La Ciudad de México en el fin del segundo milenio*, Departamento del Distrito Federal, El Colegio de México, México.
- Lugo Hubp, J., F. Mooser, A. Pérez Vega y J. J. Zamorano Orozco (1994), "Geomorfología de la Sierra de Santa Catarina, D. F., México", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. II, núm.1, Instituto de Geología, UNAM, México, pp. 43-52.
- Mooser, H. F. (1975), *Estructura Geológica*, en Garza, G. (comp.), *La Ciudad de México en el fin del segundo milenio*, Departamento del Distrito Federal, El Colegio de México, México.
- Murillo Fernández, R., R. Morales Monroy y A. Hernández Rubio (1991), "Agrietamiento lacustre al oriente de la Ciudad de México", en *Memoria de la Reunión sobre agrietamientos de suelos*, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, pp. 79-94.
- Orellana, L. y Z. Vidal (2005), *Enriqueta García, Antología*, Centro de Investigación Científica de Yucatán e Instituto de Geografía, UNAM, pp. 41-58.
- Perló Cohen, M. (1999), *El Paradigma Porfiriano, Historia del Desagüe del Valle de México*, Instituto de Investigaciones Sociales, UNAM, México.