

**Desarrollo de una metodología para el estudio de las inundaciones causadas por encharcamiento de agua de lluvia en zonas urbanas relativamente planas.
Area de estudio: Montería (Colombia)**

Development of a methodology for the study of floods caused by ponding of rainfall water in relatively flat urban zones. Studied area: Montería (Colombia)

Manuel Padilla Agamez¹ y Leonardo Gónima²

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones son consideradas el desastre natural que afecta a mayor cantidad de población que cualquier otro alrededor del mundo. Los impactos causados por ellas se pueden medir teniendo en cuenta las perturbaciones y destrucción de los medios de subsistencia y de los cambios en las condiciones socio-económicas de la población afectada. En este sentido, el riesgo de ocurrencia de este fenómeno adquiere una gran importancia al estar asociado al territorio que potencialmente va a ser afectado (Ayala Carcedo, 2000). Es así como en el mundo, en los planes de ordenación del territorio cada vez más se están involucrando con mayor importancia los estragos que causan las inundaciones en las economías de los países (ONU, 2004).

En las ciudades, las inundaciones causadas por fuertes e intempestivas lluvias y su posterior encharcamiento, tienen una gran importancia debido a los

¹ Coordinador Local de la Agencia Nacional para la Superación de la Pobreza Extrema – ANSPE Tierralta: cibeles10@yahoo.es

² Profesor Titular, Departamento de Física y Electrónica, Universidad de Córdoba: lgonima@correo.unicordoba.edu.co

efectos que causan sobre la población. Por ejemplo, Schmitt *et al.* (2004), en el marco del proyecto de investigación europeo EUREKA-RisUrSim, estudiaron las inundaciones urbanas causadas por la sobrecarga de los sistemas de drenaje de aguas lluvia urbanos, desarrollando herramientas para la planeación y el manejo eficiente de dichos sistemas. En Díez *et al.* (2006) se desarrolla y presenta cartografía de inundaciones causadas por lluvia «in situ», entre otras, con el fin de contribuir a la gestión del riesgo por inundaciones en España. Por su parte, Arranz Lozano (2008) analiza a escala local, la vulnerabilidad que causan las inundaciones por encharcamiento en cuatro áreas urbanas de España, originada por diferentes eventos de fuertes lluvias, mientras que Olcina Cantos (2009) aborda el tema de cómo los eventos climáticos en zonas pobladas, encharcamientos por lluvias intensas y sus riesgos asociados por ejemplo, pueden ser magnificados como consecuencia del cambio climático, concluyendo en la importancia que tiene la inclusión de medidas de prevención y control de riesgos climáticos en el ordenamiento y la planificación del territorio. Posteriormente, Jacobson (2011) hace una revisión crítica de diferentes modelos desarrollados para la cuantificación de los impactos que produce la impermeabilización urbana sobre la escorrentía y el drenaje de aguas lluvia, y Kazmierczak y Cavan (2011) estudian, entre otras, la distribución espacial de las inundaciones por encharcamiento de aguas lluvia y la respectiva vulnerabilidad de la población de la ciudad de Manchester. Recientemente, Qin *et al.* (2013) analizan el efecto de tres técnicas del denominado *low impact development* (LID), como una solución más sostenible para el control y manejo de inundaciones urbanas por encharcamiento de aguas lluvia, que el diseño convencional de sistemas urbanos de drenaje de éstas.

En Latinoamérica, este problema también ha sido motivo de preocupación y de estudio por parte de organismos gubernamentales y la comunidad científica. Domínguez Mora (2000) analiza el problema de esta clase de inundaciones en el Valle de México, encontrando que éste se remonta hasta la época de los aztecas, sin tomarse ninguna medida preventiva, sino que se interviene después de su ocurrencia. Tucci (2002) hace un análisis pormenorizado de la gestión de las inundaciones en el subcontinente, inclusive las urbanas causadas por las fuertes precipitaciones, mientras que Clichevsky (2006) estudia el papel del estado como regulador del mercado de áreas urbanas con vulnerabilidad natural a esta clase de inundaciones. Por otra parte, Stevaux *et al.* (2009) analizaron como la mala planificación y el caótico crecimiento urbano de Sao Paulo (Brasil), contribuyen definitivamente a la magnificación de las catástrofes producidas por las inundaciones, incluidas las producidas por encharcamiento. Recientemente, Hardoy y Romero Lankao (2011) presentan una

discusión sobre las implicaciones del cambio climático global y las inundaciones en general en las grandes ciudades latinoamericanas, incluidas también las producidas por el encharcamiento de aguas lluvia.

Colombia no se escapa a esta situación, ya que el desigual, desordenado y poco planificado desarrollo de sus ciudades y demás asentamientos humanos, es la causa principal de que esta clase de inundaciones sean periódicas y produzcan pérdidas económicas. Aunque se han desarrollado estudios sobre el fenómeno de las inundaciones urbanas (encharcamiento), tanto a nivel gubernamental como académico, (SSPD, 2009; SDA, 2011; Hernández Rodríguez y Cubillos Peña, 2012; Gobernación, 2013), la magnitud de este problema exige una mayor y mejor atención y conocimiento con el fin de mitigar en lo posible sus efectos negativos.

OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo es el de desarrollar una metodología para el análisis del papel que desempeñan las precipitaciones como factor importante en la ocurrencia de inundaciones causadas por encharcamiento de agua de lluvia en el área urbana de Montería, ciudad que carece por completo de un sistema de alcantarillado pluvial. Por consiguiente, el análisis se centró sólo en la ocurrencia de las inundaciones debidas a la magnitud de la lluvia caída sobre áreas relativamente planas y horizontales, caracterizadas por su capacidad de infiltración de agua de lluvia. Uno de los aportes de este trabajo, desde el punto de vista geográfico, es el de contribuir a la descripción espacial y social, y al posible pronóstico del fenómeno de las inundaciones en zonas urbanas planas horizontales, como consecuencia de las lluvias caídas sobre éstas.

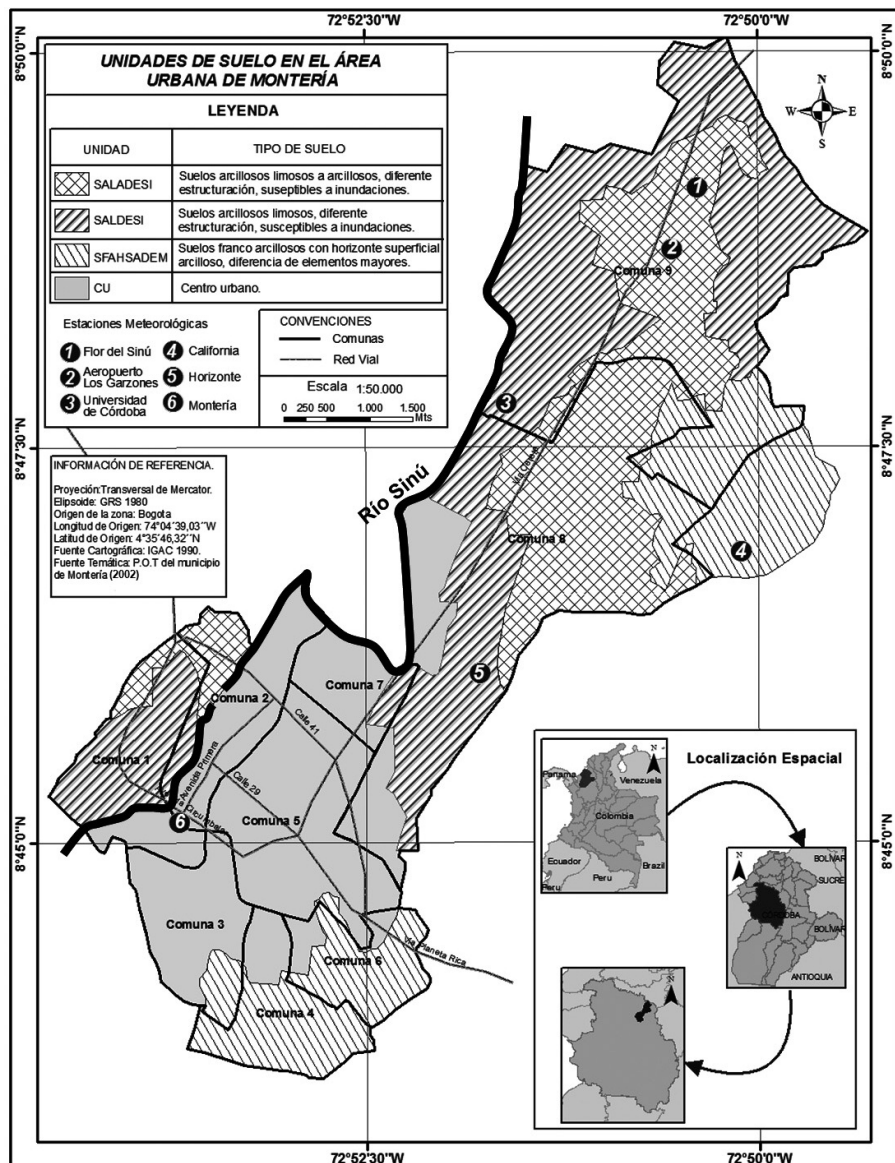
DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO

De acuerdo al POT (2009) y la figura 1, la zona de estudio seleccionada corresponde al área urbana de la ciudad de Montería, situada al noroeste de Colombia (región Caribe) con coordenadas 8°45' N y 75°53' W y una altitud media de 18 metros sobre el nivel del mar. Se extiende en la parte media del valle del río Sinú, en un sector dominado por la llanura de desborde del río, con suelos de textura franca a franco limosas y franco arcillosas distribuidas en diferentes proporciones, de alto grado de compactación y altos niveles freáticos (< 0,6 m), los cuales favorecen la ocurrencia de inundaciones por en-

charcamiento de aguas lluvia. La zona es relativamente plana, con pendientes del terreno catalogadas como leves (1% al 3%) y de diferentes direcciones, que en la práctica no son suficientes para evacuar completamente el agua de lluvia, que queda como excedente luego de infiltrarse sobre el suelo natural o sobre suelos impermeabilizados. El área urbana, de aproximadamente 40,9 km² de extensión y con una red vial de 718 km de longitud (32,3% asfaltados), está dividida en 9 comunas (207 barrios). Al año 2002 (POT, 2009), la superficie urbanizada (construcciones y vías trazadas sin asfalto o asfaltadas), que en promedio es de aproximadamente el 65% para toda la ciudad, representaba el 49% para la comuna 1, 61% para la comuna 2, 85% para la comuna 3, 82% para la comuna 4, 93% para la comuna 5, 75% para la comuna 6, 77% para la comuna 7, 40% para la comuna 8 y 29% para la comuna 9. Esta disparidad en el grado de urbanización de la ciudad hace que al mismo tiempo existan una gran cantidad de terrenos cubiertos de pastos de densidad variable y con afloramientos de suelo descubierto, además de las vías sin pavimentar. Esta situación se presenta especialmente en las comunas 1, 2, 4, 6 y 7, que además fueron establecidas (excepto la comuna 2) sobre humedales parcialmente desecados para tal fin. Las comunas 3 y 5, aunque muestran el mayor grado de urbanización, también tienen vías sin pavimentar que constituyen aproximadamente entre el 25% y 12% del área de ellas, respectivamente. Las restantes comunas 8 y 9 presentan la mejor urbanización de la ciudad, con alrededor del 85% de vías asfaltadas y terrenos sin edificar con alto grado de humedad del suelo y vegetación de variable densidad (pastos, matorrales y algunos cultivos), siendo el afloramiento de suelos descubiertos relativo a las vías sin pavimentar. Otra de las características de la ciudad es que ésta adolece totalmente de alcantarillado para aguas lluvia y el sistema de canales naturales y artificiales existente para la conducción de éstas es insuficiente e inadecuado para el control y manejo de las inundaciones por encharcamiento.

Socioeconómicamente en el 2002 (POT, 2009), la ciudad estaba clasificada en seis estratos de acuerdo a la infraestructura física existente en cada comuna y al poder adquisitivo de la población respectiva. Los estratos más bajos corresponden a las comunas 1, 3, 4, 6 y parte de 2 y 7, estratos medios 5 y parte de 2, 3 y 7, mientras que las comunas 8 y 9 se clasifican como estratos altos. La ciudad tiene una población de 286.575 habitantes con una densidad de población en hab/km² de 8.600 para la comuna 1, 5.000 para la comuna 2, 14.700 para la comuna 3, 13.600 para la comuna 4, 7.700 para la comuna 5, 12.600 para la comuna 6, 5.000 para la comuna 7, 2.200 para la comuna 8 y 3.800 para la comuna 9. Oficialmente (CVS, 2004), en la ciudad el NBI es de 49,7%, mientras que la miseria representa un 26,4% de la población existente.

FIGURA 1
UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo al análisis de la información climática suministrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), correspondiente al período de tiempo entre 1980 y 2000, el clima de la zona está caracterizado por una temperatura del aire y humedad relativa medias anuales de 27,8 °C y 85% respectivamente. Al estar ésta bajo la influencia de la zona de convergencia intertropical (ZCIT), el régimen de precipitaciones es alto: 1.300 mm anuales. La temporada lluviosa se extiende desde abril a octubre, con precipitaciones medias que varían entre 100 mm y 205 mm de acuerdo al mes. Otra peculiaridad del clima es que en un día cualquiera del año, independientemente de la época (seca o lluviosa), se pueden medir precipitaciones mayores que 30 mm y hasta 150 mm (tabla 3), con una duración media de entre 40 minutos y una hora en prácticamente la totalidad de los casos, como consecuencia de los fuertes aguaceros que se presentan intempestivamente con bastante frecuencia durante el año.

MATERIALES Y METODOS

Teóricamente, las inundaciones causadas por encharcamiento de aguas lluvia dependen de variables como la precipitación, el tipo de suelo, la capacidad de almacenamiento de agua del suelo, la cobertura vegetal, la pendiente del terreno y los drenajes (Parker, 2000). Entonces y de acuerdo a lo mencionado en la descripción del área urbana de la ciudad de Montería, al estar ésta caracterizada por una urbanización (construcciones y vías asfaltadas) que varía entre el 29% y 93% según comuna, por la insuficiente o nula existencia de drenajes de aguas lluvia y puesto que la pendiente del terreno en la mayoría de las comunas tiene en la práctica poca influencia en la adecuada y suficiente evacuación de las aguas lluvia excedentes, es la capacidad de almacenamiento de aguas lluvia por parte de los suelos existentes (descubiertos y con cobertura vegetal de densidad variable), la variable más importante para el análisis de la ocurrencia de inundaciones por encharcamiento que se presentan en la ciudad.

Por consiguiente, para establecer la relación entre la lluvia y la capacidad que tienen dichos suelos para retener agua de lluvia, se seleccionaron datos diarios de las precipitaciones contenidos en los registros meteorológicos del IDEAM, para un período de tiempo de 21 años (1980-2000) y correspondientes a las estaciones meteorológicas Flor del Sinú, Aeropuerto Los Garzones, Universidad de Córdoba, California, Horizonte y Montería (figura 1). Por otra parte, la capacidad de almacenamiento de agua de lluvia por los suelos se cuantificó por medio de mediciones de la infiltración de agua a través de la superficie del suelo en forma vertical y descendente, utilizando anillos infiltró-

metros que miden la lámina de agua (mm) que se infiltra en el suelo en función del tiempo t en minutos (Chica y Padilla, 2006). Las medidas de esta lámina se realizaron durante los meses de octubre y noviembre de 2005 en cada una de las estaciones meteorológicas seleccionadas, considerando el suelo correspondiente a cada una de ellas, como representativo de los suelos que constituyen la zona de estudio y que están representados en forma general en las unidades de la figura 1. Así mismo estas mediciones se hicieron asumiendo que la composición y estructura de los suelos estudiados tampoco variaron durante el período de tiempo definido en este estudio (1980-2000). Por lo tanto, aplicando el método de Kostiakov (Materón Muñoz, 1985) a estas mediciones, se obtuvo la lámina acumulada L (mm) que se infiltra en el suelo a medida que transcurre el tiempo en horas, para luego determinar L^* , valor representativo de la saturación de agua por parte del suelo. La figura 2 muestra el comportamiento típico de una curva de infiltración L .

Una vez obtenido L^* se determinó el exceso de agua que permanece sobre la superficie del suelo E , definida exclusivamente como la relación entre la lluvia pp y el valor de saturación de agua por parte del suelo L^* , por medio de la ec. (1). Este exceso E será el causante de la inundación por encharcamiento de agua de lluvia.

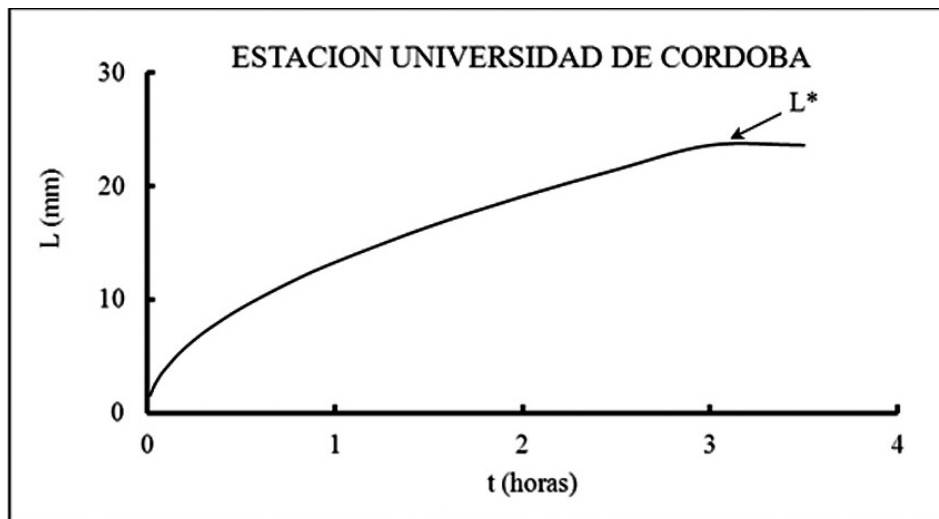
$$E = pp - L^* \quad (1)$$

A continuación se procedió a contrastar los resultados calculados para E con información externa sobre inundaciones proveniente del periódico regional *El Meridiano* de Córdoba, existente a partir del año de fundación de éste (1995), para cada una de las estaciones meteorológicas de la figura 1. Posteriormente, se realizó un análisis de regresión entre pp y E , para cada estación (figura 1), con el fin de estimar la magnitud de las inundaciones por encharcamiento de agua de lluvia en el área urbana de la ciudad de Montería. La validez estadística de los resultados obtenidos fue evaluada por medio del valor crítico o umbral de significancia del coeficiente de correlación, r_c (figura 3).

Finalmente y como insumo temático para el análisis socioeconómico del fenómeno estudiado se elaboraron, por medio de un SIG (ArcGIS), mapas de susceptibilidad y vulnerabilidad a inundaciones por encharcamiento de aguas lluvias de la zona de estudio seleccionada. Además de los valores de L^* previamente calculados y con base en la información cartográfica existente en el POT (2009), para el primero se utilizaron mapas digitales de unidades de suelo, usos del suelo y estratificación socioeconómica de la población, mientras que para el segundo: usos del suelo, distribución en comunas de la población y el de la respectiva densidad de población.

FIGURA 2

EJEMPLO DE LA VARIACIÓN TEMPORAL DE LA LÁMINA DE AGUA INFILTRADA L PARA LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA (NOVIEMBRE 2005). UNIDAD DE SUELO SALDESI DE LA FIGURA 1, CALCULADA SEGÚN EL MÉTODO DE KOSTIAKOV (MATERÓN MUÑOZ, 1985). L^* REPRESENTA EL VALOR DE LA LÁMINA DE AGUA CUANDO EL SUELO SE SATURA



Fuente: elaboración propia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Puesto que en la zona de estudio seleccionada, las inundaciones por encharcamiento son consecuencia directa del exceso de agua de lluvia que permanece sobre la superficie del suelo, al no poderse infiltrar más agua en él (saturación), el análisis de este fenómeno se basó en la cuantificación de L^* , para cada una de las estaciones meteorológicas seleccionadas, representativas de las diferentes clases de suelo existentes.

En la tabla 1, excepto para la estación meteorológica Montería, representativa de los suelos de gran parte de las comunas 3 y 5 - unidad CU (figura 1), en la cual éstos presentan una alta impermeabilización (asfalto y edificaciones), en las demás estaciones la capacidad de infiltración de aguas lluvia por

TABLA 1
VALORES DE L* PARA CADA UNA DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS
SELECCIONADAS

Estación	L* (mm)
Flor del Sinú	33,4
Aeropuerto Los Garzones	38,8
Universidad de Córdoba	23,6
California	54,0
Horizonte	42,1
Montería	0,0

Fuente: elaboración propia.

parte de los suelos varía principalmente de acuerdo a la composición de éstos. Por ejemplo, para la unidad de suelo denominada SALDESI (figura 1), en la que se encuentran ubicadas dos estaciones meteorológicas (Universidad de Córdoba y Horizonte), los valores calculados de la infiltración L* de cada una de ellas fueron diferentes. Esto se debe a que dentro de esa misma unidad de suelo, existen subclases con características diferentes, como se observa en el análisis textural de los suelos realizado para ambas estaciones (tabla 2).

Como se mencionó anteriormente, al estar gran parte del suelo del casco urbano de Montería recubierto con asfalto y edificaciones (figura 1), la infil-

TABLA 2
ANÁLISIS TEXTURAL DE LOS SUELOS REALIZADO EN NOVIEMBRE 2005
Y CORRESPONDIENTE A LA UNIDAD DE SUELO SALDESI (FIGURA 1),
DEFINIDA POR LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS UNIVERSIDAD
DE CÓRDOBA Y HORIZONTE

Estación	% arena	% arcilla	% limo	Textura
Universidad de Córdoba	26,3	23,7	50,0	Franco limoso
Horizonte	33,4	25,2	41,1	Franco

Fuente: elaboración propia.

tracción de agua de lluvia por parte de esta clase de cobertura es prácticamente nula. Por consiguiente, en esta zona de la ciudad (representada por la estación Montería) las inundaciones se deben exclusivamente a una mala planificación y equipamiento urbano deficientes, al no existir alcantarillado que evacue las aguas lluvia. Respecto a las otras estaciones, que tampoco disponen de alcantarillado pluvial y/o un sistema de drenaje y conducción de aguas lluvia suficiente y adecuado, las inundaciones ocurren cuando la cantidad de lluvia precipitada supera la capacidad de infiltración de los suelos descubiertos o con cobertura vegetal variable.

Una vez calculados los excesos de agua de lluvia E para cada estación meteorológica y para todo el período de tiempo seleccionado de 21 años (tabla 3), y a manera de validación, se comparó la ocurrencia de dichos excesos con los reportes de los eventos de inundación por encharcamiento de aguas lluvia publicados por el periódico el Meridiano de Córdoba, desde 1995 (año de su fundación) hasta 2000. Los resultados obtenidos confirman que siempre que se determinó un exceso de agua de lluvia en la zona de estudio seleccionada, se presentó un evento de inundación.

TABLA 3

PRECIPITACIÓN (PP) Y EXCESOS DE AGUA DE LLUVIA CALCULADOS (E) ENTRE 1980 Y 2000, CORRESPONDIENTES A EVENTOS DE INUNDACIÓN OCURRIDOS EN LAS ESTACIONES SELECCIONADAS (D: RANGO DE VARIACIÓN)

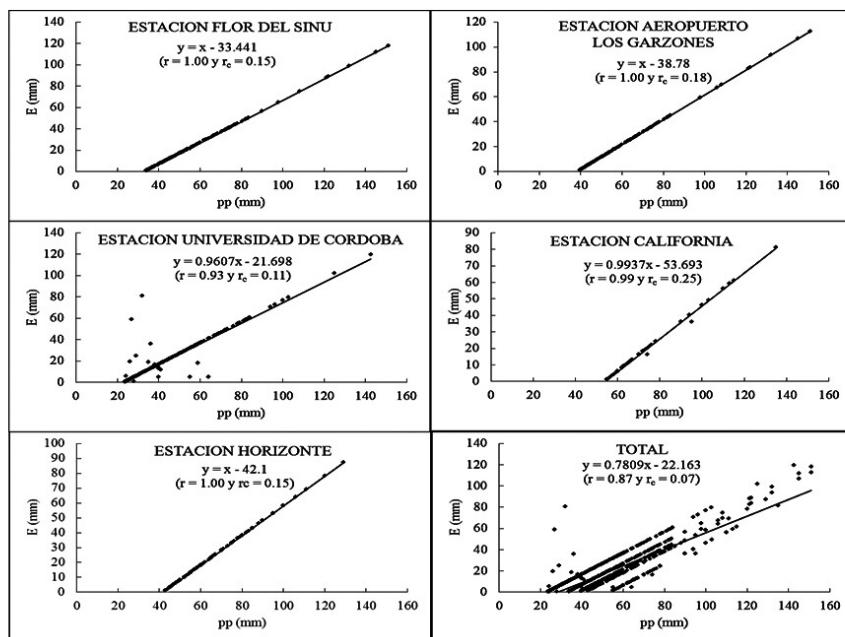
Estación	No. de eventos	Dpp (mm)	DE (mm)
Flor del Sinú	172	34-151	0,6-117,6
Aeropuerto Los Garzones	137	40-151	0,8-112,2
Universidad de Córdoba	316	24-143	0,4-119,4
California	59	55-135	1,0-81,0
Horizonte	166	43-120	0,9-77,9

Fuente: elaboración propia.

De igual forma, el análisis de regresión estadística realizado entre los valores calculados de E y los medidos de pp, confirma los resultados de la validación anterior sobre la relación existente entre las inundaciones por encharcamiento y la precipitación en la ciudad de Montería (figura 3).

FIGURA 3

RELACIÓN ESTADÍSTICA (1980 – 2000) ENTRE LA PRECIPITACIÓN PP
Y EL EXCESO DE AGUA DE LLUVIA E, PARA CADA ESTACIÓN
METEOROLÓGICA (R: COEFICIENTE DE CORRELACIÓN
Y R_c : COEFICIENTE DE CORRELACIÓN CRÍTICO)



Fuente: elaboración propia.

Analizando detenidamente la figura 3, se observa que cada una de las relaciones estadísticas calculadas es altamente significativa, ya que todos los r son mucho mayores que los r_c (umbral de significancia estadística). Es decir, la ecuación de regresión estadística obtenida para cada estación meteorológica, permite calcular la magnitud de la inundación para cada una de las diferentes clases de suelo existentes en la zona de estudio, al cuantificar los excesos de agua de lluvia precipitada que no se puede infiltrar a través éstos. Además, con la ecuación de regresión calculada para el conjunto de todas las estaciones (total en la figura 3), también es posible estimar (con menor precisión que las anteriores) la cantidad de agua de lluvia excedente sobre la diversidad de suelos existentes en el área urbana de la ciudad de Montería.

La comunas de la ciudad de Montería, al no disponer de un sistema de alcantarillado pluvial y puesto que la red existente de canales de conducción de aguas lluvia es insuficiente e inadecuada, la ocurrencia de inundaciones por encharcamiento depende fundamentalmente de la intensidad y magnitud del agua precipitada, que al no poderse infiltrar completamente en los suelos o escurrirse a lo largo de ellos por las leves pendientes del terreno, permanece cubriéndolos durante varias horas en zonas impermeabilizadas y de varias horas a 2 a 4 días en zonas con suelos descubiertos y/o cubiertas de vegetación. En estas condiciones, al estar esta zona sometida a un régimen climático de fuertes, intempestivas y frecuentes precipitaciones, la ocurrencia de esta clase de inundaciones es también habitual. La figura 4 muestra la susceptibilidad de los suelos del área urbana de la ciudad a esta clase de inundaciones, calculada de acuerdo al procedimiento expuesto en la metodología.

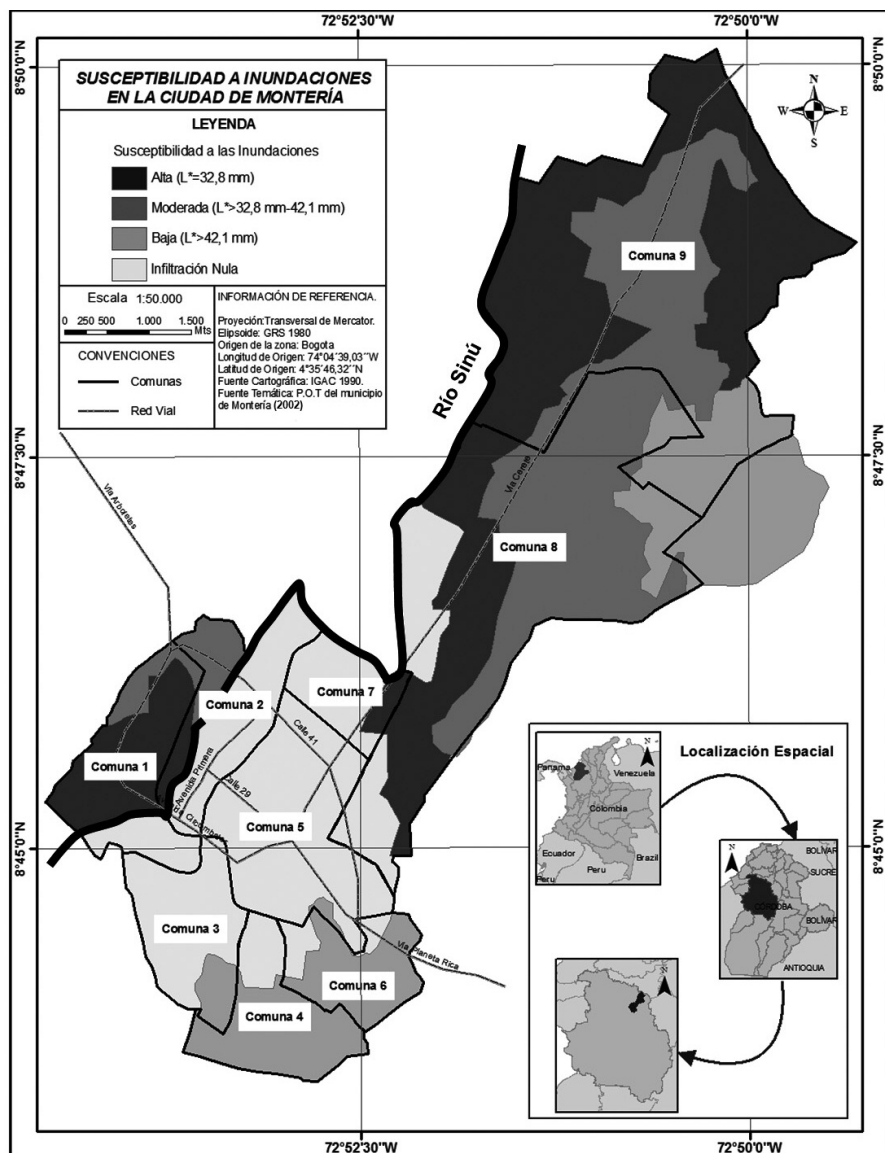
En concordancia con la figura 4 la ciudad se clasifica de la siguiente forma:

- a) Con una susceptibilidad alta a inundarse se encuentran parte de las comunas 1, 2, 7, 8 y 9, correspondientes a la clase de suelos de la unidad SALDESI (figura 1), cuya capacidad de infiltración de agua de lluvia es baja. A esto se le agrega que las comunas 1 y 2, situadas en la margen izquierda del río Sinú, contienen en parte de su territorio varios cuerpos de agua (ciénagas), algunos de los cuales fueron desecados parcialmente con el fin de urbanizar los terrenos emergentes. Por otra parte, al ser la pendiente del terreno de estas dos comunas prácticamente nula (1%) y la red de canales construidos para la evacuación de las aguas lluvias insuficiente, el riesgo de inundación es alto, lo cual también explica la parte de la comunas 7, 8 y 9 con esta clase de susceptibilidad.
- b) Una susceptibilidad moderada a inundarse la muestran parte de las comunas 1, 2, 8 y 9, establecidas sobre suelos con capacidad media de infiltración de agua, unidad SALADESI (figura 1), debido principalmente a la deficiente red de canales de drenaje de aguas lluvia existente y a la pendiente prácticamente nula del terreno.
- c) Aunque parte de las comunas 3, 4, 6, 8 y 9 tienen una susceptibilidad baja, debido a una mayor capacidad de infiltración de agua de los suelos correspondientes a la unidad SFAHSADEM, la red de drenajes existentes y la poca pendiente del terreno, máximo del 3% en algunos puntos y nula en otros, no son suficientes para impedir el encharcamiento de aguas lluvia en dichas comunas.

Respecto a las comunas o parte de ellas con una infiltración nula y que corresponden al casco urbano (figura 4), el encharcamiento de aguas lluvia es la

FIGURA 4

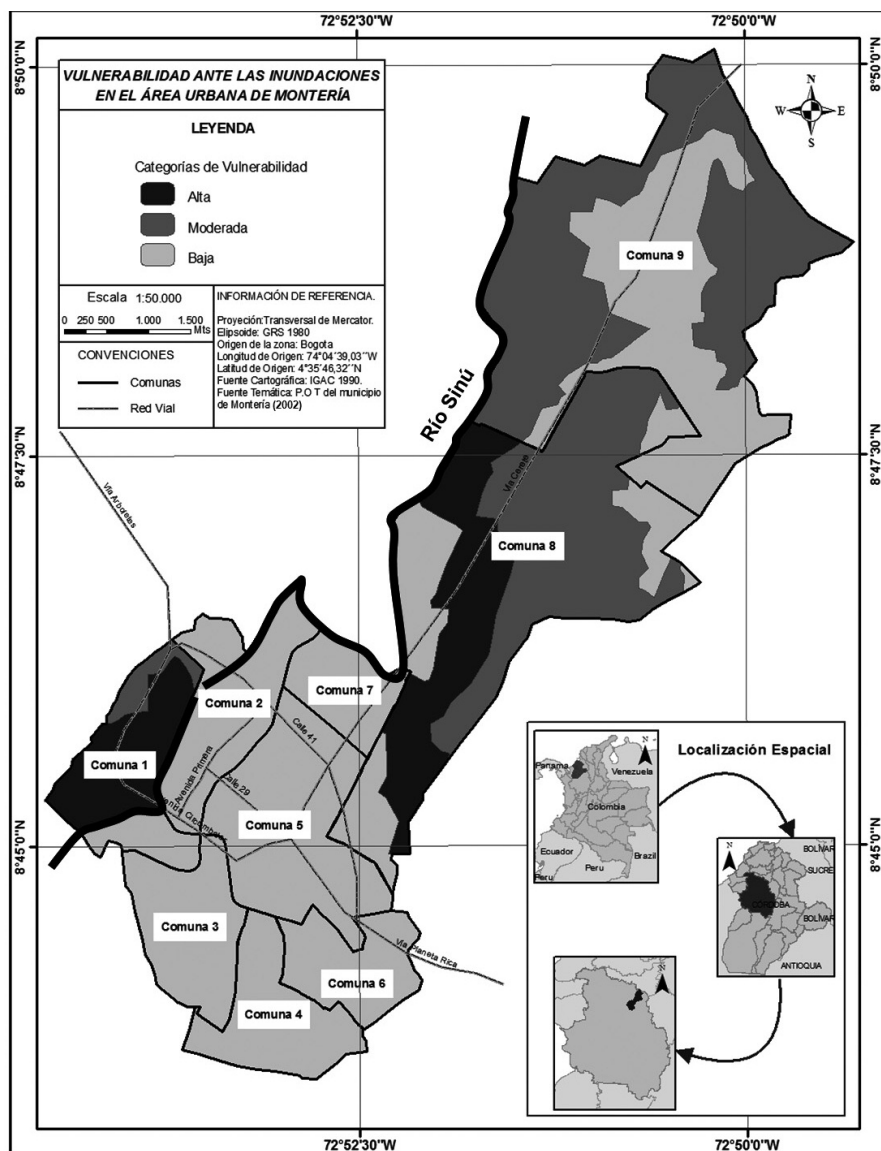
MAPA DE LA SUSCEPTIBILIDAD A INUNDACIONES POR ENCHARCAMIENTO DE AGUAS LLUVIA EN LA CIUDAD DE MONTERÍA



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 5

MAPA DE LA VULNERABILIDAD A INUNDACIONES POR ENCHARCAMIENTO DE AGUAS LLUVIA EN LA CIUDAD DE MONTERÍA



Fuente: elaboración propia.

consecuencia de la impermeabilización total del suelo con asfalto (calles) y construcciones de viviendas y edificios, sin ninguna infraestructura apta para la evacuación de dichas aguas. De esta manera, cada vez que se presentan fuertes aguaceros, estos indefectiblemente generan inundaciones en esta parte de la ciudad.

Desde el punto de vista socioeconómico, las inundaciones por encharcamiento de aguas lluvia también afectan la calidad de vida de la población. Independientemente de las condiciones socioeconómicas de las comunas, la falta de un sistema de alcantarillado de aguas lluvia y la insuficiente red de canales de drenaje de éstas, es el principal factor que incide en la vulnerabilidad a esta clase de eventos de la ciudad de Montería. La figura 5 muestra la vulnerabilidad de cada comuna a esta clase de inundaciones. En la ciudad, las inundaciones tienen impacto en diferentes grupos sociales y económicos de una manera diferenciada. En concordancia con la figura 5, la vulnerabilidad alta de gran parte de la comuna 1 se debe a que al pertenecer esta comuna a uno de los niveles socioeconómicos de la población (estratos) más bajos, no posee una infraestructura que le permita responder rápida y adecuadamente a las inundaciones de este tipo (vías sin pavimentar, zona urbanizable con bajo nivel de impermeabilización e insuficiente red de canales de drenaje), que pueden durar varias horas hasta días dependiendo de la intensidad y magnitud de las precipitaciones, conformándose lodazales y charcos de agua que mientras se secan y evaporan, causan la pérdida de horas laborales y de estudio debido a las dificultades que se le presentan a la población para movilizarse a los puestos de trabajo e instituciones de enseñanza, además de la aparición de enfermedades respiratorias como la bronquitis y el dengue, la destrucción parcial de vías y viviendas por filtraciones de agua en ellas, limitaciones en la movilidad automotor y el deterioro de la vegetación existente. Aunque la comuna 8, junto con la 9, pertenece a los estratos de más alto poder económico de la ciudad y tiene una mayor y mejor infraestructura (vías pavimentadas y zona urbanizable impermeabilizada), parte de ella presenta la misma vulnerabilidad que la anterior. Esto es consecuencia de que la vía pavimentada a Cereté (sur a norte), en ese tramo, fue construida varios metros por encima de los terrenos circundantes, de tal manera que permitiera el desagüe de las aguas lluvia hacia zonas más bajas (figura 5), que al no tener drenajes suficientes se encharcan. La única diferencia con respecto a la comuna 1 es que las aguas estancadas permanecen un menor tiempo (horas) al evaporarse más rápidamente por la impermeabilización de la zona o mientras son evacuadas por medio de motobombas. Por consiguiente, en esta comuna las inundaciones por aguas lluvias no representan grandes inconvenientes,

excepto la restricción al tráfico automotor mientras se evacúan las aguas excedentes.

La vulnerabilidad moderada de parte de las comunas 1 se debe a la poca población existente en dicha zona, aunque las afectaciones de las inundaciones son las mismas que las descritas anteriormente. Para parte de las comunas 8 y 9, esta vulnerabilidad está representada por la aparición de enfermedades de las vías respiratorias (bronquitis y dengue), limitación de la movilidad y el difícil acceso a centros de enseñanza (colegios y universidades) durante varias horas.

Las causas de la vulnerabilidad baja, comunas 2, 4 y 6 (estratos socioeconómicos bajos), 3, 5 y 7 (estratos socioeconómicos medios) y parte de las comunas 8 y 9, se pueden asociar principalmente a dos aspectos que intervienen simultáneamente: la impermeabilización de las comunas 2, 5, 7, gran parte de la 3 y parte de la 6 impide que el encharcamiento permanezca largos períodos de tiempo sobre los terrenos respectivos, durando generalmente desde unas cuantas horas hasta un par de días, mientras se evaporan las aguas lluvia excedentes. En estas comunas las afectaciones sobre la población (proliferación de las enfermedades respiratorias antes mencionadas, limitaciones a la movilidad peatonal y automotor y la destrucción parcial de la malla vial pavimentada y viviendas) tienen una relativa menor intensidad y magnitud. El otro aspecto se puede identificar en parte de las comunas 8 y 9, en las cuales la baja vulnerabilidad se debe a la poca población residente en éstas, ya que ésta se encuentra distribuida en terrenos dedicados principalmente a la agricultura, con poca aglomeración de viviendas.

A pesar de las recomendaciones del POT (2009) y de las continuas y repetidas pérdidas socioeconómicas producidas por esta clase de inundaciones, todavía no existen programas de infraestructura urbana que contribuyan a la solución de este problema, como la construcción de un sistema de alcantarillado de aguas lluvia para todas las comunas. En Colombia y en la región Caribe en particular, el alcantarillo pluvial no es considerado comúnmente como un servicio básico esencial, como lo son el suministro de electricidad y de agua, de tal manera que su cobertura no está generalizada y todavía es bastante deficiente (SSPD, 2009).

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se desarrolló una metodología para el análisis de las inundaciones por encharcamiento de aguas lluvia, basada en la relación estadística entre la capacidad de infiltración de agua por el suelo y la cantidad de

lluvia precipitada sobre él, que permite estimar los excesos de agua que generen esta clase de inundaciones en el área urbana de la ciudad de Montería, al ser insuficiente la red de canales de drenajes existentes actualmente y al no existir alcantarillado pluvial en ella.

Los efectos de las inundaciones por encharcamiento de aguas lluvia varían dependiendo de la cantidad de la lámina de agua que se acumula en la superficie, es decir, del exceso de agua de lluvia sobre la superficie. La determinación de estos excesos sería muy útil para la planificación de las zonas aptas para urbanizar. Por ejemplo, si se planifica la construcción de un nuevo proyecto de vivienda para Montería, sería de gran utilidad disponer de la información suministrada por el cálculo de los excesos de agua de lluvia causantes de las eventuales inundaciones, con el fin de prever el diseño y construcción de la infraestructura indispensable que contribuya a mejorar la calidad de vida de la población.

La susceptibilidad y vulnerabilidad a esta clase de inundaciones están principalmente relacionadas con la falta de un adecuado y eficiente sistema de drenaje de agua de lluvia, así como también con la distribución socioeconómica de la población de la ciudad. El insuficiente y desigual desarrollo socioeconómico de la población de la ciudad, obliga a que gran parte de ésta, especialmente la de más bajos recursos económicos (estratos bajos), se ubique en terrenos no aptos para vivienda y subsistencia que son propensos periódicamente a dichos eventos. Las afectaciones van desde la proliferación de enfermedades como la bronquitis y el dengue hasta la destrucción parcial de vías y viviendas por filtraciones de agua en ellas, limitaciones en la movilidad automotor y el deterioro de la vegetación existente.

El tema de las inundaciones en la zona de estudio seleccionada se ha venido manejando a través del tiempo en forma paliativa y desordenadamente. Se espera a que ocurra el fenómeno para intervenir sobre la población afectada, sin resolverse el problema fundamental que es el de la urbanización adecuada de la ciudad. Es necesario que se incluya urgentemente en los planes de desarrollo de la ciudad, la construcción de un sistema adecuado y suficiente de alcantarillado pluvial.

Fecha de recepción: 21 de marzo de 2014.

Fecha de aceptación: 10 de octubre de 2014.

BIBLIOGRAFÍA

- Arranz Lozano, M. (2008): "El riesgo de inundaciones y la vulnerabilidad en áreas urbanas. Análisis de casos en España". *Estudios Geográficos*, LXIX/265, pp. 385-416.
- Ayala Carcedo, F. (2000): "La ordenación del territorio en la prevención de catástrofes naturales y tecnológicas. Bases para un procedimiento técnico-administrativo de evaluación de riesgos para la población". *Boletín de la A.E.G.*, 30, pp. 37-49.
- Chica, Y. y Padilla, M. (2006): "Análisis del comportamiento de la precipitación y su relación con las inundaciones en Montería". Tesis de pregrado, Departamento de Geografía y Medio Ambiente, Universidad de Córdoba.
- Clichevsky, N. (2006): "Estado, mercado de tierras urbanas e inundaciones en ciudades argentinas". *Cuadernos de Geografía*, 15, pp. 31-52.
- CVS (2004): *Diagnóstico ambiental de la cuenca hidrográfica del río Sinú*. Montería, Corporación Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge, Centro de Documentación.
- Díez, A.; Lain, L. y Llorente, M. (2006): *Mapas de peligrosidad de avenidas e inundaciones. Métodos, experiencias y aplicación*. Madrid, Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie Medio Ambiente, Riesgos Geológicos, 7.
- Domínguez Mora, R. (2000): "Las inundaciones en la ciudad de México. Problemática y alternativas de solución". *Revista Digital Universitaria*, 1/2. Disponible en <http://www.revista.unam.mx/vol.1/num2/proyec1/> (Verificada el 23/04/2015).
- Gobernación (2013): *Córdoba: Plan Departamental de Gestión del Riesgo*. Montería, Gobernación de Córdoba.
- Hardoy, J. y Romero Lankao, P. (2011): "Latin American cities and climate change: challenges and options to mitigation and adaptation responses". *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 3/3, pp. 158-163.
- Hernández Rodríguez, L. C. y Cubillos Peña, C. E. (2012): "Consideraciones de planteamiento de una metodología para evaluar el riesgo público por inundación considerando el sistema de drenaje urbano", en: *XX Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*, Barranquilla.
- Jacobson, C. R. (2011): "Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: a review". *Journal of Environmental Management*, 92, pp. 1438-1448.
- Kazmierczak, A. y Cavan, G. (2011): "Surface water flooding risk to urban communities: Analysis of vulnerability, hazard and exposure". *Landscape and Urban Planning*, 103, pp. 185-197.
- Materón Muñoz, H. (1985): *Hidrología Básica II*. Cali, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle.
- Olcina Cantos, J. (2009): "Cambio climático y riesgos climáticos en España". *Investigaciones Geográficas*, 49, pp. 197-200.
- ONU (2004): *Living with risk*. United Nations: International Strategy for Disaster Reduction, I.

- Parker, D. J. (2000): *Flood*. 2. London-New York, Routledge and Sons.
- POT (2009): *Proceso de revisión y ajuste al POT de Montería 2002-2015, Capítulo II, documento técnico*. Disponible en <http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/monteriacordobapot2002-2015.pdf> (Verificada el 23/04/2015).
- Qin, H., Li, Z. y Fu, G. (2013): "The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics". *Journal of Environmental Management*, 129, pp. 577-585.
- Schmitt, T. G.; Thomas, M. and Ettrich, N. (2004): "Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems". *Journal of Hydrology*, 299, pp. 300-311.
- SDA (2011): *Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible*. Bogotá, Secretaría Distrital de Ambiente.
- SSPD (2009): *Sistema de alcantarillado en Colombia. Visión del servicio público*. Bogotá, Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios
- Stevaux, J. C.; Latrubesse, E. M.; Hermann, M. L. de P. y Aquino, S. (2009): "Flood in urban areas of Brazil". *Developments in Earth Surface Processes*, 13, pp. 245-266.
- Tucci, C. E. M. (2002): *Improving flood management practices in South America: workshop for decision makers*. Geneva, World Meteorological Organization: Associate Program on Flood Management: South America.

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolla una metodología para el análisis de la relación existente entre las precipitaciones y las inundaciones causadas por encharcamiento de agua de lluvia en la zona urbana de Montería (Colombia). Se realizaron mediciones en campo de la capacidad de infiltración de agua para diferentes unidades de suelos de la zona de estudio, con el fin de estimar los excesos de agua de lluvia sobre el suelo. Los resultados obtenidos se presentan en forma de correlaciones estadísticas para el cálculo de los excesos de agua de lluvia y mapas de susceptibilidad y vulnerabilidad a las inundaciones, mediante los cuales se hace una breve discusión socioeconómica de los efectos de esta clase de inundaciones en la zona de estudio.

PALABRAS CLAVE: precipitación; unidades de suelo; infiltración; inundación; susceptibilidad; vulnerabilidad.

ABSTRACT

In this paper a methodology for the analysis of the relationship between rainfall and flooding caused by ponding of rainfall water in urban area of Montería (Colombia) is developed. Rainfall water excesses over the soil were estimated from field measurements of the soil infiltration capacity for different soil units of the studied zone. The results obtained are presented in form of statistical correlations for calculating water rainfall excesses over the soils and maps of susceptibility and vulnerability for floods.

The maps were used for a brief socioeconomic discussion of the effects of flood events in the selected zone.

KEY WORDS: rainfall; soil units; infiltration; flood; susceptibility; vulnerability.

RÉSUMÉ

Dans le présent travail est analysé la relation existant entre les précipitations et des inondations par accumulation d'eau pluie sur le sol dans la zone urbaine de Montería (Colombie). Avec la réalisation de mesures en champ de la capacité d'infiltration pour différents unités de sol de la zone d'étude, on a estimé les excès d'eau pluie sur le sol. Les résultats obtenus sont présentés sous la forme de corrélations statistiques pour le calcul des excès d'eau pluie et de cartes de susceptibilité et vulnérabilité aux inondations. Les cartes ont été employée pour une brève discussion socio-économique des effets des inondations dans la zone d'étude sélectionnée.

MOTS CLÉS: précipitation; sol unities; infiltration; inundation; susceptibilité; vulnérabilité.