



Terra Nueva Etapa
ISSN: 1012-7089
vidal.saezsaez@gmail.com
Universidad Central de Venezuela
Venezuela

Aproximación al mapa de susceptibilidad a inundación en la cuenca del río Boconó, Estado Trujillo, Venezuela

Liendro Moncada, J.V.; Ojeda, E. C.

Aproximación al mapa de susceptibilidad a inundación en la cuenca del río Boconó, Estado Trujillo, Venezuela

Terra Nueva Etapa, vol. XXXIV, núm. 55, 2018

Universidad Central de Venezuela, Venezuela

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72156172012>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.

Aproximación al mapa de susceptibilidad a inundación en la cuenca del río Boconó, Estado Trujillo, Venezuela

Approach To The Map Of Susceptibility To Flood In The Boconó River Basin, Trujillo State, Venezuela

J.V. Liendro Moncada

Grupo de Investigación en Ciencia, Tecnología e Ingeniería
(GICTI), Venezuela
liendroing@gmail.com

Redalyc: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72156172012>

E. C. Ojeda

Núcleo Universitario "Rafael Rangel" de la Universidad de
Los Andes (ULA), Venezuela
ojedaelka@gmail.com

Recepción: 01 Octubre 2017

Aprobación: 20 Enero 2018

RESUMEN:

El objetivo fue zonificar los niveles de susceptibilidad a inundación existentes en la cuenca de río Boconó, estado Trujillo, Venezuela; mediante la implementación de técnicas de evaluación multicriterio (EMC) en un entorno de sistema de información geográfica (SIG). En la creación del modelo espacial de susceptibilidad a inundación para el área de estudio fueron considerados los factores: acumulación de flujo, pendiente, altitud, distancia a drenajes y permeabilidad de los suelos; el resultado obtenido considerado como de Moderada y Alta susceptibilidad a inundaciones representan solo el 1,67% de toda el área, representa apenas 1805,63 ha de la superficie total, se encuentra localizada parte del área metropolitana de la ciudad de Boconó, la más importante de la cuenca y una de las mayores localidades del estado Trujillo.

PALABRAS CLAVE: desbordamiento, geomática, sistemas de información geográfica (SIG), evaluación multicriterio (EMC), andes venezolanos.

ABSTRACT:

The objective was to zoning the levels of susceptibility to flood in the Boconó river basin, Trujillo State, Venezuela; through the implementation of multi-criterion evaluation techniques (MCE) in a Geographic Information System (GIS) environment. In the creation of the spatial model of susceptibility to flood for the study area were considered the factors: accumulation of flow, slope, altitude, distance to drainage and soil permeability. The obtained result considered as Moderate and High susceptibility to flooding, represent only the 1,67% (1805,63 ha) of the total area, where is located part of the metropolitan area of the Bocono city, the most important of the basin and one of the largest localities of Trujillo State.

KEYWORDS: Flood, geomatics, geographic information systems (GIS), multicriteria evaluation (MCE), Venezuelan Andes.

NOTAS DE AUTOR

Juan Vicente Liendro Moncada. Ingeniero Agrícola, Mención Manejo y Conservación de Recursos Naturales (2008, Universidad de Los Andes, Venezuela). Diplomado en Técnicas Hidrológicas para la Gestión Integral del Agua (2017, Universidad de Los Andes, Venezuela). Profesor desde 2015, Categoría Instructor a Dedicación Exclusiva, adscrito al Área de Topografía, Departamento de Ingeniería del Núcleo Universitario "Rafael Rangel" de la Universidad de Los Andes (ULA). Jefe del Laboratorio de Topografía, Coordinador del Área de Topografía. Miembro del Grupo de Investigación en Ciencia, Tecnología e Ingeniería (GICTI). Áreas de Investigación: Geomática, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección. Correo electrónico: liendroing@gmail.com

Elka Carolina Ojeda. Ingeniero en Mantenimiento Mecánico (2001, Universidad Fermín Toro, Venezuela). Licenciada en Educación, Mención Educación para el Trabajo y Desarrollo Endógeno (2016, Universidad de Los Andes, Venezuela). Magister Scientiarum en Mantenimiento Industrial (2004, Universidad Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre", Venezuela). Cursa estudios de Maestría en Sistemas de Producción Agrícola Familiar, línea de actuación: evaluación, optimización y desarrollo de tecnologías en mecanización agrícola, concepto CAPES 5 (2016, Universidad Federal de Pelotas, Brasil). Profesora en 2015 - 2016, Categoría Instructor, adscrita al Área de Energía y Mecanización Agrícola, Departamento de Ingeniería del Núcleo Universitario "Rafael Rangel" de la Universidad de Los Andes (ULA). Jefe del Laboratorio de Energía y Mecanización Agrícola. Áreas de Investigación: proyectos de desarrollo y evaluación de máquinas y equipos agrícolas.

INTRODUCCIÓN

Los fenómenos de inundación se caracterizan por la invasión o cubrimiento de agua en zonas que en circunstancias normales permanecen secas. A nivel global, los procesos de desbordamiento perjudican más seres humanos que cualquier otro evento de la naturaleza. Las pérdidas mundiales esperadas al año debido al riesgo de inundaciones se aproximan a los 104 mil millones de dólares estadounidenses, semejante a una tercera parte de la inversión al año en instrucción pública de la región Latinoamericana y Caribeña. En relación con el capital acumulado, Camboya, República Democrática Popular Lao y Myanmar afrontan los daños relativos más elevados previstos anualmente, mientras que India, China y los Estados Unidos son las naciones que exhiben las pérdidas absolutas más altas esperadas al año por inundaciones fluviales (UNISDR, 2015).

Venezuela no es impasible a la situación global descrita, los procesos de inundación constituyen los fenómenos más habituales en el país, donde 60 % de las catástrofes de mayor cuantía registradas se refieren a eventos de avenida. Destacan, en este contexto, las mayores inundaciones reportadas hasta ahora, acaecidas en los estados Vargas, Miranda y Distrito Capital en diciembre de 1999, con daños estimados en más de 157 mil millones de bolívares (BID, 2015; Campos y Bravo, 2011). La región de Los Andes, después de la zona central del país, lidera los desastres más costosos reportados por inundaciones; muestra de ello es el evento suscitado en febrero de 2005 en la localidad de Santa Cruz de Mora, ubicada en el valle del río Mocotíes en el estado Mérida, afectando una población total superior a 25 mil habitantes, con 76 fallecidos y daños próximos a 2,5 mil millones de bolívares (BID, 2015).

Del mismo modo, la cuenca hidrográfica del río Boconó, emplazada en la región de Los Andes Venezolanos y segunda en extensión superficial del estado Trujillo, se ha visto notablemente afectada por catastróficos eventos de inundación fluvial en los años 1951, 1981 y 1990, causando pérdidas de vidas humanas y cuantiosos daños materiales en el área urbana y periurbana de la ciudad de Boconó (Velásquez y Pérez, 1990).

En la actualidad, las considerables ventajas que las técnicas geomáticas brindan en la zonificación de fenómenos medioambientales han popularizado su aplicación en múltiples estudios para la determinación de áreas propensas a procesos de desbordamiento. En este escenario, distintas herramientas geotecnológicas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la Teledetección, se han implementado recurrentemente en el desarrollo de investigaciones relacionadas con casos de inundación en Venezuela (Carrera et al., 2013; Perozo y Marrero, 2011; Rivas y Carrera, 2016; Sánchez y Martínez, 2014).

Producto de lo descrito emerge la incógnita a la cual el presente estudio trata de aportar respuesta: ¿Cómo es la distribución espacial de los diferentes niveles de susceptibilidad a inundación existentes en la cuenca de río Boconó? En tal sentido, el propósito de la investigación fue zonificar los niveles de susceptibilidad a inundación existentes en la cuenca de río Boconó, estado Trujillo, Venezuela; mediante la implementación de técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC) en un entorno de SIG.

METODOLOGÍA EMPLEADA

El desarrollo metodológico de la investigación se circunscribe a la implementación de las técnicas de EMC en un entorno de SIG, utilizando parcialmente datos e información de la superficie terrestre teledetectada. La EMC se fundamenta en la valoración de una serie de opciones que territorialmente se hallan representadas por entidades espaciales; la valoración de un espacio determinado se realiza conforme a múltiples de sus particularidades, mediante variados juicios y preferencias en pugna (Gómez y Barredo, 2005) y el SIG puede definirse, de acuerdo a su capacidad de sistematización, como un instrumento computacional constituido por cinco segmentos principales: los datos, la tecnología, los procesos, la visualización y el factor organizativo; en el cual cada uno de estos elementos desempeña una labor específica dentro del conjunto, cuya finalidad central es la de gestionar información georreferenciada (Olaya, 2012).

En lo que corresponde a la plataforma de SIG específica aprovechada, se hizo uso de las capacidades de QGIS 2.18.2 (OSGeo, 2016), software libre y de código abierto, en la gestión integral de los datos e información, de los procesos y los productos derivados; empleando para el análisis el modelo de datos espaciales *Raster* con celdas o píxeles de aproximadamente 90 metros de resolución espacial horizontal.

ENFOQUE TEÓRICO - CONCEPTUAL

Factores Condicionantes, Desencadenantes y Expuestos

Factores Condicionantes o Pasivos

Susceptibilidad, Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo

Desde la óptica del pensamiento adoptado para el desarrollo de la investigación (*Op. cit.*, 2009), la Susceptibilidad se refiere a la valoración espacial de los factores condicionantes que determinan, según ciertos criterios, cuan proclive a inundaciones es el área de estudio, generándose niveles de propensión. En lo que atañe a la Amenaza, el proceso apunta a la evaluación espacio - temporal (determinación de la probabilidad de ocurrencia de un evento de inundación en un área específica dentro de un periodo de tiempo) de la susceptibilidad y los factores desencadenantes, que establecen, de acuerdo a determinados juicios, los grados de peligrosidad por crecida presentes en el territorio examinado.

Por otra parte, la Vulnerabilidad se concibe como la valoración espacial de los factores expuestos a la amenaza por desbordamiento en la zona de estudio, conforme a criterios que definen las diversas categorías de vulnerabilidad existentes. El Riesgo engloba la integración de los procesos de evaluación espacial de la amenaza y de la vulnerabilidad con el fin de establecer los niveles de riesgo por inundación que muestra el espacio analizado. El estudio se vinculó únicamente al análisis de la Susceptibilidad a inundación.

Área de estudio

La zona seleccionada para el desarrollo de la investigación se localiza en la cuenca del río Boconó, administrativamente abarca parte de los municipios Boconó y Campo Elías del estado Trujillo en la región de Los Andes al occidente de Venezuela con una población alrededor de los 72 mil habitantes. Posee una extensión superficial cercana a las 108226 hectáreas y altitudes que varían desde los 500 hasta los 4006 m.s.n.m. en la Teta de Niquitao. Desde la perspectiva hidrográfica el territorio alberga dos subcuencas principales, la del río Negro y la del río Burate que drenan sus aguas a la cuenca del río Boconó, hoya hidrológica del río Orinoco. La figura 1 muestra la superficie descrita.

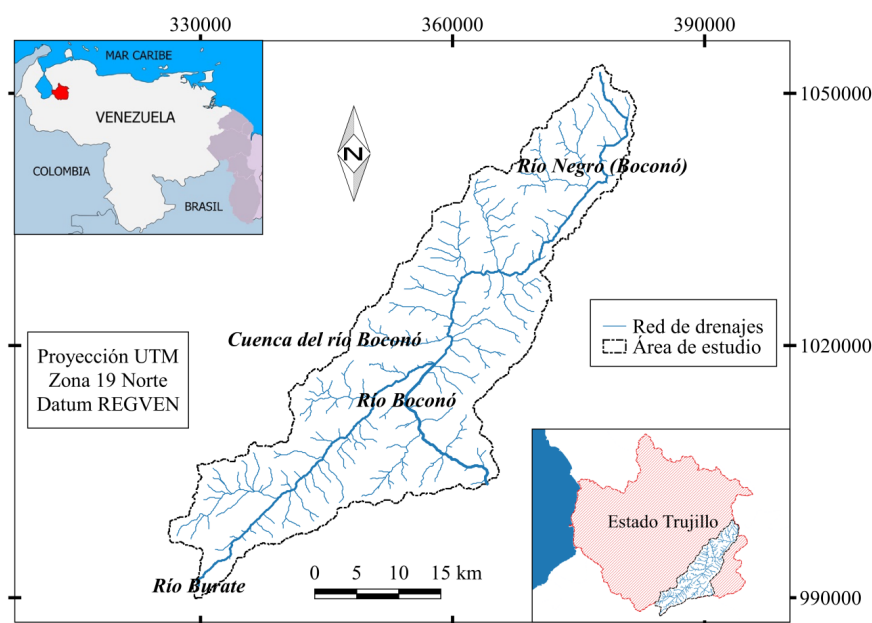


FIGURA 1
Localización del área de estudio, ubicación relativa nacional y regional
Elaboración propia

PROCEDIMIENTO

Datos - Construcción de las capas temáticas

En la creación del modelo espacial de susceptibilidad a inundación en el área de estudio fueron considerados los factores o capas temáticas: Acumulación de Flujo, Pendiente ($^{\circ}$), Altitud (m.s.n.m.), Distancia a Drenajes (m) y Permeabilidad de los Suelos. Todas las variables seleccionadas, a excepción de la Permeabilidad de los Suelos, se derivaron de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) el cual puede ser definido como una representación sistematizada de datos numéricos que simulan la manera en que la altitud se dispone espacialmente en la superficie terrestre (Felicísimo, 1994).

El MDE fue pre - procesado para su mejoramiento mediante el relleno de datos de elevación faltantes por interpolación de los vecinos (calculando el valor medio para cada vecindad de 3x3) y la remoción de pequeñas imperfecciones en los datos. La resolución espacial horizontal aproximada del MDE es 90 metros y fue obtenido de la Misión Topográfica de Radar (SRTM), proyecto desarrollado de manera colaborativa entre distintas instituciones de los Estados Unidos y Europa, entre las que destacan: la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA), la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial (NGA) y el Departamento de Defensa. Los datos son distribuidos libremente y de forma gratuita por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, 2015).

La capa temática de Permeabilidad de los Suelos del territorio analizado se elaboró con datos e información de las Unidades Cartográficas de Suelos de la Cuenca del río Boconó, obtenidas del Estudio de Suelos Gran Visión del Proyecto Guanare - Masparro realizado por el antiguo Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables, Zona VIII (CIDIAT y CEB, 1986). La figura 2 sintetiza las capas temáticas generadas en la investigación.

Procesos - Normalización de las capas temáticas

La normalización de las capas temáticas generadas consiste en la reclasificación de estas en función de ciertos criterios preestablecidos y asociados a su nivel de susceptibilidad ante el fenómeno de inundación. La

reclasificación de las capas temáticas surge en virtud de los diferentes significados y unidades de medida que estas poseen, lo cual impide su posterior integración en la etapa de generación de productos. Resultado de este razonamiento se empleó el método del valor máximo (MVM) en la normalización de las capas temáticas de Acumulación de Flujo, Pendiente, Altitud y Distancia a Drenajes.

El MVM (Roa, 2006, 2007) se fundamenta en dividir cada uno de los valores de una capa determinada entre el máximo valor presente en ella, derivando una nueva capa criterio con valores comprendidos en un rango continuo de 0 a 1, donde 0 representa el mínimo grado de susceptibilidad a inundación, y 1 simboliza el máximo nivel. La capa temática de Permeabilidad de los Suelos fue reclasificada según el potencial de infiltración de las Unidades Cartográficas de Suelos, mediante la asignación arbitraria de valores y aplicando igual escala de medida que en el método del valor máximo. La figura 2 revela los procesos.

Acumulación de Flujo

El criterio básico empleado para su evaluación establece que cuanto mayor es la Acumulación de Flujo en una zona determinada (generalmente se manifiesta como patrones lineares asociados a la red de drenajes), mayor es la susceptibilidad a inundaciones (tendente a 1); de igual manera, cuanto menor es la Acumulación de Flujo en un sitio específico, menor es la susceptibilidad a inundaciones (tendente a 0).

Pendiente

El criterio general utilizado a los fines de su valoración implica que a menor Pendiente del terreno, mayor es la susceptibilidad a inundación (tendente a 1); así mismo, a mayor Pendiente de la superficie, menor es la susceptibilidad a inundación (tendente a 0). Además de la aplicación del método del valor máximo, para el caso particular de esta capa criterio, fue necesario invertir los valores generados para cumplir con el criterio establecido.

Altitud

El criterio fundamental aplicado en la calificación de la Elevación determina que cuanto menor son las Cotas de un territorio en particular, mayor es la susceptibilidad a crecida (tendente a 1); de la misma forma, cuanto mayor son las Cotas de una región concreta, menor es la susceptibilidad a desbordamiento (tendente a 0). De manera análoga a la capa criterio de Pendiente, adicional al uso del método del valor máximo, se invirtieron los pesos fijados para la capa criterio de Altitud con el objetivo de dar cumplimiento al juicio de valor señalado.

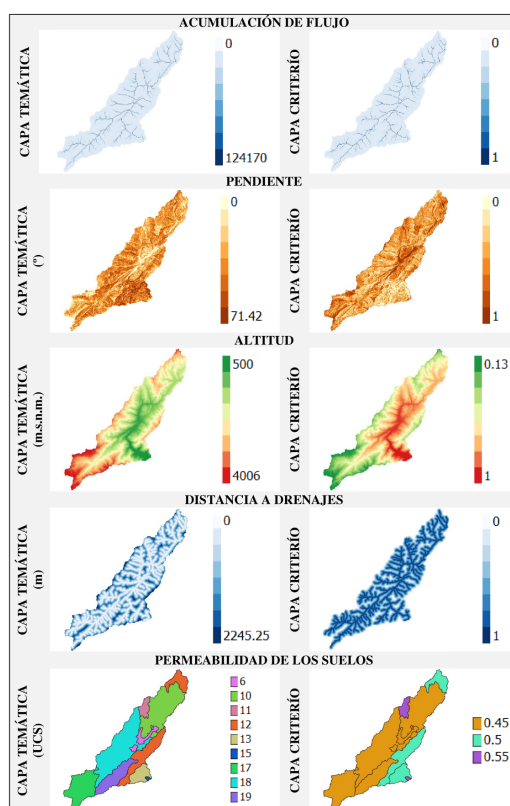


FIGURA 2
Capas temáticas (generadas) y capas criterio (normalizadas)
Elaboración propia

Distancia a Drenajes

El criterio usado como principio para su apreciación estipula que a menor Longitud a Cauces de la red hidrográfica en un área puntual, mayor es la susceptibilidad a las inundaciones (tendente a 1); de igual modo, a mayor Longitud a Cauces de la red fluvial en un espacio definido, menor es la susceptibilidad a inundación (tendente a 0). A los fines de cumplir con el juicio de valor establecido, anexo a la utilización del método del valor máximo, se invirtieron los valores asignados en la capa criterio de Distancia a Drenajes de forma similar a los procedimientos efectuados en las capas criterio de Pendiente y Altitud.

Permeabilidad de los Suelos

El juicio de valor empleado en su evaluación conviene que cuanto menor es la capacidad de infiltración hídrica de las Unidades Cartográficas de Suelos, mayor es la susceptibilidad a crecida (tendente a 1); igualmente, cuanto mayor es el potencial de penetración del agua en las Unidades Cartográficas de Suelos, menor es la susceptibilidad a avenida (tendente a 0). En el área de estudio existe un total de nueve Unidades Cartográficas de Suelos identificadas con los números: 6, 10, 11, 12, 13, 15, 17, 18 y 19. El conjunto de estas unidades pertenece a la categoría de permeabilidad Moderada con ligeras variaciones de su capacidad de

infiltración, lo que condujo a la asignación arbitraria de valores o pesos de la siguiente manera: unidades 12/13 (permeabilidad Moderada – 0,50); unidades 11/15 (permeabilidad Moderada a Moderadamente Lenta – 0,55); unidades 6/10/17/18/19 (permeabilidad Moderada a Moderadamente Rápida – 0,45).

Productos – Superposición de las Capas Criterio

Método de las Jerarquías Analíticas (MJA)

Debido a la importancia relativa que exhibe cada factor en relación con las otras variables inherentes al análisis espacial de susceptibilidad a inundación fue necesaria la implementación del Método de las Jerarquías Analíticas (MJA) de Saaty (citado por Gómez y Barredo, 2005) para el otorgamiento de las ponderaciones correspondientes a las diversas capas criterio. Esta metodología se asienta en la elaboración de una matriz de análisis, en la cual el número de filas y columnas obedece a la cantidad de capas criterio a valorar, estructurándose una matriz de comparación entre pares de capas criterio, cotejando la preeminencia de una respecto a cada una de las restantes, para finalmente a través de procedimientos matemáticos básicos determinar la ponderación de cada capa criterio.

Los pares de capas criterio se evaluaron aplicando la escala de valoración desarrollada por Saaty (*Op. Cit.*, 2005) en la que cada nivel otorga una ponderación que varía desde 1/9 hasta 9 en virtud del grado de preponderancia adjudicado por el evaluador al nexo de pares analizados. En los cuadros 1 y 2 se logra apreciar, tanto la escala de valoración señalada, como la matriz de jerarquización analítica construida, respectivamente.

En la adjudicación de ponderaciones a las variables se consideraron los siguientes argumentos: (a) la acumulación de flujo modela el movimiento del agua a través de la superficie terrestre, examinando el conjunto topografía - humedad; (b) los fenómenos de inundación ocurren en zonas donde existe concentración potencial del escurrimiento superficial; (c) los eventos de desbordamiento se producen en las planicies de inundación y no en sitios de relieve abrupto; (d) la elevación tiene una relación directa con la concentración potencial del escurrimiento superficial; (e) la proximidad a la red de drenajes es poco relevante en áreas con pendiente abrupta y escasa concentración potencial del escurrimiento superficial; y (f) la práctica invariabilidad territorial de las capacidades de infiltración de los suelos.

Nivel de Importancia	Definición	
1/9	Extremadamente	Menos importante
1/7	Fuertemente	
1/5	Moderadamente	
1/3		
1	Igualmente importante	
3	Moderadamente	Más importante
5		
7	Fuertemente	
9	Extremadamente	

CUADRO 1

Escala de medida usada en la asignación de juicios de valor de importancia relativa a cada par de factores del análisis de susceptibilidad a inundación

Elaborado a partir de información tomada de Gómez y Barredo (2005)

Matriz de Jerarquización Analítica (i)	Acumulación de Flujo	Pendiente	Altitud	Distancia a Drenajes	Permeabilidad de los Suelos	Promedio ($\Sigma i/n$)	Peso relativo ($\Sigma i/n / \Sigma ij$)	Peso en porcentaje ($(\Sigma ij/n) / \Sigma ij * 100$)
(i)								
Acumulación de Flujo	1	3	5	7	9	5	0,44	43,61
Pendiente	1/3	1	3	5	7	3,27	0,28	28,49
Altitud	1/5	1/3	1	3	5	1,91	0,17	16,63
Distancia a Drenajes	1/7	1/5	1/3	1	3	0,94	0,08	8,16
Permeabilidad de los Suelos	1/9	1/7	1/5	1/3	1	0,36	0,03	3,12
					Σij	11,47	1	100

CUADRO 2

Asignación de pesos a las capas criterio mediante el MJA Matri

Elaboración propia

Sumatoria Lineal Ponderada (SLP)

Normalizadas las capas temáticas y establecidas las ponderaciones respectivas para cada capa criterio, determinadas a través de la aplicación del MJA (cuadro 2), se ejecutó la etapa de integración de las capas criterio. Con este fin se implementó la metodología de EMC conocida con el calificativo de Sumatoria Lineal Ponderada (SLP), la cual es un procedimiento de combinación aditivo - compensatorio en el que es preciso

que se fijen las ponderaciones de las capas criterio en relación al grado de relevancia que estas poseen y donde el puntaje de cada unidad espacial o celda es consecuencia de sumar los productos de cada capa criterio por su respectiva ponderación relativa. El método de SLP combina las unidades espaciales o celdas desde aquella con mínima susceptibilidad hasta aquella con máxima susceptibilidad (Gómez y Barredo, 2005). La ecuación mostrada a continuación (1) representa la utilización de la SLP en la determinación de la susceptibilidad a inundación en el área de estudio:

<p>Ecuación 1.</p> $\text{Susceptibilidad} = 0,44(\text{Acumulación de Flujo}) + 0,28(\text{Pendiente}) + 0,17(\text{Altitud}) + 0,08(\text{Distancia a Drenajes}) + 0,03(\text{Permeabilidad de los Suelos})$	{1}
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

ECUACIÓN 1
Determinación de la susceptibilidad a inundación
 Elaboración propia

Integradas las capas criterio a través de la ecuación descrita con anterioridad (1) se generó como producto un Mapa de Susceptibilidad a Inundación en la cuenca del río Boconó, para el territorio que corresponde al estado Trujillo en Venezuela. La cartografía en cuestión modela la susceptibilidad a inundación en una escala continua que va desde 0 (mínima susceptibilidad) hasta 1 (máxima susceptibilidad). Adicionalmente, fue necesario reclasificar dicho Mapa para hacerlo coherente con los fines del trabajo de investigación; ofrecer a los usuarios finales de esta carta (ministerios, gobernaciones, alcaldías, protección civil, instituciones educativas, organizaciones no gubernamentales, asociaciones de diversa índole, entre otros) una elevada simplicidad en la lectura e interpretación de la cartografía.

Lo mencionado derivó en el empleo del modo de clasificación Intervalo Igual sobre el histograma de frecuencias del Mapa de Susceptibilidad a Inundación, obteniéndose un nuevo producto cartográfico con cinco categorías o grados de susceptibilidad a inundación (Muy Baja, Baja, Moderada, Alta y Muy Alta). En las figuras 3 y 4 se ilustran, el esquema general metodológico para el desarrollo de la investigación y el mapa de Susceptibilidad a Inundación para el área de estudio, respectivamente.

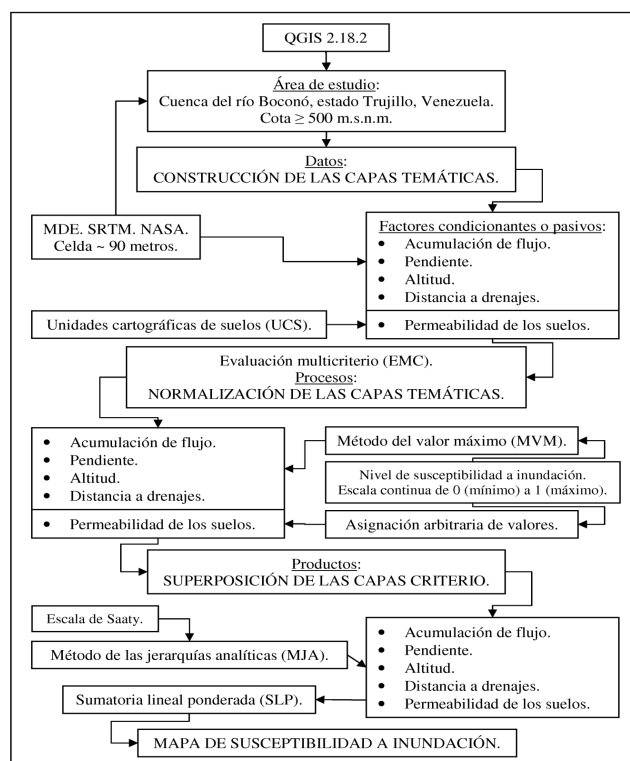


FIGURA 3
Esquema general metodológico para el desarrollo de la investigación
Elaboración propia

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El Mapa de Susceptibilidad a Inundación (figura 4) es una representación de la distribución espacial de los diferentes niveles de susceptibilidad a inundación existentes en la cuenca de río Boconó, estado Trujillo, Venezuela. Del modelo señalado se deriva que el 98,17 % (106251,21 ha) de la superficie analizada posee Muy Baja y Baja susceptibilidad a procesos de crecida; en general, estos espacios se encuentran situados en las divisorias de las microcuencas, alejados de los drenajes de la red hidrográfica, albergando las mayores elevaciones, exhibiendo pendientes pronunciadas y con suelos relativamente permeables. Así mismo, 1,57 % (1702,77 ha) del territorio examinado ostenta Moderada susceptibilidad a inundación, ubicándose dicha categoría principalmente en los cursos medio (presentado un patrón lineal de distribución afín al transporte de sedimentos) e inferior (mostrando un patrón zonal de distribución propio de la deposición de sedimentos) de los ríos Burate y Negro (Boconó).

En lo que concierne a los niveles de Alta y Muy Alta susceptibilidad a crecida, en tan solo 0,26 % (272,03 ha) del área de estudio se manifiestan estas clases. Los sitios de Alta susceptibilidad a inundación se hallan asociados a patrones lineales de distribución que simbolizan los cursos inferiores de los ríos Burate y Negro

(Boconó), donde el trayecto de mayor relevancia fluye desde la unión de la quebrada La Encomienda con el río Negro (Boconó) hasta la intersección del río Burate con el río Negro (Boconó), con una longitud aproximada de 10,55 km. Los lugares de Muy Alta susceptibilidad a desbordamiento también están relacionados con patrones lineares de distribución, cuyo recorrido (cercano a 23,04 km) va desde la confluencia del río Burate con el río Negro (Boconó) hasta el punto de salida de la cuenca (500 m.s.n.m.) en dirección al piedemonte andino - llanero.

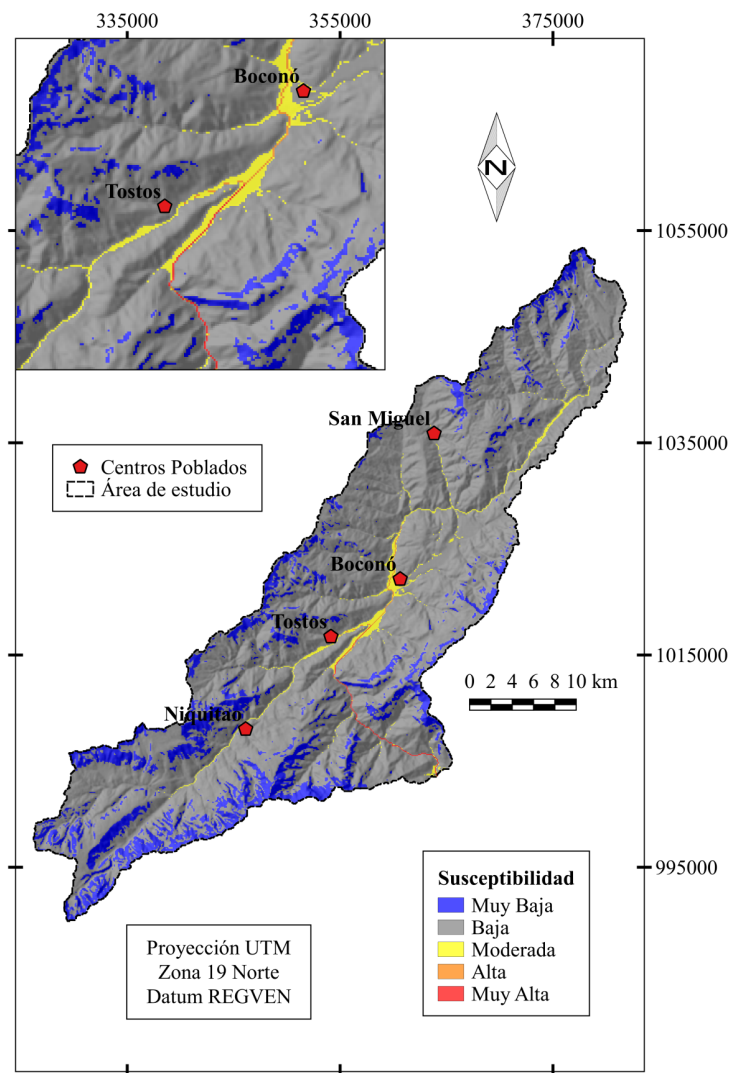


FIGURA 4
Elaboración propia
Elaboración propia

Los resultados obtenidos, en cuanto a la distribución espacial de los diferentes niveles de susceptibilidad a inundación, son los típicos esperados para una cuenca de montaña en la región de los andes venezolanos con grandes elevaciones, donde la práctica totalidad del territorio carece de los factores pasivos o condicionantes para la ocurrencia de inundaciones; sin embargo, notable importancia adquieren las exiguas zonas catalogadas como de *Moderada* y *Alta susceptibilidad* a inundación, las cuales representan apenas 1,67 % (1805,63 ha) de la superficie total, puesto que en una porción de ellas se encuentra localizada parte del área metropolitana de la ciudad de Boconó, la más importante de la cuenca y una de las mayores localidades del estado Trujillo.

Los resultados arrojados por el modelo explican parcialmente porque la ciudad de Boconó se ha visto afectada en diferentes ocasiones por la ocurrencia de fenómenos de inundación; destacan como las principales causas pasivas de los procesos de crecida en la localidad el alto grado de concentración potencial del escurrimiento superficial en el sitio, el bajo nivel de inclinación de los terrenos en algunos sectores y la elevada proximidad al cauce del río. La figura 5 condensa los resultados más significativos derivados del trabajo de investigación.

En lo que corresponde a las razones fundamentales que determinaron el modo de distribución de las diversas categorías de susceptibilidad a inundación en la cuenca analizada resalta la importancia relativa que muestra cada factor condicionante de los procesos de avenida en el territorio frente a las demás variables pasivas; en tal sentido, la adjudicación de mayor ponderación a los factores de *Acumulación de Flujo* (con 43,61 %) y *Pendiente* (con 28,49 %), aglutinando el 72,10 % del peso total asignado, hace de las variables descritas las de mayor relevancia e impacto en el análisis espacial efectuado; mientras que la asignación de menor peso a los factores de *Distancia a Drenajes* (con 8,16 %) y *Permeabilidad de los Suelos* (con 3,12 %) convierte a las variables señaladas en las de menor importancia para el análisis, sumando apenas el 11,28 % de la ponderación global adjudicada.

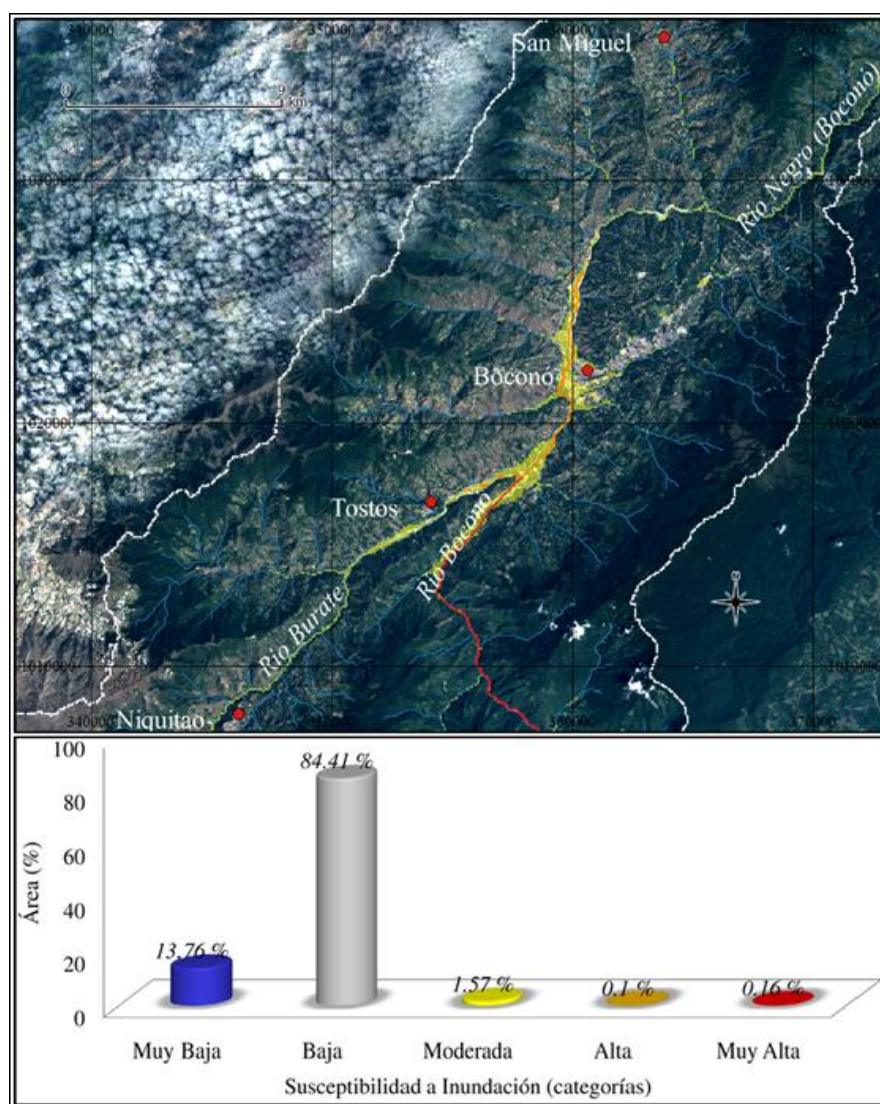


FIGURA 5

Vista síntesis del modelo de susceptibilidad a inundación para el área de estudio, superpuesto sobre una composición de bandas de imagen de satélite Landsat 8 (abril 1, 2016) en color verdadero, y distribución porcentual de la superficie en relación a las diversas categorías de susceptibilidad

Elaboración propia

CONCLUSIONES

El modelo obtenido del trabajo de investigación constituye una estimación de la distribución espacial de los diferentes niveles de susceptibilidad a inundación presentes en el área de estudio, de manera que el modelo planteado puede ser perfeccionado a través de la agregación de nuevas y heterogéneas capas temáticas. Entre las variables de relevancia no consideradas en el estudio destaca el factor Cobertura Vegetal, que pudiese ser integrado al modelo de susceptibilidad a desbordamiento en análisis posteriores. Se sugiere además, efectuar valoraciones de los resultados alcanzados con el propósito de confirmar la calidad del modelo propuesto, lo que proporcionaría a este un nivel más elevado de certidumbre.

El estudio se desarrolló en el marco de una visión general, en la cual la escala de análisis posee importantes limitaciones, ya que los datos e información de entrada (MDE próximo a 90 metros de resolución espacial horizontal) exhiben un perfil global, que simplifica y generaliza los resultados de la investigación; en

consecuencia, dichos datos no aportan niveles de discriminación espacial adecuados para la planificación específica de zonas urbanas en lo concerniente a fenómenos de inundación. Se hace necesario alcanzar un mayor grado de detalle en el estudio de avenidas en áreas urbanas, mediante la reducción de la escala de análisis y el uso de datos e información de carácter específico, con alto nivel de precisión, con el fin de gestionar apropiadamente el riesgo a inundaciones en pequeñas extensiones de superficie.

Los resultados emanados del estudio, de acuerdo al enfoque teórico - conceptual asumido, deben significar el punto de partida para la ejecución de las zonificaciones futuras relativas a la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo de inundación en la cuenca del río Boconó. Especialmente significativa en esta perspectiva es el área metropolitana de la ciudad de Boconó, por lo que se incita al desarrollo de investigaciones que concentren sus esfuerzos en profundizar el análisis espacial de inundación en torno a dicha localidad, aumentando el grado de detalle del estudio y determinando la distribución de los niveles de amenaza, vulnerabilidad y riesgo existentes en la urbe.

La implementación de procedimientos de EMC, bajo ambiente de SIG, constituye una metodología efectiva para abordar problemáticas concernientes a la zonificación de inundaciones, en virtud de múltiples ventajas, tales como: celeridad, seguridad, comunicación, costo, productividad, precisión, colaboración y practicidad de estas técnicas, por tanto se exhorta a la amplia utilización de los métodos indicados en las diversas evaluaciones espaciales de avenida y en territorios de disímiles características. Por último se insta a que las entidades de gobierno utilicen los resultados generados para el apropiado delineamiento de políticas públicas y la adecuada toma de decisiones.

REFERENCIAS

- BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO (BID). (2015). Perfil de Riesgo de Desastres para Venezuela [Documento en línea]. Disponible: <https://publications.iadb.org/handle/11319/7182?locale-attribute=es&> [Consulta: 2017, Junio 17]
- CAMPOS, J. M. & BRAVO, L. (2011, Mayo). Eventos catastróficos por inundaciones y deslaves en Venezuela [Documento en línea]. Ponencia presentada en el evento nacional: Universidades y riesgo urbano. Una vitrina desde la UCV, Caracas. Disponible: http://www.ucv.ve/fileadmin/user_upload/comir/documentos/I1_EVENTOS_CATASTROFICOS_JM_CAMPOS_USB.pdf [Consulta: 2016, Noviembre 15]
- CARRERA, J., MÉNDEZ, W. & RIVAS, L. (2013). Modelaje hidrológico de escenarios para eventos de inundaciones en la planicie de desborde del río Patanemo, estado Carabobo, Venezuela. Revista de Investigación [Revista en línea], 37(80), 245-267. Disponible: <http://www.scielo.org.ve/pdf/ri/v37n80/art12.pdf> [Consulta: 2017, Septiembre 30]
- CENTRO INTERAMERICANO DE DESARROLLO INTEGRAL DE AGUAS Y TIERRAS (CIDAT) & CENTRO DE ECOLOGÍA DE BOCONÓ (CEB). (1986). Diagnostico de la cuenca del río Boconó: Informe de avance del plan de desarrollo. Venezuela: Autor.
- FELICÍSIMO PÉREZ, A. (1994). Modelos digitales del terreno: Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales [Libro en línea]. Disponible: <http://www6.uniovi.es/feli/pdf/libromdt.pdf> [Consulta: 2015, Agosto 27]
- GÓMEZ DELGADO, M. & BARREDO CANO, J. I. (2005). Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio (2a. ed.). España: Ra-Ma, 304 p.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L., FERRER, M., ORTUÑO, L. & OTEO, C. (2009). Ingeniería Geológica (3a. ed.). Madrid: Prentice Hall Pearson Educación, 750 p.
- OLAYA, V. (2012). Sistemas de Información Geográfica [Libro en línea]. Disponible: http://wiki.osgeo.org/wiki/Libro_SIG [Consulta: 2017, Febrero 24]
- OSGEO. (2016). QGIS 2.18.2 [Sistema de información geográfica (SIG)]. Disponible: <http://www.qgis.org> [Consulta: 2016, Octubre 21]

- PEROZO YNESTROZA, M. A. & MARRERO DE LEÓN, N. V. (2011). Estimación del riesgo de inundación en urbanismos y zonas agrícolas ubicadas en la planicie del Río Coro, Estado Falcón, Venezuela. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* [Revista en línea], 20(3), 5-11. Disponible: <http://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v20n3/rcta01311.pdf> [Consulta: 2017, Septiembre 30]
- RIVAS, L. & CARRERA, J. (2016). Zonificación de la amenaza por inundaciones en la planicie aluvial del río Borburata, estado Carabobo, Venezuela. *Revista de Investigación* [Revista en línea], 40(87), 203-226. Disponible: http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1010-29142016000100011&lng=es&tlng=es [Consulta: 2016, Noviembre 15]
- ROA LOBO, J. (2006). Aproximación al mapa de susceptibilidad y amenazas por deslizamientos de la ciudad de Trujillo, Venezuela. *Revista Ágora* [Revista en línea], 17, 45-83. Disponible: <http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/17651/2/articulo8.pdf> [Consulta: 2016, Noviembre 11]
- ROA LOBO, J. (2007). Estimación de áreas susceptibles a deslizamientos mediante datos e imágenes satelitales: cuenca del Río Mocotíes, estado Mérida - Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana* [Revista en línea], 48(2), 183-219. Disponible: <http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/24702/2/articulo2.pdf> [Consulta: 2017, Febrero 24]
- SÁNCHEZ, L. A. & MARTÍNEZ - GONZÁLEZ, Y. (2014). Propuesta de un nuevo enfoque para evaluar la peligrosidad por inundaciones pluviales. *Tecnología y Ciencias del Agua* [Revista en línea], 5(6), 53-67. Disponible: <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v5n6/v5n6a4.pdf> [Consulta: 2017, Septiembre 18]
- UNISDR (2015). Hacia el desarrollo sostenible: El futuro de la gestión del riesgo de desastres. Informe de Evaluación Global sobre la Reducción del Riesgo de Desastres [Informe en línea]. Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR). Disponible: http://www.preventionweb.net/english/hyogo/gar/2015/en/gar-pdf/GAR2015_SP.pdf [Consulta: 2017, Febrero 8]
- USGS. (2015). SRTM [Datos en línea]. Disponible: <http://dds.cr.usgs.gov/srtm/> [Consulta: 2015, Agosto 5]
- VELÁSQUEZ, F. & PÉREZ, G. (1990). Análisis preliminar de la creciente del 5 de abril de 1990. Boconó, Venezuela: Universidad de Los Andes, Centro de Ecología de Boconó (CEB).