

PRECIPITACIONES EXTREMAS Y SUS IMPLICACIONES EN PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA EN LA PLANIFICACIÓN URBANA DE TAMPICO, MÉXICO

DIEGO SÁNCHEZ GONZÁLEZ*

Recibido: 13-01-11. Aceptado: 06-07-11. BIBLID [0210-5462 (2011-1); 48: 135-159].

PALABRAS CLAVE: Peligros naturales, precipitaciones extremas, procesos de remoción en masa, gestión de los riesgos, planificación urbana, Tampico, México.

KEYWORDS: Natural hazards, extreme precipitation, mass movement processes, geomorphic hazards, risks administration, urban planning, Tampico, Mexico.

MOTS-CLÉS: Dangers naturels, précipitations extrêmes, processus de glissements de terrain, gestion des risques, planification urbaine, Tampico, Mexique.

RESUMEN

La investigación analiza la peligrosidad y exposición de las precipitaciones extremas y sus implicaciones en la evaluación y zonificación de los procesos de remoción en masa en la ciudad de Tampico, localizada en la cuenca baja del río Pánuco, México. La metodología emplea un Sistema de Información Geográfica para la agregación de los datos hidrometeorológicos y geomorfológicos, posibilitando el análisis de las variaciones espacio-temporales de las precipitaciones extremas, y sus implicaciones en la evaluación y zonificación de los procesos de remoción en masa, necesarios para la planificación urbana de Tampico. Los resultados indican que la distribución de las precipitaciones extremas favorece la alta agresividad climática, determinante de los procesos de erosión del suelo y de los peligros geomorfológicos, como desprendimientos y flujos de detritos, en el área de estudio. Asimismo, en los próximos años se prevé el aumento de los procesos de remoción en masa asociados a factores ambientales, por un incremento de la ocurrencia e intensidad de las precipitaciones extremas, y a factores antrópicos, por el crecimiento de la población y viviendas expuestas a áreas inestables.

ABSTRACT

The study analyzed the frequency and exposure of extreme precipitations and their implications for assessment and zoning of mass movement processes in the Tampico city, located in the lower river basin Pánuco, Mexico. The methodology employs a Geographic Information System for the aggregation of hydrometeorological and geomorphological data, making the analysis of spatio-temporal variations of extreme precipitations, and their implications for assessment and zoning of mass movement processes, necessary for urban planning in Tampico. The results indicate that the distribution of extreme precipitations favors the high aggressiveness climatic,

*. Profesor titular de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México. diego.sanchezg@uanl.mx

which determines the soil erosion processes and geomorphic hazards such as falls and debris flows in the study area. Also in the coming years is expected to increase the mass movement processes related to environmental factors, for the increased occurrence and intensity of extreme precipitations, and to human factors, for the growth of population and dwellings exposed to areas unstable.

RESUMÉ

La recherche analyse le danger et l'exposition aux précipitations extrêmes et les conséquences pour l'évaluation et le zonage des processus de glissement de terrain dans la ville de Tampico, situé dans le bassin inférieur du fleuve Panuco, au Mexique. La méthode emploie un système d'information géographique pour l'agrégation des données hydrométéorologiques et géomorphologiques, ce qui rend l'analyse des variations spatio-temporelles des précipitations extrêmes et leurs conséquences pour l'évaluation et le zonage des processus de glissement de terrain, nécessaires à la planification urbaine à Tampico. Les résultats indiquent que la distribution des précipitations extrêmes favorise l'agressivité élevée climatique, ce qui détermine le processus d'érosion des sols et les dangers géomorphologiques tels que les glissements de terrain et coulées de débris dans la zone d'étude. Egalement dans les années à venir devrait augmenter les processus de glissement de terrain liés à des facteurs environnementaux, par l'augmentation de fréquence et l'intensité des précipitations extrêmes, et les facteurs humains, par sur la croissance de la population et des habitations exposées à des domaines instables.

1. INTRODUCCIÓN

El contexto actual de cambio climático exige ampliar el conocimiento sobre las variaciones espaciales y temporales de las precipitaciones extremas, asociadas a un aumento de la frecuencia e intensidad de los ciclones tropicales en el Golfo de México (IPCC, 2007). Se prevé que las variaciones de frecuencia e intensidad de las precipitaciones intensas en 24 horas favorecerán un incremento de los procesos geomorfológicos dinámicos, como remociones en masa, que provocarán un aumento de las pérdidas humanas y materiales (ARISTIZÁBAL y YOKOTA, 2006).

Las precipitaciones intensas son eventos hidrometeorológicos extremos de gran intensidad, baja frecuencia temporal y aparente distribución espacial irregular, que provocan peligros naturales de tipo geomorfológico, como procesos de erosión superficial, movimientos de masa, inundaciones fluviales, arroyamiento torrencial, y cambios en los cauces y en las llanuras aluviales, que desencadenan desastres, afectando a poblaciones, viviendas e infraestructuras (BEGUERÍA y LORENTE, 1999).

Diferentes investigaciones (MÉNDEZ *et al.*, 2008) han analizado la variabilidad climática regional en México, prestando especial atención a la distribución de las precipitaciones por sus repercusiones en el manejo de los recursos naturales y la gestión del riesgo, así como en el desarrollo económico y social. Igualmente, se han documentado las implicaciones de las precipitaciones intensas en las inundaciones regionales y urbanas del país (GARNICA y ALCÁNTARA, 2004). Sin embargo, otros procesos geomorfológicos asociados a estos fenómenos climáticos, como las remociones en masa,

no han sido suficientemente estudiados por la complejidad de analizar su ocurrencia, parcialmente aleatoria e incierta (CHIVITÁ, 2008). Al mismo tiempo, en América Latina la confusión terminológica por el uso frecuente de «deslizamientos» como sinónimo de «procesos de remoción en masa», imputada a deficientes traducciones anglosajonas, no ha contribuido a avanzar en el conocimiento de estos procesos geomorfológicos y a una adecuada gestión del riesgo (ALCÁNTARA, 2000).

En México se estima que 34,9 millones de habitantes residen en zonas de riesgo por inundación (CENAPRED, 2004). Sin embargo, en el país no se tienen estimaciones de la población en riesgo por los procesos de remoción en masa, sobre todo, asociados a lluvias intensas.

En el año 2007 en el país se consignaron más de 824 millones de euros para paliar los desastres provocados por fenómenos naturales en uno de cada cuatro municipios del país, asignando el 55% del presupuesto total a combatir los efectos de las precipitaciones extremas. Ese año en los Estados de Chiapas, Oaxaca, Jalisco, Veracruz y Tamaulipas se destinaron más de 100 millones de euros a paliar los desastres por procesos de remoción en masa asociados a lluvias extremas (Secretaría de Gobernación, 2008).

Algunos estudios (MARDONES y VIDAL, 2001) han indicado la importancia de incrementar el conocimiento sobre la evaluación y zonificación de los riesgos geomorfológicos, como instrumento para la planificación urbana. La evaluación y zonificación de los riesgos naturales son objetivos fundamentales de la planificación urbana y la ordenación del territorio, que permite orientar el uso adecuado del espacio urbano y regional, compatibilizando la intensidad de su ocupación con la fragilidad del entorno geográfico.

A continuación, se presenta un estudio de caso, la ciudad de Tampico, ubicada en la desembocadura de la cuenca baja del río Pánuco en el Golfo de México, que de manera periódica padece desastres, en forma de inundaciones y remociones en masa, como desprendimientos y flujos, por efecto de las precipitaciones extremas asociadas a ciclones tropicales. Entre los años 2007 y 2008 en el municipio se registraron precipitaciones intensas superiores a 150 mm en 24 horas, que desencadenaron procesos de remoción en masa, ocasionando 3 muertos, 50 viviendas afectadas y cortes de vías públicas (CNA, 2008). Sin embargo, en las urbes mexicanas, como Tampico, no se tienen estimaciones de los cuantiosos y costosos efectos, sobre todo, indirectos e intangibles, que provocan cada año estos fenómenos naturales, como las pérdidas económicas en el sector público y privado, los problemas de salud y los cortes de agua potable, entre otros daños (CENAPRED, 2004; LEKUTHAI y VONGVISES-SOMJAI, 2001).

El presente estudio pretende favorecer el conocimiento sobre la peligrosidad y exposición de las precipitaciones intensas en 24 horas en Tampico, a través de la evaluación de las variaciones espacio-temporales de estos fenómenos extremos y sus implicaciones en la zonificación de las áreas urbanas expuestas a los procesos de remoción en masa, como desprendimientos y flujos de detritos. La metodología emplea un Sistema de Información Geográfica para la agregación cartográfica de los datos biofísicos y sociodemográficos, y favorecer la evaluación y zonificación de procesos geomorfológicos dinámicos por precipitaciones extremas en el área de estudio.

En la investigación se suscitan algunas cuestiones importantes: ¿Se está incrementando la peligrosidad de las precipitaciones extremas en el área metropolitana de Tampico y la cuenca baja del río Pánuco? ¿Con qué ocurrencia e intensidad se producen las precipitaciones extremas en el área de estudio? ¿Cuándo se prevé un incremento de las precipitaciones extremas en la ciudad? ¿Qué sectores urbanos de Tampico están más expuestos a los procesos de remoción en masa por lluvias intensas? ¿Qué población y viviendas de la ciudad se encuentran en situación de emergencia climática por remociones en masa asociadas a precipitaciones extremas?

2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

En la evaluación y zonificación de los riesgos naturales en áreas urbanas es necesario determinar los patrones espacio-temporales de los fenómenos naturales, a partir de la peligrosidad, exposición y vulnerabilidad. La peligrosidad se establece a partir de la frecuencia e intensidad del evento, así como de la fragilidad del sistema natural (condicionada por sus elementos internos) (BRIGNARDELLO, 1997). Mientras que, la exposición se refiere al territorio, la población y la vivienda expuestos a un peligro. Por su parte, la vulnerabilidad se corresponde con la capacidad de respuesta intrínseca de una comunidad y territorio expuestos a padecer un daño (CARDONA, 2003).

El objetivo general del estudio es analizar la peligrosidad y exposición de las precipitaciones extremas y sus implicaciones en la evaluación y zonificación de los procesos de remoción en masa en la ciudad de Tampico, México. De igual forma, la investigación persigue ampliar el conocimiento sobre la influencia de las variaciones temporales de las precipitaciones sobre la agresividad climática, determinante de los procesos de erosión del suelo y de los peligros geomorfológicos en el área de estudio. También, se evalúan los patrones espacio-temporales de las precipitaciones extremas, así como sus periodos de retorno, y su incidencia en la exposición y zonificación de los procesos de remoción en masa a escala de sector urbano en la ciudad. Además, el estudio trata de contribuir a la planificación urbana y la gestión de los riesgos geomorfológicos dinámicos provocados por lluvias extremas en Tampico y, en general, en las ciudades del Golfo de México.

La metodología emplea un Sistema de Información Geográfica para la agregación de los datos cartográficos climáticos, hidrometeorológicos y geomorfológicos, así como de los datos estadísticos del último Censo de población y vivienda a nivel de sector urbano y AGEB en el municipio de Tampico (SMN-CNA, 2005; INEGI, 2005). Asimismo, en el trabajo se emplearon fuentes primarias procedentes de un trabajo de campo, realizado entre Octubre del año 2005 y Diciembre del año 2008, consistente en visitas periódicas en el área de estudio.

En los análisis de los datos, especificados en los siguientes apartados, se empleó un software diferente, como Statistical 8.0, que permitió realizar diferentes análisis estadísticos para el cálculo del Índice Modificado de Fournier y Ley de Probabilidad de Gumbel. Por otra parte el programa ArcGIS 9.3, que posibilitó los análisis geoes-tadísticos, como el método de Inverse Distance Weighted (IDW).

El cálculo de los períodos de retorno de las precipitaciones extremas para el área de estudio presenta problemas asociados a los datos de partida (BEGUERÍA y LO-

RENTE, 1999; GUENNI *et al.*, 2008). La deficiencia en los registros pluviométricos disponibles y la circunstancia de trabajar con valores extremos de la distribución, repercute negativamente en el establecimiento de una precisa cartografía del riesgo de precipitaciones extremas para la ciudad. Esta circunstancia incrementa la complejidad para estimar el grado de susceptibilidad de los procesos de remoción en masa por precipitaciones extremas. Debido al error previsible, se tomaron con prudencia los valores asociados a los periodos de retorno proyectados, así como se partió de los datos de las estaciones próximas al área de estudio, emplazadas en la cuenca baja del río Pánuco.

3. LA CIUDAD DE TAMPICO COMO ÁREA DE ESTUDIO

El municipio de Tampico se localiza en el Sureste del Estado de Tamaulipas en la zona costera del Golfo de México, concretamente en el área metropolitana de Tampico, México, en las coordenadas 22° 15' 19" latitud Norte y 97° 52' 07" longitud Oeste, y colindando al Norte y al Este con los municipios tamaulipecos de Altamira y Ciudad Madero, respectivamente, al Oeste con el sistema lagunario Chairel-Tamesí, y al Sur, a través del río Pánuco, con los municipios de Pánuco y Pueblo Viejo, ambos en el Estado de Veracruz (Figura 1).

El término municipal, habitado por 303.924 habitantes (INEGI, 2005), representa el 0,2% de la superficie total del Estado de Tamaulipas, y se extiende sobre 117 km², distribuidos entre los 53,6 km² del casco urbano, que constituyen el 45,8% del término, los 1,98 km² de la laguna urbana de El Carpintero, y los 61,4 km² del Sistema Lagunario Chairel-Tamesí. Se desprende que casi la mitad del territorio está ocupado por aguas superficiales, que favorecen el riesgo de inundación.

La geomorfología del área de estudio está determinada por lomeríos y llanuras aluviales inundables de la Planicie Costera Tamaulipeca del Golfo de México, definida por la cuenca baja del río Pánuco y gestada en el Cenozoico (Figura 1). La suave topografía dominante no está exenta de terrazas aluviales con pendientes pronunciadas (> 30%) y alteradas por factores ambientales y antrópicos, que favorecen los procesos geomorfológicos dinámicos. Algunos estudios (HUDSON, 2004) han evidenciado que la zona de estudio ya sufría desastres por procesos geomorfológicos dinámicos desde el Holoceno tardío.

El clima dominante es tropical subhúmedo, cálido y extremoso, con temperaturas medias anuales de 24,8 °C, alcanzando los 40,3°C entre los meses de Abril y Mayo, y está influido por los vientos alisios y los ciclones tropicales. De la misma manera, se suelen registrar precipitaciones anuales entre 789 a 1,132 mm., aunque el 80% de las mismas se producen entre los meses de Junio a Octubre, coincidiendo con la época de huracanes en el Golfo de México. Igualmente, la existencia de ciclones tropicales recurrentes favorecen las precipitaciones intensas en 24 horas, que generan peligros de tipo geomorfológico.

Tampico se emplaza en la región hidrográfica de la cuenca baja del río Pánuco, más concretamente en la desembocadura de los ríos Pánuco y Tamesí (Figura 1). Las inundaciones de dichas cuencas son repentinas, arrastrando gran volumen de mate-

Diversas publicaciones (GARCÍA, 2003) confirman la compleja variabilidad espacio-temporal de las precipitaciones en el Golfo de México, asociada a la latitud, proximidad al mar, orografía y rasgos de la circulación atmosférica. Entre los años 1961 y 1999 en el área de estudio la heterogénea distribución temporal de las precipitaciones medias mensuales favoreció los peligros naturales (Cuadro 1). En el periodo analizado en Tampico se produjo un significativo descenso de las precipitaciones medias anuales registradas de 1.132,6 mm hasta situarse en 937,8 mm a partir del año 1980 (SMN-CNA, 2005), lo que supuso una reducción media del 17,2% anual en las dos últimas décadas. Algunos expertos (MÉNDEZ *et al.*, 2008) asocian el descenso de precipitaciones medias anuales en la región a la influencia del fenómeno del Niño.

En Tampico la variabilidad temporal de las precipitaciones medias mensuales no es uniforme a lo largo del año (Cuadro 1), debido a la influencia de los ciclones tropicales durante el verano y el otoño, estaciones en las que se concentran más del 80% de las precipitaciones anuales, y la acción de los ciclones extratropicales en el invierno. En los meses de Junio a Octubre se superan los 132 mm, con máximas de 275 mm en Septiembre, a la inversa, entre Enero y Abril las precipitaciones no exceden los 27,2 mm., registrándose la mínima en Marzo, con sólo 15,3 mm (Cuadro 1).

Seguidamente, se evalúan las implicaciones de la distribución temporal de las precipitaciones en la agresividad climática por lluvias, causante del proceso erosivo de pérdida de suelos y de los peligros geomorfológicos en el área de estudio. Para ello, se ha determinado el Índice Modificado de Fournier (*IMF*) (LOBO *et al.*, 2006) a partir de la variabilidad temporal de las precipitaciones registradas en las estaciones climáticas de la cuenca baja del río Pánuco entre los años 1966 y 1999 (SMN-CNA, 2005) (Cuadro 1). El Índice Modificado de Fournier (*IMF*) calcula las precipitaciones con características erosivas en un año y una estación climática dada, a partir de la sumatoria de las precipitaciones correspondientes a los meses del año elevadas al cuadrado (pm^2) y dividida por la precipitación media anual (P), mediante la siguiente ecuación:

$$IMF = \frac{\sum pm^2}{P}$$

En el área de estudio el Índice Modificado de Fournier muestra una desigual distribución de la agresividad climática por precipitaciones, cuyos valores más altos, por encima de 160 mm., se localizan en estaciones próximas a las sierras, como Tierra Blanca (272,9 mm.) y Ocampo (261,7 mm.), y en la desembocadura del río Pánuco, como Tampico (164,6 mm.) (Cuadro 1). A la inversa, en la mayoría de las estaciones ubicadas en la planicie tamaulipeca se encuentran los valores más bajos y una agresividad climática moderada, como Magiscatzin (115.1) y González (112,7 mm.). De los resultados, se deduce que en la cuenca baja del río Pánuco existe una alta y muy alta agresividad climática asociada a la distribución temporal de las precipitaciones a lo largo del año.

Cuadro 1. Distribución de las precipitaciones según Índice de Agresividad Climática, Índice Modificado de Fournier (IMF) y estación climática. Cuenca Baja del Río Pánuco, Golfo de México. Años 1961-1999. (Datos en mm)

Estación climática	Precipitación media anual (mm)	Precipitaciones medias mensuales (mm.)												Índice Modificado de Fournier (mm.)	Índice de Agresividad Climática
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic		
Adjuntas	949,2	31,1	15,9	22,8	34,4	68,9	120,5	188,9	134,6	185,9	80,9	27,1	38,2	125,7	Alto
El Pujal	1.389,0	31,6	23,2	26,1	48,1	112,4	227,3	255,7	177,8	283,3	116,5	44,5	42,5	189,7	Muy Alto
González	812,4	24,2	12,5	16,3	30,0	43,1	155,1	141,6	131,2	143,5	69,2	20,4	25,3	112,7	Moderado
Magiscatzin	839,4	26,3	9,1	15,9	33,2	63,5	147,2	145,6	138,2	152,6	65,2	24,6	18,0	115,1	Moderado
Mante	1.039,7	19,8	14,1	20,8	37,9	91,7	186,7	195,9	153,6	195,0	79,7	22,7	21,8	147,2	Alto
Servilleta	1.255,9	18,0	14,9	27,7	35,5	99,6	254,8	245,9	198,4	226,4	87,1	25,5	22,1	188,9	Muy Alto
Ocampo	1.549,9	22,9	13,3	19,5	34,3	78,7	262,4	336,3	290,7	347,8	91,9	26,9	25,2	261,7	Muy Alto
Panuco	1.016,3	33,7	26,2	14,2	23,7	64,1	170,0	164,2	127,9	210,4	102,4	37,0	42,5	134,6	Alto
Tampico	1.132,6	27,2	18,5	15,3	22,8	51,2	198,0	139,7	161,4	275,0	132,0	43,2	48,3	164,6	Muy Alto
Tierra Blanca	1.941,9	27,3	21,5	39,5	67,6	142,8	289,0	314,1	316,4	421,4	185,0	83,4	33,9	272,9	Muy Alto
Xicotencatl	933,0	18,2	10,0	21,9	45,8	79,1	182,1	176,4	140,0	152,7	68,2	20,2	18,4	130,6	Alto

(a) Clasificación de los valores del Índice Modificado de Fournier según Mora et al (1992) y adaptado para el área de estudio.

Fuente: SMN-CNA (2005); Normales climatológicas del Observatorio Sinóptico de Tampico 1961-1999. Cálculos y elaboración propia.

5. EVALUACIÓN DEL PELIGRO DE PRECIPITACIONES EXTREMAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO

En el apartado se analiza la variabilidad espacio-temporal de las precipitaciones extremas, evaluando su probabilidad y periodos de retorno, así como su distribución espacial en el área de estudio.

Diferentes expertos (PEÑA *et al.*, 1993; MATÍAS-RAMÍREZ *et al.*, 2007) indican que precipitaciones máximas diarias superiores a 70 mm y acumulaciones de lluvia superiores a 140 mm en 3 días producen procesos geomorfológicos dinámicos, como remociones en masa e inundaciones.

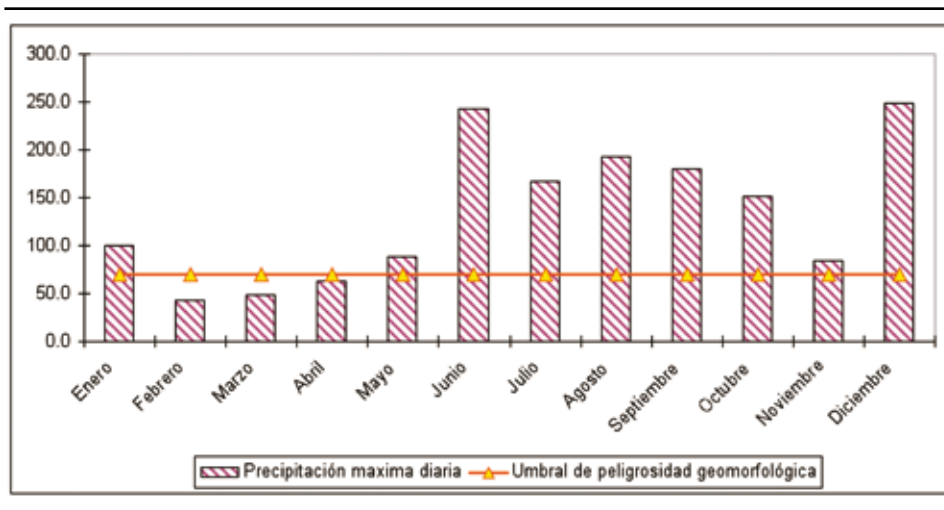
La distribución temporal de las precipitaciones máximas diarias y precipitaciones medias mensuales en Tampico, son similares y más proclives en los meses de verano y otoño, coincidiendo en la época de huracanes (Cuadro 1 y Figura 2). Asimismo, se produce una correlación significativa de 0,68 entre las precipitaciones máximas diarias y precipitaciones medias mensuales. Del mismo modo, en la época de ciclones tropicales se pueden registrar precipitaciones máximas diarias superiores a las precipitaciones esperadas para todo un mes, como por ejemplo en Junio (122%) y Julio (119%). Además, en el mes de Diciembre se produce el valor más significativo, recogándose hasta 5 veces más precipitaciones en un solo día (248,2 mm) que la esperada para todo el mes (48,3 mm).

En el gráfico (Figura 2) se observa la variabilidad temporal de las precipitaciones máximas diarias en los meses del año en Tampico, destacando que los valores más altos se concentran en Diciembre y Junio, con 248,2 y 243 mm en 24 horas respectivamente. En 9 meses del año se registran precipitaciones máximas diarias absolutas por encima del umbral de peligrosidad geomorfológica, y sólo en Febrero, Marzo y Abril los valores se sitúan por debajo de 70 mm. El resultado del análisis muestra la ocurrencia e importancia de las precipitaciones intensas en 24 horas en los peligros geomorfológicos, sobre todo, en la época de ciclones tropicales en la ciudad, coincidiendo con estudios similares (JÁUREGUI y ZITÁCUARO, 1995).

A continuación, se analiza la variabilidad espacial de las precipitaciones máximas diarias y precipitaciones medias anuales en las estaciones climáticas de la cuenca baja del río Pánuco. Diferentes expertos (BEGUERÍA y LORENTE, 1999) han indicado la complejidad de realizar estudios sobre patrones espaciales de distribución de precipitaciones extremas a partir de los datos de una sola estación próxima al área de estudio. Mediante el software ArcGIS 9.3, se procedió a realizar un análisis geoestadístico, a través del método de Inverse Distance Weighted (IDW), que permite crear una superficie interpolada a partir de los datos de precipitaciones, y obtener un modelo espacial de distribución de las precipitaciones máximas diarias y precipitaciones medias anuales, a partir de los datos en los años 1961 y 1999 en la cuenca baja del río Pánuco (Figura 3).

El análisis geoestadístico reflejó patrones espaciales similares de distribución de las precipitaciones medias anuales y precipitaciones máximas diarias (Figura 3), cuyos valores correlacionan en un 0,54. La gráfica de regresión (Figura 4) indica que las estaciones que registran altas precipitaciones medias anuales tienden a presentar altas precipitaciones máximas diarias, principalmente en las estaciones próximas a las

Figura 2. Distribución de las precipitaciones máximas diarias absolutas según umbral de peligrosidad geomorfológica y mes del año. Ciudad de Tampico, México. Años 1961-1999. (Datos en mm)



(*) Umbral de peligrosidad establecido en 70 mm a partir de diferentes expertos (PEÑA *et al.*, 1993) y adaptada al área de estudio.

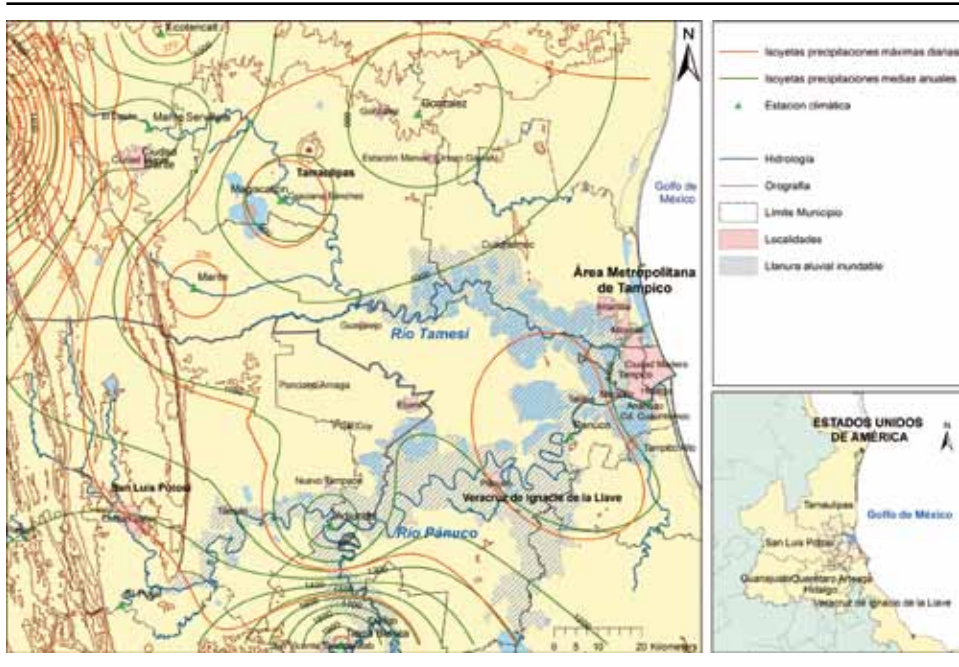
Fuente: SMN-CNA (2005): *Normales climatológicas del Observatorio Sinóptico de Tampico 1961-1999*. Cálculos y elaboración propia.

sierras, como Tierra Blanca (1942 y 371 mm, respectivamente). A la inversa, en las estaciones ubicadas de la planicie tamaulipeca se localizan los valores más bajos, como Magiscatzin (839 y 196 mm, en el mismo orden). Tampico presenta valores moderados (1133 y 248 mm, respectivamente), y se ajusta al modelo. Sin embargo, la estación de Ocampo no coincide con el modelo, al presentar valores máximos en precipitaciones asociados a su particular localización geográfica en la serranía tamaulipeca.

La distribución espacial de las precipitaciones máximas diarias favorece una mayor concentración de las mismas en las proximidades a las serranías, disminuyendo su intensidad conforme se aproxima a la planicie y la costa tamaulipeca (Figuras 3 y 4). Igualmente, la intensidad y concentración de las precipitaciones, sobre todo, por acumulaciones en periodos de 15 días en la época de ciclones tropicales (MORENO *et al.*, 2006), favorece el incremento de los procesos erosivos de pérdida de suelo y remociones en masa, localizados en las serranías y próximos a la desembocadura del río Pánuco, como Tampico y su área metropolitana.

Seguidamente, se ha estimado la probabilidad de precipitaciones extremas en 24 horas superiores a 70 mm, umbral de peligrosidad geomorfológica (PEÑA *et al.*, 1993; MATÍAS-RAMÍREZ *et al.*, 2007), y periodos de retorno en el área de estudio, siguiendo el método de Gumbel (GUMBEL, 1941) (Cuadro 2). La distribución de Gumbel calcula la probabilidad $F(x)$ de que se produzca un evento extraordinario

Figura 3. Distribución espacial de las precipitaciones medias mensuales y precipitaciones máximas diarias absolutas registradas en la Cuenca Baja del río Pánuco, Golfo de México. Años 1961-1999. (Datos en mm)



Cálculos de interpolación según el método Inverse Distance Weighted (IDW).
 Fuente: SMN-CNA (2005): Normales climatológicas 1961-1999. Y elaboración propia.

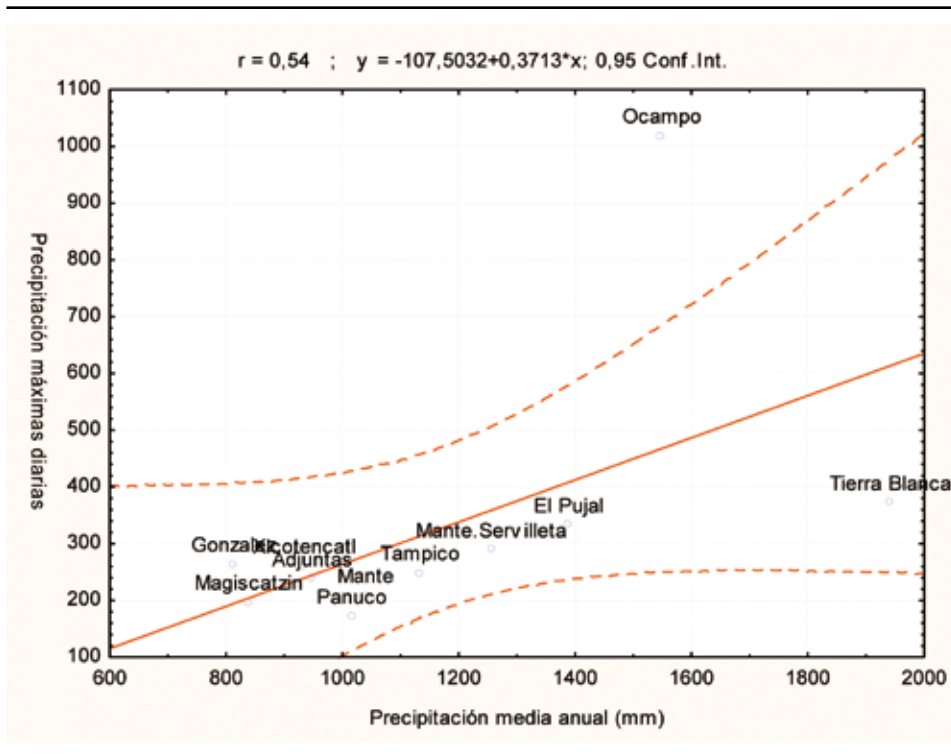
(precipitaciones intensas) a partir de una muestra de datos y en un periodo de retorno (Tr). Así, $1-F(x)$ es la probabilidad de que un valor extremo sea superior a x (Expresión 5.1), mientras que $Tr = 1/(1-F(x))$ es el número de años necesario para que el valor máximo alcanzado iguale o supere el valor x una sola vez. Tr es el período de retorno del valor x (Expresión 5.2). Para el desarrollo de las expresiones 5.1. y 5.2 se han tomado los datos registrados entre los años 1961 y 1999.

$$5.1. F(x) = e^{-e^{-x}}$$

$$5.2. Tr = \frac{1}{1 - F(x)}$$

Los resultados indican que en periodos de retorno de 1,2 años se puede producir precipitaciones extremas en 24 horas superiores a los 70 mm, circunstancia que incrementa los peligros naturales en la ciudad (Cuadro 2). Se observa que a partir de

Figura 4. Regresión de las precipitaciones medias anuales y precipitaciones máximas diarias según estación climatológica. Cuenca Baja del Río Pánuco, México. Años 1961-1999. (Datos en mm)



Fuente: SMN-CNA (2005): *Normales climatológicas 1961-1999*. Cálculos y elaboración propia.

periodos de retorno de 2,9 años, vinculados con precipitaciones extremas de 150 mm, se produce una muy alta peligrosidad de procesos de remoción en masa. Se prevé que para el año 2050 puedan registrarse precipitaciones máximas diarias superiores a 323 mm.

Diferentes expertos (RENDÓN y VARGAS, 1998) han indicado la importancia de analizar la evolución de los factores determinantes, como las precipitaciones extremas, en la probabilidad de ocurrencia de un proceso de remoción en masa a escala regional y local. Algunos estudios (MORA *et al.*, 1992) han establecido parámetros de intensidades de precipitaciones máximas en 24 horas determinantes de procesos de remoción en masa con períodos de retorno de 100 años. Los períodos de retorno calculados para 100 y 500 años muestran valores de 362 y 454 mm., respectivamente, que se asocian a grandes procesos de remoción en masa e inundaciones, con efectos más catastróficos para la población, debido a los problemas de zonificación de las áreas en riesgo, débilmente delimitadas por la administración. Estas áreas sensibles a

Cuadro 2. *Cálculo de los periodos de retorno de las precipitaciones extremas en 24 horas y peligro de procesos de remoción en masa por lluvias. Ciudad de Tampico, México. Años 1961-1999. (mm)*

<i>Periodos de retorno Tr (años)</i>	<i>Probabilidad de Gumbel $F(x)=(1-(1/Tr))^a$</i>	<i>Precipitaciones extremas en 24 horas (Xi) (mm) (a)</i>	<i>Peligro de procesos de remoción en masa por lluvias(b)</i>
1,2	0,1736	70	Alto
2,9	0,6552	150	Muy Alto
5,0	0,8000	187	Muy Alto
10,0	0,9000	229	Muy Alto
25,0	0,9600	283	Muy Alto
50,0	0,9800	323	Muy Alto
75,0	0,9867	346	Muy Alto
100,0	0,9900	362	Muy Alto
125,0	0,9920	375	Muy Alto
150,0	0,9933	385	Muy Alto
175,0	0,9943	394	Muy Alto
200,0	0,9950	402	Muy Alto
225,0	0,9956	408	Muy Alto
250,0	0,9960	414	Muy Alto
300,0	0,9967	425	Muy Alto
400,0	0,9975	441	Muy Alto
500,0	0,9980	454	Muy Alto

(a) Cálculo de las precipitaciones máximas diarias esperadas y periodos de retorno a partir de la muestra de datos de precipitaciones máximas diarias registradas entre los años 1961-1999 mediante la Ley de Probabilidad de Gumbel.

(b) Estimación de la peligrosidad del proceso de remoción en masa por lluvias a partir de Mora *et al.* (1992) y adaptado a la zona de estudio.

Fuente: SMN-CNA (2005); Normales climatológicas del Observatorio Sinóptico de Tampico 1961-1999. Cálculos y elaboración propia.

remociones en masa catastróficas, vinculadas a periodos de retorno muy largos en el tiempo, favorece la falta de prevención que se refleja en la ausencia de mantenimiento de las laderas, así como la presencia de asentamientos humanos en zonas de riesgo (GARNICA y ALCÁNTARA, 2004).

6. EVALUACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LOS PELIGROS GEOMORFOLÓGICOS EN TAMPICO

En las ciudades del Golfo de México, como Tampico, las manifestaciones morfo-dinámicas determinadas por agentes externos, como los procesos de remoción en masa y las inundaciones, generan la pérdida de vidas humanas y cuantiosos daños materiales, así como la afectación de vías de comunicación. A continuación, se evalúan y zoni-

fican los peligros geomorfológicos vinculados a remociones en masa, asociadas a las variaciones espacio-temporales de las precipitaciones extremas en el área de estudio.

Los procesos de remoción en masa, también conocidos como procesos gravitacionales y procesos de ladera, son movimientos de materiales de laderas por influencia de la gravedad, y provocados por factores internos, como procesos de erosión e intemperismo, y factores externos, como sismos y precipitaciones intensas (CRUDEN y VARNES, 1996).

En el área de estudio se pueden observar remociones en masa de origen aluvial y gravitacional. Dentro de las remociones aluviales se registran flujos de detritos, que son grandes volúmenes de agua, generalmente asociados a precipitaciones extremas, que se desplazan a gran velocidad y en sentido de la pendiente, transportando sedimentos moderadamente gruesos y otros clastos. Asimismo, en relación a las remociones gravitacionales, en cornisas (acantilados) y laderas de fuerte pendiente se observan desprendimientos o caídas de rocas diaclasadas, detritos y suelos, que se desprenden, favorecidos por la acción de las precipitaciones intensas, y caen al vacío en un movimiento rápido de desplome (BRIGNARDELLO, 1997).

En la ciudad la peligrosidad de los procesos de remoción en masa, referida a movimientos por flujos y desprendimientos, está determinada por la localización de distintos elementos en peligro, y se ha evaluado a partir del cálculo de los siguientes factores: la topografía, a partir de las pendientes; litología, por la presencia de roca alterada e incoherente; la morfología, a través de la proximidad de laderas con escarpe fuerte; y la vegetación y uso del suelo, a partir del grado de alteración del suelo y desprotección vegetal (Cuadro 3). Del mismo modo, la ocurrencia de los procesos de remoción en masa se ha estimado a partir de la probabilidad de precipitaciones extremas (Cuadro 2), y la zonificación de la ocurrencia en base a la distribución de la peligrosidad de los procesos de remoción en masa en el municipio.

En la zonificación de las áreas susceptibles de remociones en masa es importante determinar la relación entre el tipo de movimiento en masa y su litología (CAPRA *et al.*, 2003). Igualmente, la zonificación se establece a partir del grado de susceptibilidad de los procesos, determinado por la dirección del buzamiento de las capas de rocas deformadas y la geometría de la ladera, y se propone la reubicación de las poblaciones y viviendas expuestas a los peligros geomorfológicos.

En las regiones de climas tropicales afectados por ciclones, las pendientes se convierten en un factor determinante en la zonificación de la susceptibilidad a los procesos de remoción en masa (MORA *et al.*, 1992). Además, la metodología se completa con la observación de campo y el empleo de los Sistemas de Información Geográficos para analizar la cartográfica de los factores pasivos (litología, grado de humedad) y factores activos (lluvias intensas) que determinan las alteraciones del terreno (VAN ZUIDAM, 1986).

En el trabajo de campo se localizan flujos de detritos, con suelos vertisoles y fragmentos de rocas en laderas con fuerte pendiente, en los sectores Nacional y Pescadores, próximos a la laguna del Chairel. De tal manera, se producen desprendimientos localizados en acantilados y fuertes pendientes de ladera (>30%), como rocas sedimentarias estratificadas y semiconsolidadas, de tipo areniscas-limonitas, altamente

Cuadro 3. *Evaluación de la peligrosidad según factores de los procesos de remoción en masa. Municipio de Tampico, México. Año 2008*

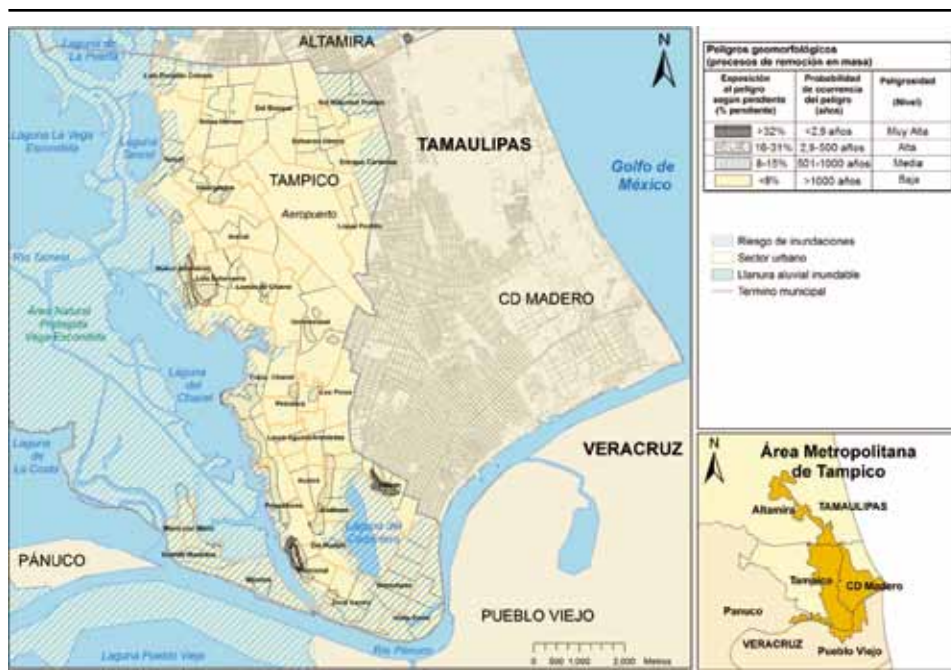
Factores	Peligrosidad			
	Muy Alta	Alta	Media	Baja
Probabilidad de ocurrencia (años) (a)	<2,9 años	2,9-500 años	501-1000 años	>1000 años
	<i>Peligros de remoción en masa</i>			
Morfológicos	<i>Laderas con escarpes muy fuertes</i>	<i>Laderas con escarpes fuertes</i>	<i>Laderas con escarpe mediano</i>	<i>Laderas con escarpe débil, terrazas, plataformas y llanuras</i>
Pendientes (%)	>32%	16-32%	8-15%	<8%
Litología	Rocas muy alteradas e incoherentes	Rocas alteradas e incoherentes	Rocas fracturadas y semicoherentes	Rocas sanas y coherentes
Vegetación y uso del suelo (% de cobertura)	Muy escasa cobertura vegetal (<25%)	Escasa cobertura vegetal (25-49%)	Cobertura vegetal medianamente protegida (50-74%)	Cobertura vegetal protegida (>74%)

(a) Cálculo de las precipitaciones máximas diarias esperadas y periodos de retorno a partir de la muestra de datos de precipitaciones máximas diarias registradas entre los años 1961-1999 mediante la Ley de Probabilidad de Gumbel.
Cálculos y Elaboración propia.

intemperizadas y fracturadas, con escasa vegetación, en muchos casos modificados por la acción del hombre y agravada por las lluvias extremas, como en el Sector Obrera, próximo a la laguna de El Carpintero (Figura 5).

Seguidamente, mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica (ArcGIS), se ha pasado a analizar los resultados de la zonificación de la peligrosidad de los procesos de remoción en masas a escala de sector (Figura 5). Se observa que los niveles de peligrosidad muy altos están vinculados con un peligro muy alto de procesos de remoción en masa, una probabilidad de ocurrencia menor de 2,9 años y precipitaciones extremas de 150 mm., laderas con escarpes muy fuertes y pendientes superiores a 32%, rocas muy alteradas y una cobertura vegetal muy escasa (<25%), y localizados próximos al borde de las lagunas del Chairel y El Carpintero, en los sectores Nacional, Pescadores y Obrera, afectados por inundaciones periódicas. También, los niveles de peligrosidad altos se relacionan con un peligro alto de procesos de remoción en masa, una ocurrencia de 500 años y precipitaciones extremas 454 mm., laderas con escarpes fuertes y pendientes entre 16 y 32%, rocas alteradas y una cobertura vegetal escasa

Figura 5. Zonificación espacio-temporal según peligrosidad y exposición a los procesos geomorfológicos a nivel de sector urbano. Municipio de Tampico. México. Año 2008



Fuente: Cálculos y Elaboración propia.

(25-49%), y situados próximos al borde de las lagunas del Chairel y El Carpintero, en los sectores Nuevo Amanecer, Pescadores y Obrera, parcialmente afectados por problemas de inundación.

A su vez, los niveles de peligrosidad medios se asocian con un peligro medio de procesos de remoción en masa, una ocurrencia de 1.000 años, laderas con escarpe mediano y pendientes entre 8 y 15%, rocas fracturadas y cobertura vegetal medianamente protegida (50-74%), y emplazados próximos a las lagunas urbanas, como los sectores Fraccionamientos Chairel, Pescadores, Del Pueblo, Anáhuac y Obrera, y sectores obreros de la periferia, como Luis Echevarría e Insurgentes. De la misma manera, los niveles de peligrosidad bajos se corresponden con un peligro bajo de procesos de remoción en masa, una ocurrencia superior a los 1000 años, laderas con escarpe débil y pendientes inferiores a 8%, rocas sanas y coherentes, una cobertura vegetal superior al 74%, y ubicados en sectores de la periferia norte, como Niños Héroes, Del Bosque, Esfuerzo Obrero y López Portillo.

Durante décadas en el municipio el problema de la falta de vivienda de las comunidades con bajos recursos y el peligro de inundaciones favoreció la ocupación progresiva y sin control de las terrazas aluviales. Sin embargo, en las últimas décadas

Cuadro 4. *Distribución de la población y vivienda expuesta a peligros por procesos de remoción en masa según sector urbano. Municipio de Tampico, México. Año 2008*

Nivel de peligrosidad de los procesos de remoción en masa	Superficie expuesta		Población			Vivienda		
	Total (Km ²)	(%)	Densidad (hab./km ²)	Total ^(a)		Densidad (vivienda/km ²)	Total	
					(%)			(%)
Muy Alto	0,24	0,45	7.450,0	1.788	0,59	2.129,2	511	0,61
Alto	0,29	0,54	7.900,0	2.291	0,75	2.220,7	644	0,77
Medio	2,44	4,56	6.827,5	16.659	5,48	1.911,5	4.664	5,58
Bajo	50,59	94,45	5.597,7	283.186	93,18	1.535,9	77.700	93,03
Total	53,56	100,00	5.674,5	303.924	100,00	1.559,4	83.519	100,00

(a) Estimación en base al promedio de ocupantes en viviendas particulares habitadas por sector.
Fuente: INEGI (2005): Censo de Población y Vivienda 2005. Cálculos y elaboración propia.

la presión urbanística sobre estos espacios vulnerables ha incrementado la superficie expuesta a niveles de peligrosidad muy altos y altos por los procesos de remoción en masa asociados a precipitaciones extremas, hasta ocupar 0,53 km² y representar el 1% de la superficie total del casco urbano, con 53,6 km² (Cuadro 4). La distribución espacial de la exposición a peligros altos afecta, sobre todo, a los sectores urbanos próximos a las lagunas urbanas, como Pescadores (0,12 km²), Obrera (0,11 km²) y Nacional (0,10 km²), que suponen el 62,8% de la superficie total expuesta. En datos relativos, los sectores urbanos con pendientes >30%, y próximos a las lagunas urbanas, como Nacional, Obrera y Pescadores, enfrentan una exposición al peligro superior al 8,4% de su superficie. A la inversa, los sectores con pendientes <8% y ubicados al Norte del municipio, como Esfuerzo Obrero y Aeropuerto, no presentan superficie expuesta a peligros de remoción en masa. La existencia de diferentes atlas de riesgo estatales y municipales elaborados por las administraciones no ha evitado el incremento de las áreas urbanas y priurbanas expuestas a peligros naturales (PERLES y MÉRIDA, 2010). La falta de colaboración entre las distintas administraciones ha favorecido la ausencia de planificación urbana y de gestión del riesgo para el conjunto del área metropolitana (SÁNCHEZ y BATRES, 2007).

Entre los años 2000 y 2005 en el área de estudio la población expuesta a niveles de peligrosidad muy altos, altos y medios por remociones en masa se incrementó un 3,19% anual, mientras que el conjunto del municipio registró sólo un crecimiento del 0,57% anual (INEGI, 2005). En el año 2005 en Tampico la población expuesta a niveles de peligrosidad muy altos y altos por remociones en masa asciende a 4.079 habitantes, es decir, el 1,34% de los 303.924 habitantes censados (INEGI, 2005) (Cuadro 4). En el municipio la desigual distribución de la población presenta valores por encima de los 526 habitantes expuestos al peligro en los sectores próximos a las lagunas urbanas, como Nacional, Obrera y Pescadores, que sumados constituyen el 69,7% de la población total expuesta de la ciudad (Cuadro 5). A la inversa, en los sectores de la

periferia Norte, como López Portillo y Aeropuerto, no se registra población expuesta. En datos relativos, los sectores urbanos de Nacional (11,6%), Pescadores (10,4%) y Obrera (10%), presentan las mayores tasas de población expuesta a procesos de remoción en masa. También, la alta densidad de población de Tampico, con valores de 5.674,5 hab./km², complica la gestión del riesgo, y hace más necesaria la planificación urbana, sobre todo, en los sectores expuestos con densidades de población por encima de los 10.000 hab./km², como Nacional y Obrera.

El número de viviendas expuestas a niveles de peligrosidad muy altos y altos por procesos de remoción en masa alcanza los 1.155 domicilios (Cuadro 4), es decir, el 1,38% del total censado, concentrándose, sobre todo, en los sectores de Nacional, Obrera y Pescadores, todos por encima de 150 viviendas en peligro, y que sumadas representan el 70,8% del total de viviendas expuestas (Cuadro 5). Precisamente, en estos sectores obreros, como Pescadores, se detecta la presencia de viviendas construidas con materiales precarios (madera, cartón, lámina) en zonas de fuerte pendiente, y agravadas por la alta densidad de viviendas, por encima de la media del municipio (>1.559 viviendas/Km²). La alta marginación social de sus residentes, asociada a la precariedad de las condiciones socioeconómicas y la falta de vivienda, así como intereses políticos y económicos, favorecen la ocupación irregular y el cambio de uso del suelo, incrementando las zonas de riesgo geomorfológico en un contexto de permisividad pública y descontrol urbanístico.

7. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La ciudad de Tampico, por su localización geográfica en la cuenca baja del río Pánuco, se encuentra expuesta a los ciclones tropicales del Golfo de México, factor determinante de las precipitaciones extremas, que ocasionan procesos geomorfológicos dinámicos, como remociones en masa e inundaciones (JIMÉNEZ y SÁNCHEZ, 2007).

En la cuenca baja del río Pánuco el patrón de variabilidad temporal de las precipitaciones determina un alto índice de agresividad climática, como el registrado en Tampico, que favorece los procesos erosivos de pérdida de suelo y las remociones en masa. Asimismo, en la cuenca la distribución espacial de las precipitaciones extremas favorece su mayor concentración en las serranías, disminuyendo su intensidad hacia la costa. Sin embargo, en el municipio se registran valores que se sitúa por encima de las estaciones climáticas ubicadas próximas a la desembocadura del Pánuco, lo que contribuye a incrementar los peligros geomorfológicos en la ciudad.

En el área de estudio el complejo patrón de distribución temporal de las precipitaciones intensas no siempre está asociado a la ocurrencia de un ciclón tropical, aunque su incidencia es mayor en la época de huracanes, que comprende los meses de verano y otoño, existiendo una correlación moderadamente significativa entre la distribución de las precipitaciones extremas y las precipitaciones mensuales. En 9 meses del año existe peligro de precipitaciones intensas en 24 horas superiores a 70 mm, así como acumulaciones de lluvias extremas en periodos de 15 días, que favorecen los procesos de las remociones en masa e inundaciones (MORENO *et al.*, 2006).

En los próximos años en el área de estudio se prevé que se sucedan menos precipitaciones anuales, asociado al fenómeno del Niño (MAGAÑA *et al.*, 2003). Sin embargo, se producirá un incremento de la intensidad y concentración de las precipitaciones mensuales y, sobre todo, precipitaciones extremas, que acentuará el alto índice de agresividad climática existente en la región y, en especial, en Tampico y su área metropolitana.

Los resultados indican que la ciudad se encuentra en una zona expuesta a peligros naturales por precipitaciones extremas superiores a 150 mm cada 2,9 años. Se prevé que a partir del año 2050 se sucedan precipitaciones extremas con valores superiores a 323 mm en 24 horas, lo que incrementará el riesgo de catástrofe por remociones en masa en el municipio. Por otra parte, se estima que se registren precipitaciones extremas de 362 y 454 mm cada 100 y 500 años, respectivamente, determinando la ocurrencia e intensidad de procesos geomorfológicos de gran magnitud. Es importante que la Administración delimite las áreas de riesgo a partir de periodos de retorno de precipitaciones extremas más amplios (500 años), evitando la falta de prevención y favoreciendo una adecuada gestión del riesgo y planificación urbana. En consecuencia, es prioritario mejorar la deficiente red de estaciones climáticas en la cuenca baja del río Pánuco y, en general, en el país, para incrementar la calidad de los registros pluviométricos y posibilitar mejores investigaciones.

En el área de estudio se producen procesos geomorfológicos dinámicos ajenos a las precipitaciones extremas. Sin embargo, en Tampico la mayoría de los desastres provocados por remociones en masa, como flujos de detritos y desprendimientos, están determinados por la combinación de factores ambientales, principalmente, precipitaciones extremas, y factores antrópicos, por la presión de las comunidades sobre los espacios vulnerables.

La superficie de la ciudad expuesta a los peligros por remociones en masa, asociados a precipitaciones extremas, representa el 1% del casco urbano del municipio, es decir, 0,53 de los 53,6 km². Se estima que cada 2,9 años se produce una alta peligrosidad geomorfológica por lluvias intensas en 24 horas superiores a los 150 mm, vinculado a laderas con escarpe fuerte, pendientes >16%, rocas alteradas e incoherentes, y una cobertura vegetal escasa, como en los sectores urbanos inundables próximos a las lagunas urbanas, sobre todo, Nacional, Obrera y Pescadores. Así, se estima que entre los años 2000 y 2005 la población expuesta a peligros geomorfológicos se ha incrementado un 3,19%, hasta alcanzar los 4.079 habitantes expuestos, es decir, el 1,34% del censo, principalmente, en sectores con altas densidades de población (7.450 hab./Km²) y vivienda (2.129 viviendas/Km²). Los resultados indican que en los próximos años se producirá un incremento de los peligros geomorfológicos asociado a precipitaciones extremas y, sobre todo, al crecimiento de la población y viviendas en áreas de riesgo, favorecido por la permisividad pública.

El estudio advierte que determinadas amenazas no contempladas por los gestores públicos, como las precipitaciones extremas, pendientes y profundos perfiles de meteorización, se incorporan a la intensa urbanización en laderas sin control urbanístico (GUPTA y AHMAD, 1999). Al igual que otras ciudades de América Latina (ENRÍQUEZ, 2009), en las últimas décadas el proceso de urbanización de Tampico está favoreciendo

un incremento de las inundaciones y de los procesos de remoción en masa, asociados a una misma intensidad de lluvias extremas. La tendencia al incremento de los desastres por lluvias extremas está determinada por una multiplicidad de factores ambientales y, sobre todo, antrópicos, como la alteración y pérdida de cobertura vegetal de las laderas de las terrazas aluviales, así como los efectos del calentamiento global. Es necesario promover actuaciones a favor del mantenimiento y conservación de la cubierta vegetal y de la dinámica de la topografía (WP-WLI, 1993).

Se constata que la evaluación de la susceptibilidad y amenaza de los procesos de remoción en masa por precipitaciones extremas presenta una enorme complejidad e incertidumbre, ante la falta de información confiable y actualizada para determinar la probabilidad espacio-temporal de ocurrencia, la magnitud y trayectoria de las masas potencialmente deslizadas, así como el territorio y las comunidades expuestas a estos procesos (CHIVITÁ, 2008; ARANGO, 2000). Al punto que es necesario favorecer investigaciones sobre evaluación y zonificación de las remociones en masa por lluvias intensas, a partir de la inclusión de métodos cuantitativos y cualitativos, que permitan tomar decisiones en condiciones de incertidumbre.

La investigación constituye una primera aproximación a los patrones espacio-temporales de las precipitaciones extremas y su influencia sobre los procesos de remoción en masa, que permite favorecer la gestión de los riesgos y la planificación urbana de Tampico y, en general, de las ciudades del Golfo de México. En las últimas décadas los procesos de degradación ambiental por la acción antrópica están acelerando los riesgos naturales de tipo geomorfológico (POLANCO y BEDAYA, 2005), por lo que es prioritaria una ordenación urbanística sostenible y el combate a la permisividad pública en los municipios del área metropolitana, como Tampico.

El siglo XXI debe alumbrar una nueva etapa de verdadero compromiso social, económico, político y científico, para hacer frente a los retos del cambio climático global en regiones en desarrollo, y dar respuestas sostenibles a las necesidades imperiosas y silenciadas de millones de personas que, pueden convertirse a medio plazo en refugiados medioambientales. Existe la urgente necesidad de comprender los nuevos escenarios climáticos, así como los riesgos asociados a eventos extremos, para favorecer una adecuada prevención que contribuya, no sólo a reducir los desastres, sino a combatir la pobreza que desencadenan estos fenómenos naturales en América Latina.

8. BIBLIOGRAFÍA

- ADAME, J. y ESTRADA, P. (2003): Efecto de una doble concentración de bióxido de carbono en la atmósfera sobre la disponibilidad de agua en la cuenca del río Tamesí-Tamesí en el Estado de Tamaulipas, México, *Revista de Climatología*, n.º 3, págs. 27-44.
- ALCÁNTARA AYALA, I. (2000): Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. *Investigaciones Geográficas (mx)*, abril, N.º 41, págs. 7-25.
- ANEAS DE CASTRO, S. (2006): En torno al diagnóstico de los riesgos. *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, Vol. X, N.º 218, 1 de Agosto de 2006. <<http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-218-12.htm>>. [28 de octubre de 2008].

- ARANGO, JD. (2000): *Relaciones lluvias-deslizamientos y zonificación geotécnica en la comunidad dos de la ciudad de Manizales*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- ARISTIZÁBAL, E. y YOKOTA, S. (2006): Geomorfología aplicada a la ocurrencia de deslizamientos en el Valle de Aburra. *Dyna*, julio, Vol. 73, N.º 149, págs. 5-16.
- AYALA CARCEDO, FJ. (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 Asociación de Geógrafos Españoles*, N.º 30, págs. 37-49.
- BEGUERÍA, S. y LORENTE, A. (1999): Distribución espacial del riesgo de precipitaciones extremas en el Pirineo Aragonés Occidental. *Geographicalia*, N. 37, págs. 17-36.
- BRIGNARDELLO, LA. (1997): Proposición metodológica para la evaluación y zonificación integrada de riesgos naturales mediante la aplicación de Sistemas de Información Geográfica. *Revista de Geografía Norte Grande*, N.º 24, págs. 91-102.
- CAPRA, L., HUBP, JL. y HERNÁNDEZ, ND. (2003): Fenómenos de remoción en masa en el poblado de Zapotitlán de Méndez, Puebla: relación entre litología y tipo de movimiento. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 20, N.º 2, págs. 95-106.
- CARDONA, OD (2003): The need for rethinking the concepts of vulnerability and risk form Holistic Perspective: A necessary review and criticism for effective risk management. En: Bankoff, GFG. y Hilhorst, D. (Ed.), *Mapping Vulnerability: Disasters, Development and People*. London: Earthscan.
- CENAPRED (2004): *Guía básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos*. Serie Atlas Nacional de Riesgos. México: Centro Nacional de Prevención de Desastres, Secretaría de Gobernación.
- CHIVITÁ CÁRDENAS, I. (2008): Estimación de la susceptibilidad ante deslizamientos: aplicación de conjuntos difusos y las teorías de la posibilidad y de la evidencia, *Ingeniería e Investigación*, Abril, Vol. 28, N.º 1, págs. 26-40.
- CNA (2008): *Notificaciones oficiales emitidas por el Servicio Meteorológico Nacional*, México: Comisión Nacional del Agua.
- CRUDEN, DM. y VARNES, DJ. (1996): Landslides types and processes. En: Turner, AK. y Schurter, RL. (Ed.), *Landslides: investigation and mitigation*. Transportation Research Board, Special Report 247, Washington, DC.: National Academy Press, págs. 36-75.
- GARCÍA, E. (2003): Distribución de la precipitación en la Republica Mexicana. *Investigaciones Geográficas (mx)*, N.º 50, págs. 67-76.
- GARNICA PEÑA, RJ. y ALCÁNTARA AYALA, I. (2004): Riesgos por inundación asociados a eventos de precipitación extraordinaria en el curso bajo del río Tecolutla, Veracruz, *Investigaciones Geográficas (mx)*, N.º 55, págs. 23-45.
- GUENNI, L., DEGRYZE, E. y ALVARADO, K. (2008): Análisis de la tendencia y la estacionalidad de la precipitación mensual en Venezuela. *Revista Colombiana de Estadística*, Vol. 31, N.º 1, págs. 41-65.
- GUMBEL, EJ. (1941): The return period of flood flows. *Annals of Mathematical Statistics*, Vol. 12, N.º 2, págs. 163-190.
- GUPTA, A. y AHMAD, R. (1999): Geomorphology and the urban tropics: building an interface between research and usage, *Geomorphology*, N.º 31, págs. 133-149.
- HENRÍQUEZ RUIZ, C. (2009): El proceso de urbanización en la cuenca del río Chillán y su capacidad adaptativa ante precipitaciones extremas. *Estudios Geográficos*, Vol. LXX, 266, Enero-junio, págs. 155-179.
- HUDSON, PF. (2004): Geomorphic context of the prehistoric Huastec floodplain environments: lower Pánuco basin, México. *Journal of Archeological Science*, Vol. 31, Issue 6, págs. 653-668.
- IPCC (2007): *Cambio climático 2007. Informe de síntesis*. Ginebra: Intergovernmental Panel on Climate Change.

- INEGI (2005): *II Censo de población y vivienda 2005*. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- JÁUREGUI, E. y ZITÁCUARO, I. (1995): El impacto de los ciclones tropicales del Golfo de México en el Estado de Veracruz. *La Ciencia y el Hombre*, N.º 21, Vol. II, págs. 74-119.
- JIMÉNEZ-HERNÁNDEZ, S. y SÁNCHEZ-GONZÁLEZ, D. (2007): Ordenación urbana litoral y prevención ante desastres de inundación en los municipios de Tamaulipas, México. El Sistema de Alerta Temprana contra Eventos Meteorológicos Extremos (SATEME). *Revista Ciencia-UAT*, N.º 4, págs. 61-66.
- LOBO, D., GABRIELS, D., OVALLES, F., SANTIBAÑEZ, F., MOYANO, M., AGUILERA, R., PIZARRO, R.; SANGÜESA, C. y URRÁ, N. (2006): *Guía metodológica para la elaboración del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas de América Latina y el Caribe*. CAZALAC, Documentos Técnicos, Montevideo: PHI-UNESCO.
- LEKUTHAI, A. y VONGVISESSOMJAI, S. (2001): Intangible flood damage quantification. *Water Engineering and Management*, N.º 15, págs. 343-362.
- MAGAÑA, VO., VÁZQUEZ, JL., PÉREZ, JL. y PÉREZ, JB. (2003): Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional*, año/vol. 42, número 003, págs. 313-330
- MARDONES, M. y VIDAL, C. (2001): La zonificación y evaluación de los riesgos naturales de tipo geomorfológico: un instrumento para la planificación urbana en la ciudad de Concepción. *Eure. Revista Latinoamericana de Estudios Urbanos y Regionales*, Vo. 27, N.º 81, págs. 97-122.
- MATÍAS RAMÍREZ, LG., OROPEZA OROZCO, O., LUGO HUBP, J., CORTEZ VÁZQUEZ, M. y JÁUREGUI OSTOS, E. (2007): Análisis de las principales causas de las inundaciones de Septiembre de 2003 en el sur del estado de Guanajuato, México. *Investigaciones Geográficas (mx)*, N.º 064, págs. 7-25.
- MÁYER SUÁREZ, P. (2002): Desarrollo urbano e inundaciones en la ciudad de las Palmas de Gran Canaria (1869-2000). *Investigaciones Geográficas (esp)*, número 028, págs. 145-159.
- MÉNDEZ GONZÁLEZ, J., NÁVAR CHÍADEZ, JJ. y GONZÁLEZ ONTIVEROS, V. (2008): Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México. *Investigaciones Geográficas (mx)*, N.º 65, págs. 38-55.
- MORA, R., VAHRSON, W. y MORA S. (1992): *Mapa de amenaza de deslizamientos, Valle Central, Costa Rica*. Costa Rica: Centro de Coordinación para la Prevención de Desastres Naturales en América Central.
- MORENO, HA., VÉLEZ, MV., MONTTOYA, JD. y RHENALS, RL. (2006): La lluvia y los deslizamientos de tierra en Antioquia: Análisis de su ocurrencia en las escalas interanual, intraanual y diaria. *Revista EIA*, N.º 5, págs. 59-69.
- OJEDA REVAH, L. y ÁLVAREZ, G. (2000): La reforestación de Tijuana, Baja California como un mecanismo de reducción de riesgos naturales. *Estudios Fronterizos*, México, 2000, Vol. 1, N.º 2, págs. 9-31.
- PEÑA, F., TAVARES, C. y MARDONES, M. (1993): Las condiciones climáticas como factor de riesgo en la comuna de Talcahuano, *Revista de Geografía de Chile Terra Australis*, N.º 38, págs. 83-107.
- PERLES ROSELLÓ, MJ. y MÉRIDA RODRÍGUEZ, M. (2010): Patrón territorial y conformación del riesgo en espacios periurbanos. El caso de la periferia este de la ciudad de Málaga. *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*. [En línea]. Barcelona: Universidad de Barcelona, 10 de Julio de 2010, Vol. XIV, N.º 329. <<http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-329.htm>>. [18 de agosto de 2010].
- POLANCO C. y BEDOYA, G. (2005): Compilación y análisis de los desastres naturales reportados en el departamento de Antioquia exceptuando los municipios del Valle de Aburrá, Colombia, entre 1920-1999. *Ingeniería y Ciencia*, Vol. 1, N.º 1, págs. 45-65.

- RENDÓN, A. y VARGAS, R. (1998): *Sistematización del proceso de evaluación de la amenaza por movimientos en masa en zonas de ladera del municipio de Medellín*. Colombia: Universidad de Antioquia.
- SÁNCHEZ-GONZÁLEZ, D. y BATRES GONZÁLEZ, JJ. (2007): Retos de la planeación turística en la conservación de las lagunas urbanas degradadas de México. El caso de Tampico. *Cuadernos Geográficos*, n.º 41, págs. 241-252.
- SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN. FONDEN (2008): *Recursos autorizados 2007*. México: Fondo de Desastres Nacionales, Sistema Nacional de Protección Civil, Secretaría de Gobernación, 2008.
- SMN-CNA. (2005): *Normales climatológicas de Observatorios Sinópticos 1961-1999*. México: Servicio Meteorológico Nacional, Consejo Nacional del Agua.
- VAN ZUIDAM, RA. (1986): *Aerial Photo-Interpretation in Terrain Analysis and Geomorphology Mapping*. The Hague, Netherlands: Smits Publishers.
- WP-WLI. A. (1993): Suggested method for describing the activity of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, N.º 47, págs. 53-57.

ANEXO

Cuadro 5. Distribución de la población y vivienda expuesta a peligros por procesos de remoción en masa según sector urbano. Municipio de Tampico, México. Año 2008. (Km² y porcentajes)

Sector Urbano	Superficie				Densidad		Población		Vivienda			
	Superficie expuesta según peligro				Densidad (hab./km ²)	Población Total 2005	Población en peligro y alto ^(a)	Total 2005	Viviendas Total 2005	Vivienda en peligro y alto ^(a)		
	Total (km ²)	Muy alto (km ²)	Alto (km ²)	Medio (km ²)							Bajo (km ²)	Total (%)
	(km ²)	(km ²)	(km ²)	(km ²)	(km ²)	(%)	(%)					
Anáhuac	0,80	0,00	0,00	0,10	0,70	11.728,67	9.363	0	0,00	2708	0	0,00
Arboledas	0,89	0,00	0,00	0,00	0,89	5.493,90	4.911	0	0,00	1395	0	0,00
Arenal	2,21	0,00	0,00	0,11	2,10	7.135,81	15.763	0	0,00	4309	0	0,00
Aurora	0,76	0,00	0,00	0,04	0,72	7.932,75	6.063	0	0,00	2009	0	0,00
Del Bosque	2,68	0,00	0,00	0,00	2,68	6.096,37	16.334	0	0,00	4441	0	0,00
Del Pueblo	0,69	0,00	0,00	0,10	0,59	12.864,86	8.815	0	0,00	2586	0	0,00
Enrique Cárdenas	1,20	0,00	0,00	0,00	1,20	6.737,07	8.102	0	0,00	2152	0	0,00
Esfuero Obrero	1,34	0,00	0,00	0,00	1,34	12.069,28	16.133	0	0,00	4090	0	0,00
Fracc. Chairel	2,92	0,00	0,03	0,64	2,25	1.984,65	5.794	59	1,02	1580	16	1,01
Insurgentes	1,37	0,00	0,05	0,10	1,22	12.116,18	16.644	505	3,03	4520	137	3,03
Isleta Pérez	1,60	0,00	0,00	0,00	1,60	6.016,14	9.615	0	0,00	2797	0	0,00
Lauro Aguirre	0,47	0,00	0,00	0,00	0,47	6.791,61	3.207	0	0,00	957	0	0,00
Lomas de Chairel	1,10	0,00	0,02	0,05	1,03	4.750,57	5.247	95	1,81	1461	26	1,78
López Portillo	0,94	0,00	0,00	0,00	0,94	7.240,17	6.834	0	0,00	1763	0	0,00
Los Pinos	0,92	0,00	0,02	0,03	0,87	5.490,94	5.033	109	2,17	1447	32	2,21
Luis Donaldo Colosio	0,97	0,00	0,00	0,00	0,97	3.982,40	3.847	0	0,00	979	0	0,00
Luis Echevarría	1,36	0,00	0,01	0,22	1,14	18.760,47	25.533	112	0,44	6836	30	0,44
Mano con Mano	6,38	0,00	0,00	0,00	6,38	224,29	1.431	0	0,00	310	0	0,00
Morelos	1,13	0,00	0,00	0,00	1,13	11.500,71	13.028	0	0,00	3451	0	0,00
Nacional	0,86	0,04	0,06	0,10	0,66	11.905,54	10.234	1.190	11,63	3014	350	11,61
Niños Héroes	2,68	0,00	0,00	0,00	2,68	7.570,07	20.256	0	0,00	5314	0	0,00
Nuevo Amanecer	0,91	0,00	0,00	0,08	0,83	5.426,15	4.934	0	0,00	1346	0	0,00

Cuadro 5. Distribución de la población y vivienda expuesta a peligros por procesos de remoción en masa según sector urbano. Municipio de Tampico, México. Año 2008. (Km² y porcentajes)

Sector Urbano	Superficie					Densidad		Población			Vivienda		
	Superficie expuesta según peligro					Densidad (hab./km ²)	Población Total 2005	Población en peligro y alto ^(a)	Población en peligro y alto ^(a) (%)	Total 2005	Viviendas en peligro y alto ^(a)	Total	Vivienda en peligro y alto ^(a) (%)
	Total (km ²)	Muy alto (km ²)	Alto (km ²)	Medio (km ²)	Bajo (km ²)								
	(km ²)	(km ²)	(km ²)	(km ²)	(km ²)	(hab./km ²)	2005	y alto ^(a)	(%)	2005		Total	(%)
Obrera	1,10	0,09	0,02	0,11	0,88	10,277,63	11,291	1,129	10,00	3,164	317	10,02	
Pescadores	1,43	0,11	0,01	0,22	1,09	3,541,07	5,074	526	10,37	1,466	151	10,30	
Petrolera	0,77	0,00	0,00	0,06	0,71	4,770,70	3,693	0	0,00	1,065	0	0,00	
Sol Voluntad Trabajo	1,35	0,00	0,00	0,00	1,35	10,457,14	14,114	0	0,00	3,479	0	0,00	
Tamaulipas	1,42	0,00	0,00	0,00	1,42	11,988,42	16,972	0	0,00	4,981	0	0,00	
Tancol	2,00	0,00	0,07	0,24	1,69	5,062,07	10,113	354	3,50	2,755	96	3,48	
Universidad	3,23	0,00	0,00	0,15	3,08	2,788,86	9,015	0	0,00	2,385	0	0,00	
Vicente Guerrero	0,64	0,00	0,00	0,00	0,64	9,869,72	6,288	0	0,00	1,521	0	0,00	
Zona Centro	1,42	0,00	0,00	0,09	1,33	7,105,02	10,087	0	0,00	3,229	0	0,00	
Aeropuerto	4,03	0,00	0,00	0,00	4,03	0,50	2	0	0,00	1	0	0,00	
Laguna de El Carpintero	2,00	0,00	0,00	0,00	2,00	77,15	154	0	0,00	8	0	0,00	
Total Municipio Tampico	53,56	0,24	0,29	2,44	50,60	5,673,99	303,924	4,079	1,34	83,519	1,155	1,38	

(a) Estimación en base al promedio de ocupantes en viviendas particulares habitadas por sector. Fuente: INEGI (2005): Censo de Población y Vivienda 2005. Cálculos y elaboración propia.