

# DELIMITACIÓN GEOGRÁFICA DE PERIODOS DE RETORNO DE LLUVIA ANUAL EN LA ZONA DE BARLOVENTO Y SOTAVENTO DEL GOLFO DE MÉXICO

## GEOGRAPHICAL DEFINITION OF RETURN PERIODS OF ANNUAL RAINFALL IN THE WINDWARD AND LEEWARD AREA OF THE GULF OF MEXICO

Rafael Alberto Guajardo Panes<sup>1\*</sup>; Gabriel Díaz Padilla<sup>1</sup>;  
Ignacio Sánchez Cohen<sup>2</sup>; Finlandia Barbosa Moreno<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Sitio Experimental Teocelo. Carretera Xalapa-Veracruz km 3.5 (Edif. SAGARPA); Colonia Ánimas; Xalapa, Veracruz. MÉXICO.

Correo-e: guajardo.rafael@inifap.gob.mx

(\*Autor para correspondencia).

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. CENID-Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera. Gómez Palacio, Durango. MÉXICO.

<sup>3</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Valles Centrales. Oaxaca, Oaxaca. MÉXICO.

### RESUMEN

Este trabajo muestra el desarrollo de una metodología para calcular periodos de retorno de lluvia anual en regiones del sotavento y barlovento del Golfo de México; los datos empleados fueron registros diarios de 147 estaciones del Servicio Meteorológico Nacional que fueron validados y procesados para realizar la prueba de bondad de ajuste no paramétrica Kolmogorov-Smirnov para la distribución Gumbel; a cada estación se calcularon probabilidades y niveles de lluvia en periodos de retorno de 2, 10, 20, 30, 40, 50 y 100 años mediante la transformación inversa de la distribución Gumbel. A la información puntual se aplicó interpolación espacial con el método *thin plate smoothing spline* para trazar isolíneas. En las imágenes se observó que los niveles de lluvia en los diferentes periodos de retorno registran mayor variación en la zona de barlovento (50 a 350 mm), en tanto que para la región del sotavento las lluvias se mantienen entre los 50 y 100 mm anuales. Esta metodología puede ser empleada como una herramienta en la definición y la elaboración de planes de contingencia, para dar solución rápida a la población ubicada en zonas vulnerables que se vea afectada por un evento de lluvia torrencial.

PALABRAS CLAVE: Bondad de ajuste, distribución Gumbel, periodo de retorno, interpolación.

### ABSTRACT

This paper presents the development of a methodology for calculating return periods of annual rainfall in the windward and leeward regions of the Gulf of Mexico. The data used were daily records of 147 National Weather Service stations that were validated and processed to perform the Kolmogorov-Smirnov nonparametric goodness-of-fit test for the Gumbel distribution. Probabilities and levels of rainfall were calculated at each station, in return periods of 2, 10, 20, 30, 40, 50 and 100 years by the inverse transformation of the Gumbel distribution. Timely information was applied to the spatial interpolation *thin plate smoothing spline* method to plot isolines. The images showed that the levels of rainfall in different return periods have greater variation in the windward (50-350 mm) area; while in the case of the leeward region, rains are kept between 50 and 100 mm annually. This methodology can be used as a tool in defining and developing contingency plans to provide quick solutions to the population located in vulnerable areas affected by an event of rain.

KEYWORDS: Goodness of fit, Gumbel distribution, return period, interpolation.



Recibido: 19 de junio, 2012

Aceptado: 23 de agosto, 2013

doi: 10.5154/r.rchsza.2012.06.020

[http:// www.chapingo.mx/revistas](http://www.chapingo.mx/revistas)

## INTRODUCCIÓN

En nuestro país, entre los años 2000 y 2011 se han realizado 15,124 declaratorias por parte del CENAPRED (2012), de las cuales 2,335 (aproximadamente 15 %) han sido catalogadas como desastres hidrometeorológicos por lluvias, los que han ocasionado pérdidas económicas y de vidas humanas, principalmente en municipios con alto y muy alto grado de marginación. Cabe señalar que estos municipios son los de mayor vulnerabilidad a este tipo de fenómenos, ya que al presentarse de forma sorpresiva dejan poco tiempo a la reacción ante una emergencia. El trabajo tiene como objetivo mostrar un proceso metodológico para la delimitación geográfica de precipitaciones máximas en diferentes periodos de retorno; su utilidad será ubicar áreas geográficas con alta probabilidad de ocurrencia de precipitaciones máximas. La metodología propuesta se basa en lo establecido por Pizarro *et al.* (1986), quienes establecen la predicción de los valores de lluvia en función de la información climatológica disponible, en valores máximos probables aplicando la distribución Gumbel y pruebas de bondad de ajuste. La distribución Gumbel se ha utilizado con buenos resultados para el cálculo de valores extremos de variables meteorológicas, entre ellas precipitaciones y caudales máximos. Además, este método es empleado por Castillo y Ruiz (1979) en su estudio sobre las precipitaciones máximas en España. En relación con la prueba de bondad de ajuste, se calculó el coeficiente de determinación y se empleó la prueba no paramétrica Kolmogorov-Smirnov. Trabajos similares han sido desarrollados con la misma finalidad, como el aplicado por Gutiérrez *et al.* (2011) en el estado de Tamaulipas, empleando un proceso de interpolación con el modelo Kriging. El presente trabajo se lleva a cabo en una zona de diversidad climática que se encuentra influida por las condiciones de barlovento y sotavento con un modelo de interpolación *thin plate smoothing spline*, el cual permite incorporar el modelo de elevación digital como una covariable para contar con periodos de retorno a 2, 10, 20, 30, 40, 50 y 100 años.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio consideró el transecto geográfico empleado por Díaz *et al.*, (2008); éste toma en cuenta dos condiciones de importancia meteorológica en México: barlovento y sotavento del Golfo de México; esta zona se encuentra entre los 19° 55' 48" y 18° 47' 24" de latitud norte y los 99° 09' 00" y 96° 03' 36" de longitud oeste (Figura 1).

En estas condiciones orográficas se originan masas de aire que dan lugar a abundantes lluvias en barlovento, las cuales son ocasionadas por masas de aire que ascienden por la barrera montañosa distribuida a través de los estados de Veracruz y Puebla. La información meteorológica que se utilizó para la realización de este estudio corresponde a los registros de lluvia almacenados en 147 estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2011). Adicionalmente se empleó el modelo de elevación digital (MED) con resolución de 90 metros (INEGI, 1995), el cual sirvió de insumo para generar

## INTRODUCTION

Between 2000 and 2011, in Mexico, 15,124 declarations have been made by the CENAPRED (2012), of which 2,335 (about 15 %) were classified as hydrometeorological disasters due to rainfall, causing economic and human live losses, especially in municipalities with high marginalization. It is important to note that these municipalities are most vulnerable to this type of phenomena, because it occurs unexpectedly, leaving little time to react to an emergency. This study aims to show a methodological process for the geographical delimitation of maximum rainfall in different return periods, its utility will be to locate geographic areas with high probability of occurrence of maximum rainfall. The methodology proposed is based on that established by Pizarro *et al.* (1986), who established the prediction of rain values depending on available climatological information, probable maximum values using the Gumbel distribution and goodness of fit tests. The Gumbel distribution has been used successfully for calculating extreme values of meteorological variables, including rainfall and maximum flows. Furthermore, this method is employed by Castillo and Ruiz (1979) in their study of maximum precipitation in Spain. Regarding the goodness of fit test, we calculated the coefficient of determination and used the Kolmogorov-Smirnov nonparametric test. Similar studies have been developed with the same purpose, as that applied by Gutiérrez *et al.* (2011) in Tamaulipas, using an interpolation process with the Kriging model. This work is carried out in an area of diverse climate that is influenced by the conditions of windward and leeward with a model of interpolation *thin plate smoothing spline*, which allows incorporating the digital elevation model as a covariate to have return periods at 2, 10, 20, 30, 40, 50 and 100 years.

## MATERIALS AND METHODS

The study considered the geographical transect used by Díaz *et al.*, (2008); which takes into account two important meteorological conditions in Mexico: upwind and downwind of the Gulf of Mexico, this area is located between 19° 55' 48" and 18° 47' 24" N and 99° 09' 00" and 96° 03' 36" W (Figure 1).

Air masses are originated in these orographic conditions, which lead to heavy rainfall on the windward side, which are caused by air masses ascending through the mountain barrier distributed through the states of Veracruz and Puebla. The weather information used for conducting this study corresponds to rainfall records stored in 147 National Weather Service stations (SMN, 2011). Additionally, we used the digital elevation model (DEM) with a resolution of 90 meters (INEGI, 1995), which served as input to generate rain surfaces from values calculated for each return period considered by the interpolation process with the model *thin plate smoothing spline*, which is incorporated in the version 4.3 of the software ANUSPLIN developed by Hutchinson (2004), it should be noted that this method showed better results in the study developed by Díaz *et al.*, (2008).

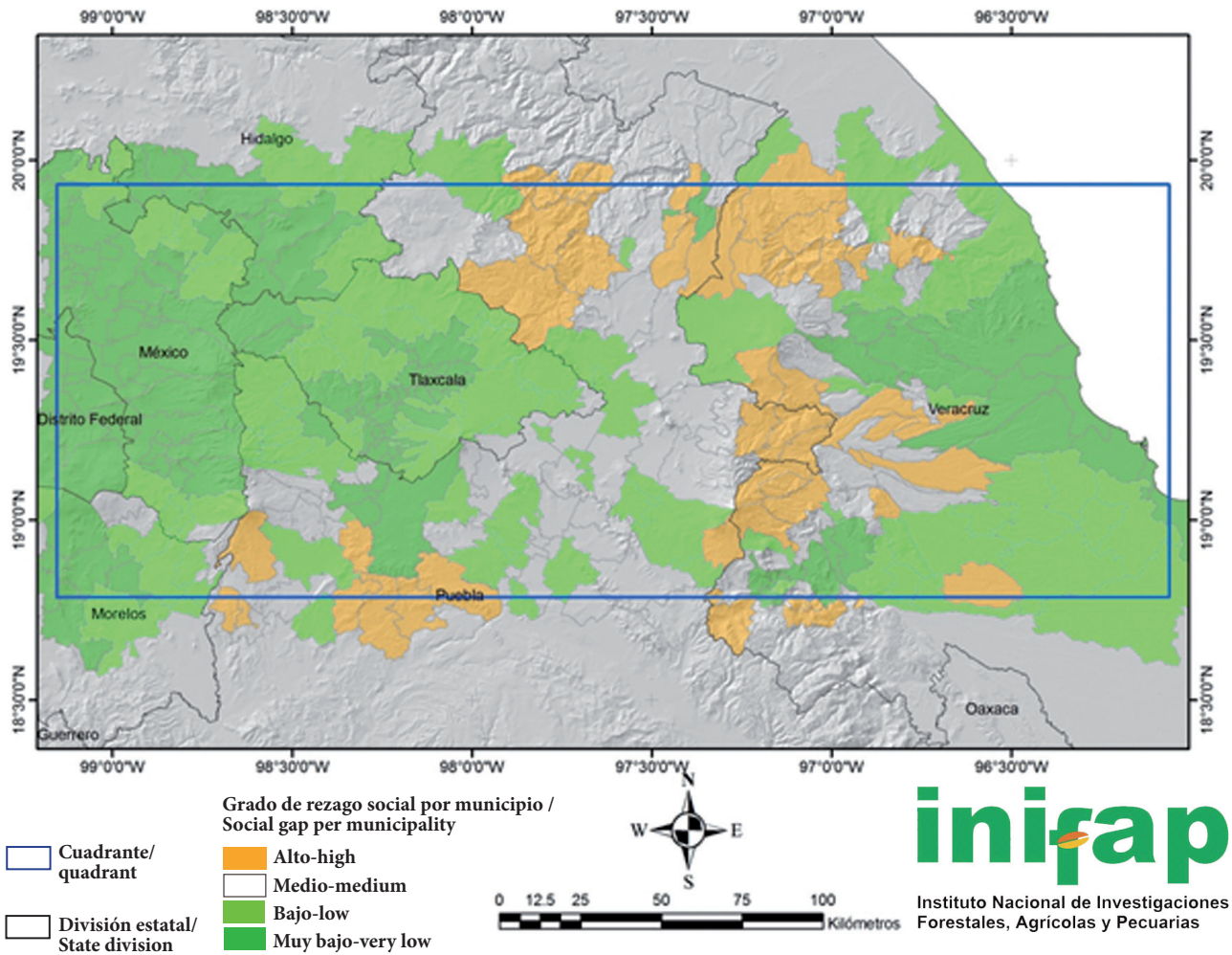


FIGURA 1. Delimitación de la zona de estudio y caracterización del grado de rezago social de municipios que insiden en ella.  
 FIGURE 1. Delimitation of the study area and characterization of the social gap of the municipalities.

superficies de lluvia a partir de los valores calculados para cada periodo de retorno considerado mediante el proceso de interpolación con el modelo *thin plate smoothing spline*, que se encuentra incorporado en la versión 4.3 del software ANUSPLIN desarrollado por Hutchinson (2004); cabe señalar que este método mostró mejores resultados en el trabajo desarrollado por Díaz *et al.* (2008).

El proceso de cálculo de periodos de retorno fue: 1) Validación de los registros de lluvia en cada una de las 147 estaciones incidentes en la zona de estudio; se identificaron inconsistencias y errores lógicos de captura; 2) Selección de valores máximos anuales para cada estación; fueron ordenados de menor a mayor y se calculó la media y desviación estándar; 3) Se calcularon las Frecuencias Reales Acumuladas (*FRA*) empleando el término  $FRA_i = \frac{i}{n+1}$  y las Frecuencias Teóricas Acumuladas (*FTA*) bajo el criterio de la distribución Gumbel  $FTA_i = e^{-e^{-d(Pp-u)}}$  donde *Pp* es la máxima de lluvia observada en el año *i*,  $u = \bar{x} - 0.450047 * s$  y  $d = \frac{1}{0.779696 * s}$ ; 4) Una vez obtenidas las *FRA* y *FTA* para cada observación, se calcularon sus diferencias y se seleccionó la

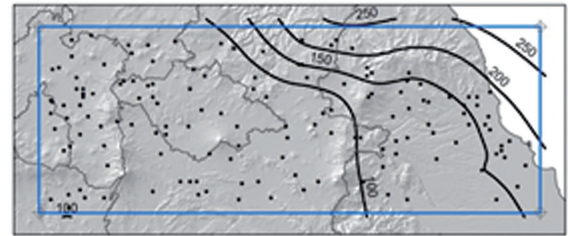
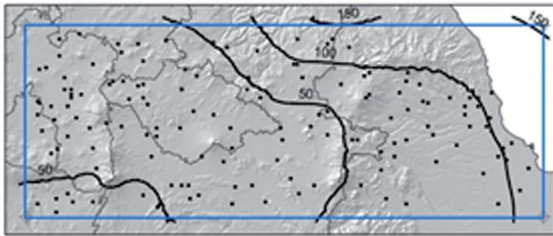
The process of calculating return periods was: 1) Validation of rainfall records in each of the 147 incidents stations in the study area; inconsistencies and logic entry errors were identified; 2) Selection of annual maximum values for each station were ordered from lowest to highest and the mean and standard deviation was calculated; 3) Accumulated Real Frequency (ARF) were calculated using the term  $FRA_i = \frac{i}{n+1}$  and theoretical Cumulative Frequency (TCF) under the criteria of the Gumbel distribution  $FTA_i = e^{-e^{-d(Pp-u)}}$  where *Pp* is the maximum rainfall observed in the year *i*,  $u = \bar{x} - 0.450047 * s$  and  $d = \frac{1}{0.779696 * s}$ ; 4) after obtaining the ARF and TCF for each observation, their differences were calculated and the maximum difference in absolute value was selected, which was taken as the critical value for a hypothesis test of adjustment to the Gumbel distribution through the Kolmogorov-Smirnov nonparametric test; the same process was applied to the 147 stations. 5) With the results we calculated the maximum precipitation for return periods at 2, 10, 20, 30, 40, 50 and 100 years; 6) Finally, information was incorporated into a Geographic Information System (GIS) in order to generate raster information with

diferencia máxima en valor absoluto, la cual se tomó como valor crítico para una prueba de hipótesis de ajuste a la distribución Gumbel a través de la prueba no paramétrica Kolmogorov-Smirnov; este mismo proceso se llevó a cabo para las 147 estaciones. 5) Con los resultados se realizó el cálculo de precipitaciones máximas para los periodos de retorno 2,

resolution of 90 meters and then generate rain isohyets likely to occur in different return periods mentioned, based on the inverse transformation of the function of the Gumbel distribution:  $x = u - \frac{\ln(-\ln(F(x)))}{q}$  with this equation was possible to determine the amount of rain in 24 hours, associated with a return period and a probability for a year.

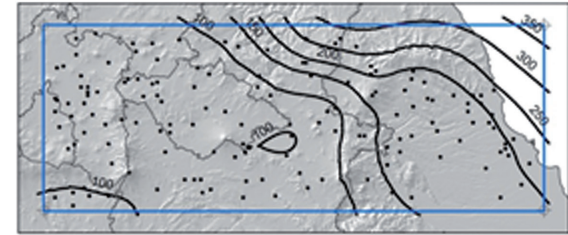
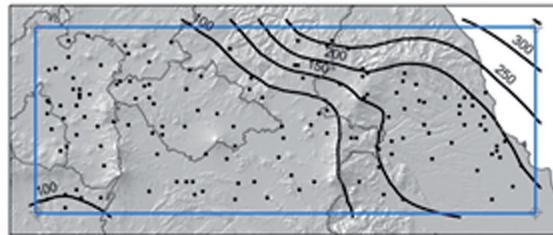
a) Probabilidad del 50 % de que sean superadas las precipitaciones en 24 hrs. en uno de cada dos años. / 50 % chance that precipitation will be overcome in 24 h one in two years.

b) Probabilidad del 10 % de que sean superadas las precipitaciones en 24 hrs. en uno de cada 10 años. / 10 % chance that precipitation will be overcome in 24 h one in 10 years.



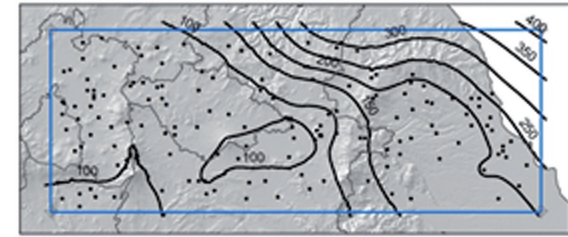
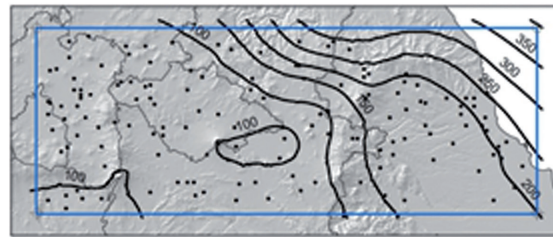
c) Probabilidad del 5 % de que sean superadas las precipitaciones en 24 hrs. en uno de cada 20 años. / 5 % chance that precipitation will be overcome in 24 h one in 20 years.

d) Probabilidad del 3.3 % de que sean superadas las precipitaciones en 24 hrs. en uno de cada 30 años. / 3.3 % chance that precipitation will be overcome in 24 h one in 30 years.

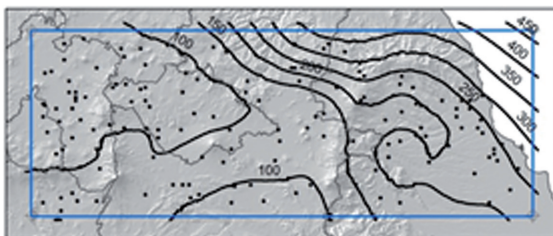


e) Probabilidad del 2.5 % de que sean superadas las precipitaciones en 24 hrs. en uno de cada 40 años. / 2.5 % chance that precipitation will be overcome in 24 h one in 40 years.

f) Probabilidad del 2 % de que sean superadas las precipitaciones en 24 hrs. en uno de cada 50 años. 2 % chance that precipitation will be overcome in 24 h one in 50 years.



g) Probabilidad del 1 % de que sean superadas las precipitaciones en 24 hrs. en uno de cada 100 años. 1 % chance that precipitation will be overcome in 24 h one in 100 years.



- Estaciones / Stations
- ⊕ Límites / Boundaries
- Cuadrante / Quadrant
- ▭ División estatal / State division
- Isohyetas / Isohyets

**inifap**  
 Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

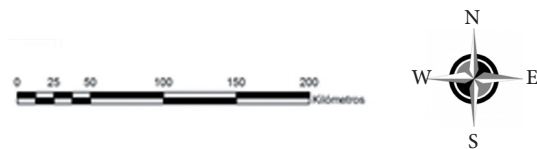


FIGURA 2. Isoyetas que indican las precipitaciones esperadas en 24 horas en diferentes periodos de retorno a diferentes niveles de probabilidad.

FIGURE 2. Isohyets indicating the expected rainfall in 24 hours in different return periods at different probability levels.

10, 20, 30, 40, 50 y 100; 6) Finalmente, la información fue incorporada a un Sistema de Información Geográfica (SIG) con el objetivo de generar información raster con resolución de 90 metros y posteriormente generar isoyetas de lluvia probable en los diferentes periodos de retorno mencionados, tomando como base la transformación inversa de función de distribución Gumbel:  $x = u - \frac{\ln(-\ln(F(x)))}{d}$  con esta ecuación fue posible determinar la cantidad de lluvia en 24 horas, asociada a un periodo de retorno y a una probabilidad para un año.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez realizados los cálculos para obtener la lluvia en 24 horas para cada periodo de retorno en cada estación, se realizó el proceso de interpolación espacial con el software ANUSPLIN 4.3 desarrollado por Hutchinson (2004); después, esta información permitió realizar el trazo de isoyetas para la obtención de las imágenes desplegadas en la Figura 2. En la Figura 2-a) se observa que existe un 50 % de probabilidad de que sean superados los 100 mm de lluvia en 24 horas en un año de cada dos; o bien, que existe una certeza del 50 % de que la lluvia en 24 horas sea menor o igual a los 100 mm en la región del barlovento del Golfo de México. En el caso de la Figura 2-b) hay una probabilidad del 10 % de que se supere la barrera de los 100 mm de lluvia en 24 horas en un año de cada 10 en el sotavento del Golfo de México. Siguiendo este mismo esquema se puede realizar la interpretación para el resto de las figuras.

En los diferentes escenarios mostrados en la Figura 2 se observa cómo el efecto de montaña influye en las precipitaciones en la zona de barlovento, además de que éstas van en aumento conforme los periodos de retorno se incrementan y se acercan a la costa. Es importante señalar que en la región norte-centro del transecto se localizan los municipios con grado de rezago social alto y medio, los cuales pueden verse afectados ante la presencia de abundante lluvia en un lapso de 24 horas en un periodo de retorno de dos años, y que dada su condición es muy probable que no se encuentren en condiciones de responder a un evento climático adverso. En el caso de la zona de sotavento, si bien no existe el mismo patrón de comportamiento que en el barlovento, los intervalos de lluvia no varían a través de los distintos periodos de retorno; sin embargo, ante la presencia de un evento de lluvia, la capacidad de respuesta es menor ya que en esta región se encuentran municipios con grados de rezago social alto; asimismo, considerando una perspectiva de disponibilidad de agua, se puede observar que en esta misma zona los eventos que favorecen la recarga de mantos freáticos son escasos, y por ende el suministro de agua en las poblaciones puede verse afectada en el futuro.

Finalmente, respecto del proceso de interpolación con el modelo *thin plate smoothing spline*, se observó que la lluvia presentó patrones de comportamiento en relación con el relieve del terreno, mostrando así que emplear el modelo de elevación digital como una covariable es de utilidad en la aplicación de este modelo de interpolación.

## RESULTS AND DISCUSSION

Once calculations were performed to obtain rain in 24 hours for each return period at each station, the process of spatial interpolation was performed using the software ANUSPLIN 4.3 developed by Hutchinson (2004). This information allowed to plot isohyets to obtain images displayed in Figure 2. Figure 2-a) shows that there is 50 % probability that the 100 mm of rain is exceeded in 24 hours in a year of two, or that there is 50 % certainty that the rain in 24 hours will be less than or equal to 100 mm in the windward region of the Gulf of Mexico. Figure 2-b) shows that there is 10 % chance that the barrier of 100 mm of rain will be exceeded in 24 hours one of every 10 years in the leeward side of the Gulf of Mexico. Following the same scheme, we can perform the interpretation for the rest of the figures.

In the different scenarios shown in Figure 2, we observe how the mountain effect influences rainfall in the windward area, and that rainfall increases as the return periods increase and approach the coast. It is important to mention that in the north-central region of the transect we found the municipalities with high and medium social gap, which may be affected by the presence of abundant rainfall in a 24-hour period in a return period of two years and that given the condition is very likely that people are not in a position to respond to an adverse weather event. In the case of the leeward area, although there is not the same pattern of behavior than in the windward area, rain intervals are equal across different return periods; however, in the presence of rain, the response capacity is lower because in this region we found municipalities with high social gap; also considering the perspective of availability of water, we can see that in this same area events that favor groundwater recharge are scarce, and thus, water supply for populations may be affected in the future.

Finally, with respect to the interpolation process using model *thin plate smoothing spline*, we observed that rain showed patterns of behavior in relation to the landform, showing that using the digital elevation model as a covariate is useful in the application of this interpolation model.

## CONCLUSIONS

Finally, this study can be used as a methodological guide to calculate return periods in areas where there is availability of information of rainfall, in order to have a tool for decision making and as an input in the calculation of probable maximum rainfall having as an advantage the use of return periods at different time scales. We can also assessed the risk conditions in vulnerable areas (high and medium social gap level municipalities) to prevent climatic contingencies affecting their population and economic activities that support livelihoods; also this study can provide an overview of the occurrence of events favoring the natural recharge of aquifers, which may not meet water demand affecting all population and production regardless of the social gap level.

## CONCLUSIONES

Finalmente, este trabajo puede ser empleado como una guía metodológica para realizar el cálculo de periodos de retorno en zonas donde se tenga disponibilidad de información de lluvia, con el fin de tener una herramienta para la toma de decisiones y como insumo en el cálculo de precipitaciones máximas probables, teniendo como ventaja el empleo de periodos de retorno a diferentes escalas de tiempo. También pueden valorarse las condiciones de riesgo que existen en zonas vulnerables (municipios de Alto y Medio rezago social) para prevenir contingencias climáticas que afecten a sus residentes y las actividades económicas que sirven de sustento; asimismo, puede ofrecer un panorama de la ocurrencia de eventos que favorezcan la recarga natural de acuíferos, los cuales pueden no llegar a satisfacer la demanda de agua afectando todo núcleo poblacional y productivo sin importar el nivel de rezago social que presente.

## LITERATURA CITADA

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). 2012. Base de datos sobre declaratorias de emergencia de desastre y contingencia climatológica. Consultado el 28 de abril de 2012 en [http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/index.php?option=com\\_docman&task=cat\\_view&gid=51&Itemid=215](http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=51&Itemid=215).

- Castillo F, E.; Ruiz B., L. 1979. Precipitaciones máximas en España. Ministerio de Agricultura. Madrid, España. 545 p.
- Díaz P., G.; Sánchez C., I.; Quiroz, R.; Garatuza P., J.; Watts T., C.; Cruz M., I. R. 2008. Interpolación espacial de la precipitación pluvial en la zona de barlovento y sotavento del Golfo de México. *Agricultura Técnica en México* 34(3). pp. 279-287.
- Gutiérrez L., J.; Vargas T., V.; Romero R., M.; Plácido de la C., J. M.; Aguirre B., M. de J.; Silva E., H. T. Periodos de retorno de lluvias torrenciales para el estado de Tamaulipas, México. *Investigaciones Geográficas (México)*. Núm. 76: 20-33.
- Hutchinson, M. F. 2004. Anusplin (computer program) version 4.3. The Australian National University. Centre for Resource and Environmental Studies. Canberra, Australia.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1995. Modelo de elevación Digital (mapa digital). Raster. 90 metros. México.
- Pizarro, R.; Novoa, P. 1986. Instructivo No. 5. Determinación de valores probabilísticos para variables hidrológicas. Elementos técnicos de Hidrología. Corporación Forestal (CONAF). Chile. 78 p.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). 2011. Base de datos climatológicos, registros históricos nacionales. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). México, D.F.