

# Identificación de riesgos de sequías y sismos al noroeste de Baja California utilizando Sistemas de Información Geográfica

Michelle Hallack-Alegría<sup>1</sup>, Mario González-Durán<sup>1</sup>,  
Mauricio Peregrina-Llanes<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Baja California, Valle de las Palmas, Tijuana, México

{<sup>1</sup>mhallack, <sup>1</sup>gonzalezduranmario, <sup>1</sup>mperegrina} @uabc.edu.mx  
Paper received on 02/10/12, Accepted on 25/10/12.

**Resumen.** Los sistemas de información geográfica (SIG) son una tecnología de la información y comunicación en la que se despliega información geostadística sobre un mapa, así como el procesamiento de imágenes digitales obtenidas por percepción remota. El empleo de los SIG, en este estudio, tiene como objetivo principal utilizarlos como herramienta auxiliar en la detección e identificación de factores relacionados con la manifestación de eventos extremos relacionados a sequías, y sismos, así como visualizar en espacio y tiempo, la magnitud y la frecuencia de tales eventos. Con los resultados obtenidos se han inferido zonas de riesgo en la zona Este del Municipio de Tijuana, Baja California, como preámbulo para la microzonificación y además se han utilizado en la construcción de Atlas de riesgos para Latinoamérica. Finalmente, la generación de conocimiento aplicado a la protección de la población civil ante los diversos riesgos naturales a los que estamos expuestos fortalecen las bases de datos y la toma de decisiones en los organismos operadores de los recursos hídricos y del Centro Nacional de Prevención de Desastres.

**Palabras clave:** Sistemas de información geográfica, eventos extremos, sequías, sismos, riesgo.

## 1 Introducción

En el extremo noroeste de México confluyen dos riesgos ambientales que consideramos necesario abordarlos desde una perspectiva espacial, con el fin de visualizar las magnitudes y también la extensión superficial en la cual la población es vulnerable; estos son riesgos hidrometeorológicos del tipo sequías y los riesgos de carácter geológico, particularmente los sismos. La motivación de este trabajo es hacer una valoración de las herramientas con las que se capturan y manipulan datos como partida para el análisis de los elementos que determinan la probabili-

dad de riesgo en una zona o región. Uno de los principios fundamentales en el estudio de los riesgos naturales es que el aumento de la población intensifica el efecto del riesgo [1]. Se entiende por riesgo la probabilidad de que se presente un nivel de consecuencias económicas, sociales o ambientales en un sitio en particular y durante un periodo determinado, resultado de interacciones entre amenazas y condiciones de vulnerabilidad. A su vez, la amenaza son los eventos probables con capacidad de generar daño sobre unos elementos con limitación o incapaces de soportar, adaptarse o resistir a dichas amenazas (vulnerabilidad) [2]. Por las condiciones del relieve accidentado, clima árido y semiárido [3], como también aspectos geológicos que enmarcan la región noroeste hacia el municipio de Tijuana, existe la ocurrencia de diferentes fenómenos físicos como sismos, deslizamientos, inundaciones y sequías; que sumados a las condiciones de crecimiento poblacional sostenidos, migración, degradación ambiental, rápida urbanización y cambio climático, ofrecen un caldo de cultivo para escenarios de riesgo complejos y desastres naturales inminentes ante lo cual es importante producir información que primero: identifique factores de riesgo; posteriormente analice causas, consecuencias y se realicen estimaciones de la magnitud de los riesgos, y finalmente se produzca una comunicación del riesgo ante autoridades, academia, población y público en general.

### 1.1 Riesgos hidrometeorológicos

Hoy en día, la escasez de agua es una realidad que afecta la mayor parte del mundo. Mientras algunas regiones del Planeta históricamente se han enfrentado a sequías constantes, otras, como un efecto del cambio climático en los últimos años, las han enfrentado de manera irregular. La cada vez más frecuente incidencia de períodos secos, aunado a la creciente demanda de agua debida al crecimiento poblacional, la contaminación indiscriminada de aguas superficiales y subterráneas, entre otros aspectos, obligan a la formulación de planes de manejo sustentables de este recurso vital. En regiones con climas semidesérticos que cuentan con un intenso crecimiento económico y poblacional, así como una floreciente actividad agrícola la planeación de recursos hídricos se vuelve indispensable para fomentar el crecimiento y mantener la vida a largo plazo [4].

En el caso específico de México, los recursos hídricos son generalmente abundantes, se tienen un aproximado de 1511 kilómetros cúbicos de agua cada año, de los cuales aproximadamente el 72%, de esa agua de lluvia se evapora. La mitad de las precipitaciones que ocurren en el país se concentran en la parte sur, que representa una quinta parte del área superficial total. En el extremo opuesto, solamente el 25% de esta precipitación ocurre en la parte norte del país, la que representa el 50% del área superficial [5]. El estado de Baja California se clasifica dentro de los más secos con un promedio aproximado de 202 mm de precipitación anual [6], lo que lo ubica en una situación vulnerable ante eventos de sequías.

## **1.2 Riesgos Geológicos**

De acuerdo con CENAPRED [7] este riesgo se presenta en función de: peligro, vulnerabilidad, y exposición ante la manifestación de movimientos de masas de terreno y acciones sísmicas. El Municipio de Tijuana, B.C., se localiza en una zona geomorfológicamente condicionada por fallas y lineamientos geológicos, que a su vez representan áreas de liberación de energía en la presencia de temblores.

La zonificación de riesgos sísmicos en las zonas urbanas, denominados micro-zonificación sísmica, es el primer paso y el más importante así como arduo hacia un análisis de riesgo sísmico, y es una estrategia de mitigación en las regiones densamente pobladas. En zonificación es posible observar cuantificadamente, la variación espacial de la respuesta del subsuelo a un terremoto típico que se puede esperar en la zona [8].

En el zona este del Municipio, se localiza el desarrollo habitacional Valle San Pedro, que de acuerdo con el Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Tijuana, 2010 – 2030, en los próximos veinte años albergará una población aproximada de 680,000 habitantes, con los usos de suelo habitacional, industrial, educativo y salud entre otros, en una zona donde la probabilidad recurrente en la manifestación de sismos esta presente; por lo que es necesario validar el nivel de riesgo al que se encuentra sometida la región y la exposición de la población que se espera se albergue en la zona habitacional con proceso de construcción desarrollado a base de mampostería y concreto reforzado. Creemos necesario hacer investigación sobre zonas urbanas desarrolladas y nuevos desarrollos urbanos para que sea posible extender los resultados a la aplicación de análisis antisísmico de edificaciones para estudios presentes, y futuros cambios en las normas y reglamentaciones del estado de Baja California.

## **2 Materiales y métodos**

### **2.1 Contexto espacial**

Al definir el área de estudio se presentan ambos trabajos de identificación de factores de riesgo en diferentes escalas. Por un lado se utilizó un análisis para definir la frecuencia del riesgo de sequías en la región a través de un periodo de retorno de lluvia de 10, 50 y 100 años. Se consideró la extensión aérea estatal de Baja California y una porción de Sonora para tomar en cuenta mayor número de datos en estaciones climatológicas. Por otra parte los elementos del análisis de las zonas con periodos de vibración utiliza una extensión local con el fin de distinguir anomalías en una serie de datos sobre un mismo tipo de suelo o formación edafológica por lo que se hace mención de una escala regional que abarca los estados del norte-este de País, para el análisis del fenómeno de sequías y una escala local para el fenómeno de la sismicidad (Fig. 1).

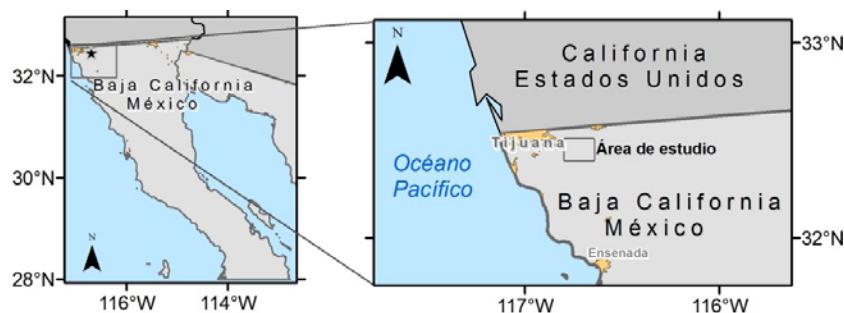
## 2.2 Datos

**Sequías.** El estado de Baja California, situado en el extremo noroeste de México, se encuentra en un área semidesértica por lo que se caracteriza por ser una zona donde las sequías pueden ser un fenómeno normal y esperado.

Se analizó la precipitación media anual para 68 estaciones con registros en el periodo de 1950 – 2008, proponiendo la producción de mapas de precipitación que auxilien en la detección de sequías o inundaciones a partir de los datos obtenidos de un análisis estadístico que permitió definir la frecuencia con que se presentan las sequías para la región noroeste de México que incluyó los estados de Baja California y Sonora.

Para realizar el análisis el primer paso es obtener la base de datos de las variables a utilizar. Para el caso particular del estudio de sequías, se incorpora las precipitaciones de los sitios ubicados en la región de estudio como medio para obtener indicadores de aridez al utilizar valores mensuales o anuales para calcular el déficit anual mensual pluviométrico [3]. En este estudio los datos utilizados son de precipitación media anual y han sido extraídos del Extractor Rápido de Información Climatológica III.

Se utilizó un Sistema de Información Geográfica (SIG) para crear mapas de precipitación media para el área de estudio. Se eligieron dos métodos de interpolación espacial como herramientas geoestadísticas, los cuales presentan una metodología adecuada para esta zona en particular. El primer método, Inverso de la distancia ponderada (Inverse Distance Weighted, IDW), es un método determinístico que mantiene que un valor estimado de un punto es influenciado por los puntos conocidos mas cercanos que por aquellos mas alejados. El segundo, Kriging, es una técnica que asume que la variación espacial de un atributo no es ni determinístico ni estocástico en su totalidad. En su lugar, considera que la variación espacial consiste en tres componentes principales: una tendencia espacial, representando la variación de la variable a regionalizar, una estructura, y un término aleatorio de error. La presencia o ausencia de la estructura y la interpretación de la variable a regionalizar han guiado al desarrollo de diferentes métodos de Kriging para interpolación espacial: Ordinary Kriging, Simple Kriging, y Universal Kriging. Para



**Fig. 1.** Contexto espacial de la escala regional para la identificación de períodos de retorno de precipitación y representación de la escala local en el área de estudio de períodos fundamentales de vibración

en este estudio, se eligió el mapa de precipitación arrojado por el método Simple Kriging, el cual se considera muy útil cuando se dispone de pocos datos de muestreo [9].

**Sismicidad.** Al representar geo-espacialmente los datos espaciales que tienen que ver con los elementos de riesgo sísmico a identificar, se llevó a cabo un levantamiento de los períodos de vibrar en diferentes puntos sobre el terreno capturando su información geográfica con un navegador GPS dentro del desarrollo inmobiliario “Valle de San Pedro” ubicado al suroeste de la ciudad de Tijuana.

Se investigó la variación en la respuesta sísmica de la superficie, para determinar donde el suelo se amplifica a un nivel que pueda causar daño estructural añadiendo atributos a los sitios puntuales como preámbulo a la obtención de mapas de microzonificación del periodo fundamental de vibrar en el suelo, parámetro que se amplifica cuando ocurre un sismo y está vinculado al comportamiento estructural de las construcciones lo cual puede reflejar daños, perdida de rigidez y aparición de grietas.

La distribución espacial de los registros hechos fueron plasmadas en un mapa utilizando un SIG, que permitiera resaltar los períodos de acuerdo a un rango, lo que permitió visualizar tendencias utilizando diferente simbología de acuerdo al campo de clasificación de la variable representada y la diferenciación de ésta medida en campo.

### 2.3 Métodos

Los diferentes aspectos de la representación geográfica que son aplicables a los SIG combinan formas geométricas definidas: puntos, líneas y polígonos con datos estadísticos asociados que determinan una forma y atributos deseados. En los dos casos trabajaremos con una capa de puntos que corresponden a las estaciones climatológicas y los sitios de muestreo de vibraciones. Se tomarán dos capas como base cartográfica en donde se distinguen: polígonos municipales, polígonos estatales, y polígonos de regiones fueron usadas y producidos para la producción de cartografía temática.

**Periodos de retorno.** El archivo de forma o *shapefile* que contiene la información de las estaciones ordenadas de acuerdo a las regiones identificadas por su espacio geográfico con características climatológicas y topográficas similares.

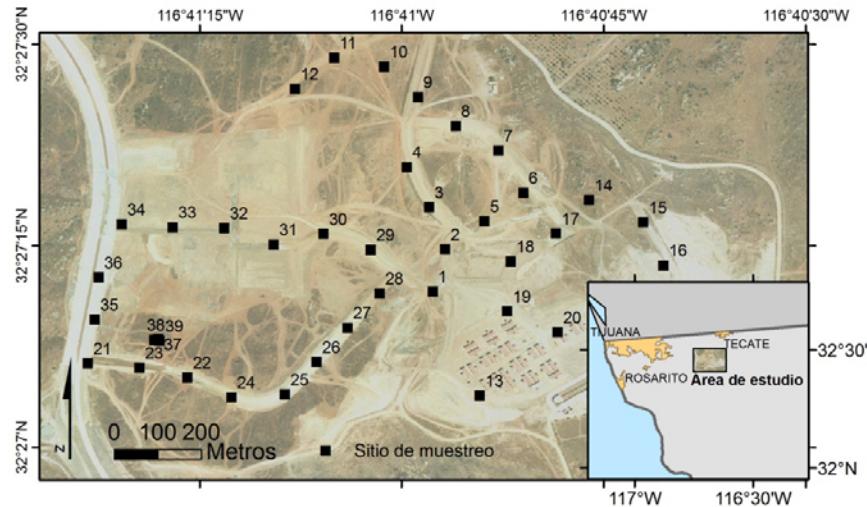
El análisis regional identifica la distribución de probabilidad que presente el mejor ajuste a los datos de precipitación media anual de diversas estaciones en una región, para estimar cuantiles (los valores de precipitación anual asociados a un determinado valor de probabilidad de ocurrencia) [10], con el fin de representar períodos de retorno de 10, 50 y 100 años, para lo cual representamos la cantidad de lluvia esperada por región en porcentaje del promedio de precipitación anual. La metodología utilizada maneja los estadísticos de orden, L-momentos. Utilizan-

do algoritmos Fortran proporcionados por Hosking y Wallis [11] y el software L-Rap de MGS Engineering Consultants.

**Periodos fundamentales de vibrar.** Se caracterizó la respuesta sísmica sobre la superficie del nuevo asentamiento en edificación, Valle de San Pedro, en cuanto a los periodos dominantes del movimiento del suelo en treinta y nueve puntos separados entre sí aproximadamente 100 metros. Se obtuvieron registros de vibración ambiental con un acelerómetro, compuesto por una grabadora y un sensor triaxial el cual se colocó directamente sobre el terreno orientando al norte la dirección X del sensor en todos los puntos. Posteriormente, se procesaron los registros obtenidos en formato binario al convertirlos a código ASCII con los cuales se formuló una base de datos que contiene: los campos que identifican el número del punto, el atributo del periodo de vibración en segundos y las coordenadas geográficas tomadas con un navegador GPS.

**Representación en el SIG.** El sistema de información geográfica para la identificación de sequías agrupó por medio de una geometría poligonal, las regiones definidas por las pruebas de homogeneidad. Se hizo uso de la herramienta polígonos de Thiessen, con la cual se generaron equidistancias entre los puntos que definen las estaciones climatológicas para designar el área de influencia de cada estación, como referencia para establecer los límites entre regiones y generar la capa que contiene cuatro polígonos según cada región, asignando un atributo de lluvia promedio anual que fue etiquetado sobre cada polígono para la representación de los periodos de retorno a través del uso de una leyenda que determina el valor en porcentaje del volumen de lluvia promedio según el caso.

En el despliegue de las magnitudes de los periodos de vibración se utilizó una simbología definida por un ícono en forma de rayo, en el cual, se define el tamaño de representación en función del valor de la variable asignada al campo del periodo fundamental de vibrar. Se realizó de igual manera una interpolación espacial en función de la misma variable para determinar la influencia espacial de los datos puntuales con el fin de desplegar una microzonificación representada en un rango que va de los 0.01-0.03 segundos usando una rampa del color negro al blanco respectivamente.



**Fig. 2.** Sitios de muestreo de periodo dominante del movimiento del suelo en la zona del desarrollo habitacional Valle de San Pedro, en la localidad Valle de Las Palmas Tijuana, B.C.

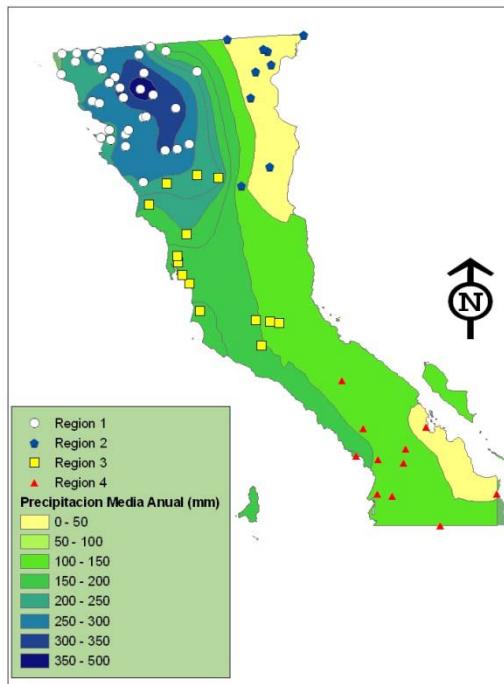
### 3 Resultados y Conclusiones

Se obtuvieron mapas de precipitación media anual (Fig. 3), donde se observa que el noroeste de Baja California cuenta con una alta variabilidad en la precipitación media anual, con un rango que va de 50 mm a 500 mm entre estaciones.

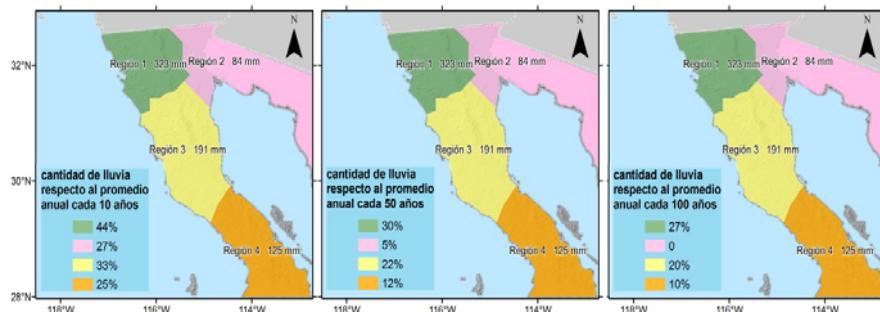
Se muestran los resultados obtenidos a través de la exhibición de los tres períodos de retorno 10, 50 y 100 años entendiendo que la posibilidad de tener un año con valores de precipitación de una tercera o una cuarta parte del promedio es de cada 10 años para la región tres y cuatro respectivamente mientras en que en la región uno en ese mismo periodo de tiempo es recurrente que se presente un año con poco menos que la mitad (44%) de lluvia que la registrada en un año promedio (Fig. 4).

Para la región dos el periodo de retorno de 100 años muestra un valor nulo, por lo que consideramos que es debido a manifestarse en la región árida y con el régimen de lluvias menor del registro por lo que puede considerarse que cada siglo existe la posibilidad de un año con precipitación mínima o sin registro de medición.

La escasez de información para la gestión, uso y manejo del agua, así como los cambios climáticos que esta sufriendo la naturaleza hacen de eventos como la sequía un problema de carácter catastrófico ya que pueden causar daños graves al suelo, cultivos, y otras actividades humanas [12]; de aquí la importancia de contar con herramientas que faciliten el monitorear su inicio, terminación y frecuencia.



**Fig. 3.** Precipitación promedio anual y ubicación de estaciones climatológicas en el estado de Baja California



**Fig. 4.** Periodos de retorno a 10, 50 y 100 años en el porcentaje de precipitación respecto al valor medio anual

Se obtuvo un mapa con la distribución de los períodos dominantes del movimiento del suelo para la zona de estudio, observando la presencia de períodos relativamente cortos menores a 3.0 segundos. El período fundamental promedio resultó de 0.02 segundos sobre el suelo y en roca o donde la capa de suelo era ínfima fue de 0.01 segundos. Se muestra la distribución de los puntos registrados y el rango del valor del período fundamental de vibrar del suelo con el fin conocer donde esta vibración puede causar daño estructural donde actualmente se construyen condo-

minios de tres plantas ya que existen variaciones significativas en el valor de esta variable (Fig. 5).

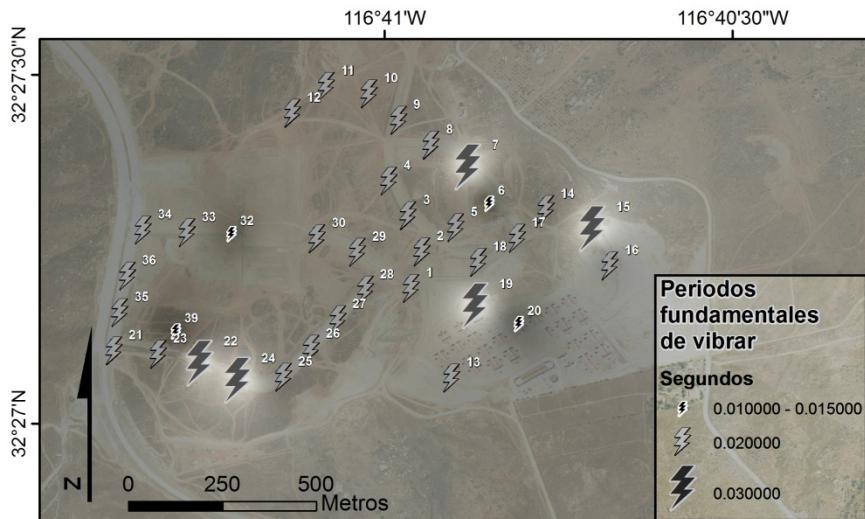


Fig. 5. Periodos dominantes del movimiento del suelo

Los mapas de microzonificación para el desarrollo habitacional completo, serán obtenidos posteriormente ya que se muestren mayor cantidad de sitios para que pueda ser empleado directamente por los ingenieros de diseño incorporándolo en el análisis antisísmico de las diferentes edificaciones a construir en Valle de san Pedro y zonas aledañas.

Los sistemas de información geográfica proveen una manera de relacionar espacialmente una variable por lo que pueden ser usados para representar mediciones, estimaciones, cálculos, inferir valores y distribuciones de los fenómenos naturales y antropogénicos con el fin de determinar las intensidades y las probabilidades de ocurrencia.

#### 4 Referencias

1. Keller, E. A. y Blodgett R. H. 2004.: Riesgos Naturales. Pearson Educación. Madrid. (2004)
2. Rodríguez de Acosta V.: Riesgo sísmico y Comportamiento Social Revista EIRD Informa (Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres) [http://www.eird.org/esp/revista/No6\\_2002/art23.htm](http://www.eird.org/esp/revista/No6_2002/art23.htm)
3. Verbist, K., Santibañes, F., Gabriels, D., & Soto, G.: UNESCO ATLAS of Arid Zones in Latin America and the Caribbean. CAZALAC, La Serena, Chile (2010)

4. Hallack-Alegria, M., y Watkins, D.: Annual and Warm Season Drought Intensity–Duration–Frequency Analysis for Sonora, Mexico. *Journal of Climate* **20**, 1897–1909 (2007)
5. Comisión Nacional del Agua Estadísticas del agua en México 2011, <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGP-1-11-EAM2011.pdf>
6. Comisión Nacional del Agua. Programa Nacional Hídrico 2007-2012, [http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/PNH\\_05-08.pdf](http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/PNH_05-08.pdf)
7. Guevara-Ortiz, E., Quaas Weppen, R., Fernández-Villagómez, G., Zepeda-Ramos, O., Muñoz-Hernández, E. y Torres-Palomino L.: Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Conceptos básicos sobre peligros, riesgos y su representación geográfica, Secretaría de Gobernación, Distrito Federal. México (2006)
8. Slob, S., Hack, R., Scarpas, R., Bemmelen, B. y Duque, A.: A Methodology for Seismic Microzonation Using GIS and SHAKE - A Case Study from Armenia, Colombia in 9th Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment Engineering Geology for Developing Countries J. L. van Rooy and C. A. Jermy, editors. Durban, South Africa (2002)
9. Chang Kang-sung.: *Introduction to Geographic Information Systems*. McGraw Hill, New York (2004)
10. Nuñez-Cobo J., Verbist K., Ramírez-Hernández J. y Hallack-Alegría, M. Guía Metodológica para la Aplicación de Análisis Regional de Frecuencia de Sequías basado en L-momentos y resultados de aplicación en América Latina.. Programa Hidrológico Internacional UNESCO/Centro del Agua para las Zonas Áridas y semiaridas de ALC. Documento técnico No. 27 (2011)
11. Hoskins, J.R.M., y Wallis, J.R.: *Regional Frequency Analysis*. Cambridge. (1997)
12. Frick, D. M., Bode, D., and Salas, J. D.: Effect of drought on urban water supplies. I: Drought analysis, *J. Hydrology Engineering.*, ASCE, 116(6), 733-753 (1990)