



Zoning the susceptibility to landslides associated with natural phenomena in the Bahía de Banderas region

Zonificación de la susceptibilidad ante el deslizamiento de laderas en la región de Bahía de Banderas asociados a fenómenos naturales

Rivera García, J. E.¹, Cruz Romero, B.², Morales Hernández, J. C.^{3*}

¹Tecnológico Nacional de México, Campus Bahía de Banderas. Laboratorio de Ecología, Paisaje y Sociedad. Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de la Costa.

²Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de la Costa, Cuerpo Académico: UDG-CA-1014. Red Delfin "Cambio Climático y Gestión del Riesgo"; Red Mexicana de Cuencas Hidrográficas. Laboratorio de Ecología, Paisaje y Sociedad.

³Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de la Costa, Cuerpo Académico: UDG-CA-303. Red Delfin "Cambio Climático y Gestión del Riesgo"; Redesclim "Red de Desastres Climáticos".

Cite this paper/Como citar este artículo: Rivera García, J. E., Cruz Romero, B., Morales Hernández, J. C. (2020). Zoning the susceptibility to landslides associated with natural phenomena in the Bahía de Banderas region. *Revista Bio Ciencias* 7, e892. doi: https://doi.org/10.15741/revbio.07_e892



ABSTRACT

The instability of hillsides is one of the most destructive geological phenomena that impact humanity. Mexico has a natural susceptibility to hillside landslides in more than two thirds of its territory, since it is made up of mountainous lands; despite this, the information regarding threat, susceptibility, danger and vulnerability is scarce and heterogeneous. With the aim of generating strategies for climate change mitigation through tools for land use and planning, the Bahía de Banderas region in Mexico was zoned for hillside landslides. The methodology applied by the *Indian Standard* was used, which considers an empirical approach for individual and collective repercussions; of the variables weighted according to their factors to determine areas with "high"

Article Info/Información del artículo

Received/Recibido: December 03rd 2019.

Accepted/Aceptado: April 25th 2020.

Available on line/Publicado: April 27th 2020.

*Corresponding Author:

Morales Hernández, Julio Cesar. Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de la Costa, Cuerpo Académico: UDG-CA-1014. Red Delfin "Cambio Climático y Gestión del Riesgo"; Red Mexicana de Cuencas Hidrográficas. Laboratorio de Ecología, Paisaje y Sociedad. E-mail: cesarbemarena@gmail.com

RESUMEN

La inestabilidad de laderas es uno de los fenómenos geológicos más destructivos que impactan a la humanidad, la República Mexicana cuenta con susceptibilidad natural ante deslizamientos de laderas en más de dos terceras partes de su territorio; ya que está conformado por terrenos montañosos, a pesar de ello, la información referente a amenaza, susceptibilidad, peligro y vulnerabilidad es escasa y heterogénea. Con el objetivo de generar estrategias para la mitigación del cambio climático a través de herramientas para la ordenación y planificación del territorio, se estableció la zonificación del deslizamiento de laderas en la región de Bahía de Banderas, México. Se utilizó la metodología empleada por el *Indian Standard*, que considera un enfoque empírico de las repercusiones individuales y colectivas; de las variables y sus factores de ponderación para determinar zonas con susceptibilidad "alta" a la ocurrencia de este fenómeno. Dichos factores se clasificaron como inherentes e incluyeron la pendiente y morfometría, consideradas como condiciones reales de la región analizada; así como también factores

susceptibility to the occurrence of this phenomenon. Such factors were classified as inherent and included slope and morphometry, considered as real conditions of the region analyzed; as well as external factors, related to extraordinary precipitation processes that are related to meteorological events and natural phenomena. As a result, 4.73 % of the area, equivalent to 70,121 ha, is highly susceptible to landslides in the region. This scenario puts 227 rural communities and 35 urban localities at risk, so it is necessary to generate information that allows decision makers to correctly manage the territory, guaranteeing public safety and a sustainable future.

KEY WORDS

Hillside Instability, Geological Phenomena, Susceptibility, Land Management.

Introduction

The instability of hillsides includes movements of soil, rocks, rubbles or their combination, descending downhill as rock falls, landslides and flows (CENAPRED, 2002), which break and disaggregate as they descend; reaching variable dimensions and velocities during its evolution, and depending on the deterioration state of the materials making the hillside up (Suárez, 1998).

A hillside is defined as a surface of land presenting a slope and its conformation is natural, it is said to be unstable when it weakens or loses balance as a result of the influence of triggering factors (CENAPRED, 2001), such as the presence of intense rainfalls and the influence of seismic (Anbalagan *et al.*, 2008) and volcanic (Hinojosa-Corona *et al.*, 2009) activities.

Hillsides instability is considered as the second geological phenomenon that provokes the greatest amount of human and material losses worldwide (Suárez, 1998), being developing countries and low-income populations living in mountainous systems the most affected (Highland & Bobrowsky, 2008), however, the literature reflects that when identified beforehand, difficulties could be avoided, if pertinent control and prevention measures are applied, reducing its occurrence up to 90 % (Suárez, 1998).

externos, relacionados con los procesos extraordinarios de precipitación que tienen relación con eventos meteorológicos y fenómenos naturales. Dando como resultado que el 4.73 % del área, equivalente a 70,121 ha, que presentan susceptibilidad alta a los deslizamientos en la región. Escenario que pone en riesgo a 227 comunidades rurales y 35 localidades urbanas, por lo que es necesaria la generación de información que permita a los responsables, tomar decisiones correctas en cuestiones de gestión del territorio, garantizando la seguridad pública y un futuro sustentable.

PALABRAS CLAVE

Inestabilidad de Laderas, Fenómenos Geológicos, Susceptibilidad, Gestión del Territorio.

Introducción

La inestabilidad de laderas comprende el movimiento de suelo, rocas, escombros, o un conjunto de estos, descendiendo ladera abajo en forma de caídos, deslizamientos y flujos (CENAPRED, 2002), mismos que se rompen y disgregan a medida que descienden; alcanzando dimensiones y velocidades variables durante su evolución, mismos que dependerán del estado de deterioro en materiales que conforman una ladera (Suárez, 1998).

Una ladera, se define como una superficie de terreno que presenta una inclinación y su conformación es natural, se dice que es inestable cuando esta se debilita o pierde su equilibrio a consecuencia de la influencia de los factores desencadenantes (CENAPRED, 2001), tales como la presencia de lluvias intensas y la influencia de la actividad sísmica (Anbalagan *et al.*, 2008) y volcánica (Hinojosa-Corona *et al.*, 2009).

La inestabilidad de laderas, es considerada como el segundo fenómeno geológico que mayor cantidad de pérdidas humanas y materiales provoca a lo largo del mundo (Suárez, 1998), siendo los países en vías de desarrollo y las poblaciones de escasos recursos que habitan los sistemas montañosos de los sectores más afectados (Highland & Bobrowsky, 2008), sin embargo, la literatura refleja, que de ser identificada con anterioridad, la problemática podría evitarse, si se aplican las medidas de control y prevención pertinentes, reduciendo su ocurrencia hasta en un 90 % (Suárez, 1998).

Los factores que influyen en la pérdida de la estabilidad, pueden clasificarse en factores inherentes o

Factors influencing instability loss can be classified into inherent or conditioning factors, which are directly related to morphometric and landscape characteristics typical of the region, such as lithology, geology, topography and land use. These factors are not modified over time, contrary to external or triggering factors, which vary in occurrence, intensity and duration (Anbalagan *et al.*, 2008).

According to the literature, all the mountainous systems can present some kind of instability, however, tropical mountainous systems present a higher susceptibility to difficulties related to hillsides instability and related phenomena, since four of the main elements are met in these regions for its occurrence, such as: topography, seismicity, presence of rainfalls and weathering (Suárez, 1998). Studies on the susceptibility to hillsides instability present high uncertainty indexes since the phenomenon encompasses a great variety of movements, velocities, failure modes, materials, geological restrictions and more variables that foster erroneous decision making, resulting in extraordinary operational costs and an imminent threat for human health (Suárez, 1998).

With the purpose of reducing the degree of uncertainty in the susceptibility analysis, the literature recommends classifying it into five categories according to its level of threat, into the following categories: very low, low, moderated, high and very high susceptibility (Suárez, 1998).

Non-susceptible or very low susceptibility zones encompass those regions where there is no natural propensity of occurrence of instability despite the presence of geologic failures or triggering activities (Cruden & Varnes, 1996), since they are located in low-lying areas and do not present high weathering indexes, as well as significant discontinuity (Suárez, 1998).

On the other hand, low susceptibility zones encompass those regions where there is the probability of occurrence of instability-related phenomena under the presence of strong modifications in their triggering factors (Cruden & Varnes, 1996), due to the presence of crevices and to soil erosion (Suárez, 1998).

Moderated susceptibility zones encompass those zones where lands have a natural propensity to present phenomena with significant magnitude related to hillsides instability even when there are no significant

condicionantes, los cuales se relacionan directamente con las características morfométricas y paisajísticas propias de la región, tales como la litología, geología, la topografía y uso de suelos, estos no se modifican a través del tiempo, a diferencia de los factores externos o desencadenantes, quienes varían en ocurrencia, intensidad y duración (Anbalagan *et al.*, 2008).

De acuerdo con la literatura, todos los sistemas montañosos pueden presentar algún tipo de inestabilidad, sin embargo, son los sistemas montañosos tropicales que presentan mayor susceptibilidad a sufrir problemáticas relacionadas a la inestabilidad de laderas y fenómenos asociados, puesto que en estas regiones se reúnen cuatro de los elementos principales para su ocurrencia, como son: la topografía, la sismicidad, la presencia de lluvias y la meteorización (Suárez, 1998).

Los estudios de susceptibilidad ante inestabilidad de laderas, presentan altos índices de incertidumbre debido a que el fenómeno engloba una gran variedad de movimientos, velocidades, modos de falla, materiales, restricciones geológicas y además variables, hecho que propicia la toma de decisiones erróneas, significando costos operacionales extraordinarios y una amenaza inminente para la salud humana (Suárez, 1998).

Con la finalidad de reducir el grado de incertidumbre en el análisis de la susceptibilidad, la literatura recomienda su clasificación bajo cinco categorías según su grado de amenaza en las siguientes categorías: Susceptibilidad muy baja, baja, moderada, alta y muy alta (Suárez, 1998).

Las zonas no susceptibles o de susceptibilidad muy baja, comprenden aquellas regiones donde no existe propensión natural de ocurrencia ante inestabilidad a pesar de la presencia de fallas o actividad detonante (Cruden & Varnes, 1996), debido a que estas se localizan en terrenos bajos y no presentan altos índices de meteorización, así como discontinuidades significativas (Suárez, 1998).

Por otro lado, las zonas de susceptibilidad baja, comprende aquellas regiones donde bajo la presencia de fuertes modificaciones en sus factores detonantes, existe la probabilidad de que ocurran fenómenos asociados a la inestabilidad (Cruden & Varnes, 1996), debido a la presencia de fisuras y el desgaste de los suelos (Suárez, 1998).

Las zonas de susceptibilidad moderada, comprenden a aquellas zonas, donde los terrenos presentan propensión

modifications in their parameters (Cruden & Varnes, 1996), due to the presence of intense erosion and the possible reactivation or incidence of new geological faults (Suárez, 1998).

For those zones comprised into the high susceptibility category, any parametric modification in triggering factors foster the occurrence of a considerable number of movements with significant magnitudes (Cruden & Varnes, 1996), since the land presents a natural propensity to instability, as a result of the high incidence of erosion and weathering, as well as a possible reactivation of movements, the presence of discontinuity and the possibility of occurrence of new movements (Suárez, 1998). For those zones classified into very high susceptibility of landslide, soil masses are highly degraded and saturated of unfavorable discontinuities (Suárez, 1998), where any change in magnitude or intensity of triggering factors results in the occurrence of a great amount of movements, due to the natural propensity presented by the land (Cruden & Varnes, 1996).

According to the National Risk Atlas and to the Mexican Geological Survey, the study area is in a convergence zone between the Sierra Madre Oriental, the Neovolcanic axis and the Sierra Madre del Sur, in addition to be influenced by the *Circumpacific* belt, one of the zones with the highest seismic and volcanic activity in the world, and that is extended all over the eastern Pacific from Alaska costs to Argentine, going across the study area (Mexican Geological Survey, 2007).

Despite the above mentioned and although Mexico has a high susceptibility to phenomena associated with hillsides instability, since two thirds of its total extension is made up by mountainous systems of high complexity (SEDATU, 2014) and that the national territory is devastated by a high number of tropical storms and cyclones year after year (CENAPRED, 2002), most of the information related to threats, danger, vulnerability and risks in the country is scarce and heterogeneous, lacking of unified criteria allowing its compatibility and consistency (SEDATU, 2014).

Therefore, the application of the mathematical model under a SIG approach proposed by Anbalagan *et al.* (2008) was suggested, since it is used as a standardized

natural a presentar fenómenos de magnitud significativa relacionados con la inestabilidad de laderas aun cuando no existan modificaciones significativas en sus parámetros (Cruden & Varnes, 1996), debido a la presencia de erosión intensa y la posible reactivación o aparición de nuevas fallas (Suárez, 1998).

Para aquellos territorios comprendidos bajo la categoría de susceptibilidad alta, cualquier modificación paramétrica en los factores detonantes, propicia la ocurrencia de un número considerable de movimientos de magnitudes significativas (Cruden & Varnes, 1996), debido a que el terreno presenta una propensión natural a la inestabilidad, a consecuencia de la alta incidencia de la erosión y la meteorización, así como la posible reactivación de movimientos, la presencia de discontinuidades desfavorables y la posibilidad de ocurrencia de nuevos movimientos (Suárez, 1998). Para aquellas zonas que se clasifican con susceptibilidad muy alta, las masas de suelo se encuentran altamente meteorizadas y saturadas de discontinuidades desfavorables (Suárez, 1998), donde cualquier cambio en la magnitud o intensidad de los factores detonantes incurrirá en la ocurrencia de un gran número de movimientos, debido a la propensión natural que presenta el territorio (Cruden & Varnes, 1996).

De acuerdo con el Atlas Nacional de Riesgos y al Servicio Geológico Mexicano, el área de estudio se encuentra en una zona de convergencia entre la Sierra Madre Oriental, el eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur, además de estar influenciada por el cinturón *Circumpacifico* una de las zonas con mayor actividad sísmica y volcánica del mundo, mismo que se extiende por todo el pacífico oriental desde las costas de Alaska hasta Argentina, cruzando el área de estudio (Mexican Geological Survey, 2007).

A pesar de lo anterior y de que México posee una alta susceptibilidad a presentar fenómenos asociados a la inestabilidad de laderas, debido a que dos terceras partes de su extensión total está conformada por sistemas montañosos de gran complejidad (SEDATU, 2014) y de que año con año, el territorio nacional es azotado por un gran número de tormentas y ciclones tropicales (CENAPRED, 2002), la mayoría de la información referente a amenazas, peligro, vulnerabilidad y riesgos en el país, es escasa y heterogénea, carente de criterios unificados que permitan su compatibilidad y consistencia (SEDATU, 2014).

Por lo anterior, se propone la aplicación del modelo matemático aplicado bajo un entorno de SIG, propuesto

method for urban planning in mountainous lands of the Himalayas, India. This model proposes a series of relative attributes for each one of the inherent and triggering factors impacting on the stability, analyzing individual and collective effects under an empiric approach, with the purpose of preventing risks related to hillsides instability, by generating information of quality that allows for decision making and the application of monitoring and accident prevention systems.

Material and Methods

Study area

The study area is located in the eastern Pacific in the geographical area known as Banderas Bay, made up by more than 40 hydrographic regions, distributed along 40 municipalities in the states of Jalisco, Nayarit and Zacatecas. The bay has a central valley surrounded by a mountainous system, mainly influenced by the flow of Ameca river, which has the most extensive and complex basin of the study area, with an area of more than 1 million of hectares. Thanks to its complexity, its geographical position and the diversity of touristic and recreational options offered by the region, a high popularity has been gained during the last decades both at national and international levels, ranking it as the second more important touristic site in Mexico (CEDESTUR-CEEB-AEBB, 2001).

The above mentioned has increased the demand and price of the territory, due to the stress induced by agricultural expansion and urban and touristic location, as a result of the development, increasing the susceptibility of the territory to phenomena associated with hillsides instability and fostering its degradation, reducing the resilience of the environment and affecting the development of human beings.

Zoning

Zoning the susceptibility to hillsides instability was performed by using the model proposed by Anbalagan *et al.* (2008), which is currently used as a normative method for managing the territory and urban location in mountainous regions of the Great Himalayas, India, by the *Indian Standard* showing a high efficiency and quality in its results.

por Anbalagan *et al.* (2008), mismo que es usado como método estandarizado para la planeación urbana en terrenos montañosos de la cordillera del Himalaya, India, el cual propone un serie de atributos relativos para cada uno de los factores inherentes y desencadenantes que inciden en la estabilidad, analizando los efectos individuales y colectivos bajo un enfoque empírico, con la finalidad de prevenir riesgos asociados a la inestabilidad de laderas al generar información de calidad que permita la toma de decisiones y la aplicación de sistemas de monitoreo y prevención de accidentes.

Material y Métodos

Zona de estudio

El área de estudio está ubicada en el pacífico oriental en el área geográfica conocida como Bahía de Banderas, conformada por más de 40 regiones hidrográficas, distribuidas a lo largo de 40 municipios en los estados de Jalisco, Nayarit y Zacatecas. La bahía cuenta con un valle central rodeado de un sistema montañoso, influenciado principalmente por el caudal del río Ameca, cuenta con la cuenca de mayor extensión y complejidad del área de estudio, con un área de más de 1 millón de hectáreas. Gracias a su complejidad, su posición geográfica y la diversidad de opciones turísticas y recreativas que ofrece la región, en las últimas décadas ha ganado gran popularidad tanto a nivel nacional como internacional, posicionándola como el segundo sitio turístico más importante de México (CEDESTUR-CEEB-AEBB, 2001).

Lo anterior ha incrementado la demanda y coste del territorio, debido al estrés inducido por la expansión agrícola y el emplazamiento urbano y turístico, consecuencia del desarrollo, incrementando la susceptibilidad del territorio a presentar fenómenos asociados a la inestabilidad de laderas y promoviendo su degradación, reduciendo la capacidad de resiliencia del medio ambiente y afectando el desarrollo del ser humano.

Zonificación

La zonificación de la susceptibilidad ante inestabilidad de laderas se llevó a cabo por medio del uso del modelo propuesto por Anbalagan *et al.* (2008), el cual es utilizado en la actualidad como método normativo para la gestión del territorio y el emplazamiento urbano en regiones montañosas de la cordillera de Los Himalaya, India, por el *Indian Standard* mostrando gran eficiencia y calidad en sus resultados.

El método propone el análisis individual y colectivo de los factores que inciden en la estabilidad, clasificando y otorgando atributos relativos para cada uno de estos;

The method proposes the individual and collective analysis of factors influencing on the stability, classifying and giving relative attributes for each one of them; these factors are classified into inherent, comprising lithology, morphometry and slope structure, relative relief, soil use and hydrological conditions and triggering factors, such as the seismic influence, the presence of rainfalls and the erosive state of the rock.

To this end, a series of digital cartographic data were used, which were classified according to the author, a process which is summarized in Figure 1.

The erosive degree of the rock was calculated by means of the development of five thematic maps, three representing the lithology and two representing the erosive state of the rock; for this, the lithological map

dichos factores se clasifican en inherentes que comprenden a la litología, la morfometría y estructura de la pendiente, el relieve relativo, el uso de suelos y las condiciones hidrológicas y los factores desencadenantes, tales como la influencia sísmica, la presencia de lluvias y el estado erosivo de la roca.

Para ello se utilizó una serie de datos cartográficos digitales, mismos que fueron clasificados de acuerdo con el autor, procedimiento que se resume en la Figura 1.

El grado erosivo de la roca se calculó a través de la elaboración de cinco mapas temáticos, tres representando a la litología y dos al estado erosivo de la roca; para ello, se utilizó la carta litológica propuesta por Marín & Torres (1990), misma que se clasificó en tres categorías, según los

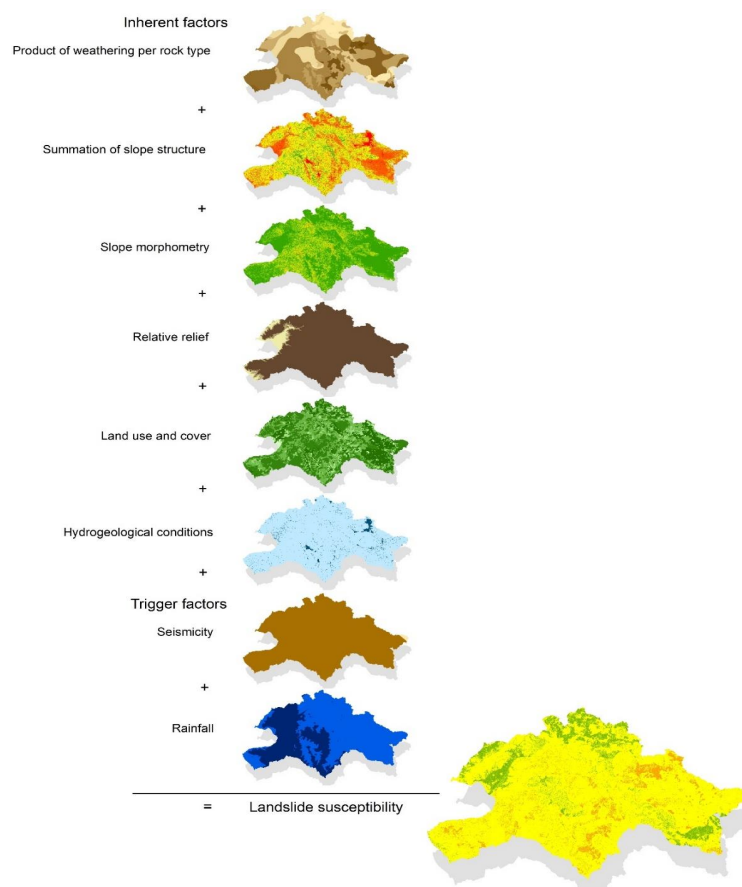


Figure 1. Summary of the procedure applied for the mathematical calculation of susceptibility to hillside instability under a SIG approach.

Figura 1. Resumen del procedimiento aplicado para el cálculo matemático de susceptibilidad ante inestabilidad de laderas bajo un entorno SIG.

proposed by Marín & Torres (1990) was used, which was classified into three categories, according to the relative attributes proposed by the author; resulting in three distinct thematic maps for each type of rock.

On the other hand, in order to determine the erosive degree of the rock, the Climatic Aggressiveness Index (CAI) was used, which expresses the propensity of the territory to erode according to rainfall volume (Lobo *et al.*, 2010) and to the soil degradation map of the Mexican Republic proposed by SEMARNAT (2004). To this end, the CAI was classified according to Lobo *et al.* (2010), for posteriorly complementing the product with polygons registering a high hydric erosion in the map proposed by SEMARNAT (2004), reclassifying it according to relative attributes proposed by Anbalagan *et al.* (2008), and resulting in two thematic maps belonging to types of rocks 1 and 2, which were multiplied by its corresponding lithological map and added to the map of type of soil 3, as shown by the author.

For the case of the sum of relations between the slope and its structure, Digital Elevation Models (DEM) were used, obtained by INEGI (s.f.), which were processed under a SIG approach, with the purpose of obtaining three thematic maps reflecting the slope structure, which were added with the purpose of obtaining a unique map.

The morphometric map of the slope and relative relief were also obtained by processing MDE and by the classification proposed by Anbalagan *et al.* (2008), as well as the Topographic Wetness Index (TWI) map, with which a map of hydrological conditions was made and complemented with a 10 m buffer for the main rivers of the study area.

For the cartography of soil and vegetation use, the map proposed by INEGI (2017) was used, which was classified according to the author and complemented with the map of urban and rural area (INEGI, 2010) and a 10 m buffer for communication pathways (INEGI, 2010) and geologic failures and fractures (INEGI, 2012) of the region, obtained through CONABIO (s.f.) and INEGI (s.f.).

Finally, for the maps corresponding to triggering factors, maps proposed by UAEM (s.f.) and SEGOB (s.f.) were used, which were classified according to Anbalagan *et al.* (2008). After that, all inputs were added as shown in Figure 1.

atributos relativos propuestos por el autor; resultando en tres mapas temáticos distintos para cada tipo de roca.

Por otro lado, para determinar el grado erosivo de la roca, se hizo uso del Índice de Agresividad Climático (CAI), el cual expresa la propensión del territorio a erosionarse según el volumen de lluvia que precipita (Lobo *et al.*, 2010) y la carta de degradación de suelos de la República Mexicana propuesta por SEMARNAT, (2004). Para ello, se clasificó el (CAI) según Lobo *et al.* (2010), para posteriormente, complementar el producto, con los polígonos que registran erosión hídrica alta en la carta propuesta por SEMARNAT (2004) reclasificando según los atributos relativos propuestos por Anbalagan *et al.* (2008), resultando en dos cartas temáticas pertenecientes al tipo de rocas 1 y 2, mismos que fueron multiplicados por su carta litológica correspondiente y sumados con la carta de tipo de suelo tres, tal y como lo muestra el autor.

Para el caso de la sumatoria de las relaciones entre la pendiente y su estructura, se hizo uso de los Modelos de Elevación Digitales (DEM) obtenidos a través de INEGI (s.f.), mismos que fueron procesados bajo un ambiente SIG, con la finalidad de obtener tres mapas temáticos que reflejen la estructura de la pendiente, mismos que fueron sumados con la finalidad de obtener un mapa único.

El mapa de morfometría de la pendiente y el relieve relativo, también fueron obtenidos a través del procesamiento de los (DEM) y la clasificación propuesta por Anbalagan *et al.* (2008), al igual que el mapa de Índice Topográfico de Humedad (TWI) con el cual se elaboró el mapa de condiciones hidrológicas y se complementó con un buffer de 10 m para los principales ríos del área de estudio.

Por último, para la cartografía de uso de suelos y vegetación se utilizó la carta propuesta por INEGI (2017), misma que fue clasificada de acuerdo al autor y complementada con la carta de mancha urbana y rural (INEGI, 2010) y un buffer de 10 m para las vías de comunicación (INEGI, 2010) y fallas y fracturas (INEGI, 2012) de la región, obtenidas a través de CONABIO (s.f.) e INEGI (s.f.).

Por último, para las cartas correspondientes a los factores desencadenantes, se utilizaron las cartas propuestas por la UAEM (s.f.) y la SEGOB (s.f.), mismos que fueron clasificados según Anbalagan *et al.* (2008). Posteriormente, todos los insumos fueron sumados tal y como se muestra en la Figura 1.

Results and Discussion

Results of the model showed that the study area presents susceptibility levels ranking from low to high, being the moderated susceptibility the most representative extension of all categories, with more than 1 million of hectares in extension, the equivalent to 80 % of the total extension, followed by the low and high susceptibility, with 13.3 % and 6.5 %, respectively (Table 1).

According to Hernández & Ramírez (2016), when an instability phenomenon occurs in a zone categorized as a moderate susceptibility zone, homes with solid structural foundations are expected not to suffer from significant alterations, however, the damage could worsen for those homes with low quality structural foundations. In addition, significant damages in public

Resultados y Discusión

Los resultados del modelo muestran que el área de estudio presenta niveles de susceptibilidad que van de bajo a alto, siendo la susceptibilidad moderada la extensión más representativa de todas con más de 1 millón de hectáreas en extensión, el equivalente al 80 % de la extensión total, seguido de la susceptibilidad baja y alta con una susceptibilidad del 13.3 % y 6.5 % respectivamente (Tabla 1).

De acuerdo con Hernández & Ramírez (2016), ante un fenómeno de inestabilidad ocurrido en una zona categorizada con susceptibilidad moderada, se espera que las viviendas con cimientos estructurales sólidos, no sufran alteraciones significativas, sin embargo, el daño podría agravarse para aquellas viviendas con cimientos de baja calidad estructural. Además de ello, se esperan daños significativos en infraestructura pública y vías de comunicación que podrían comprometer el movimiento y el acceso a bienes y servicios.

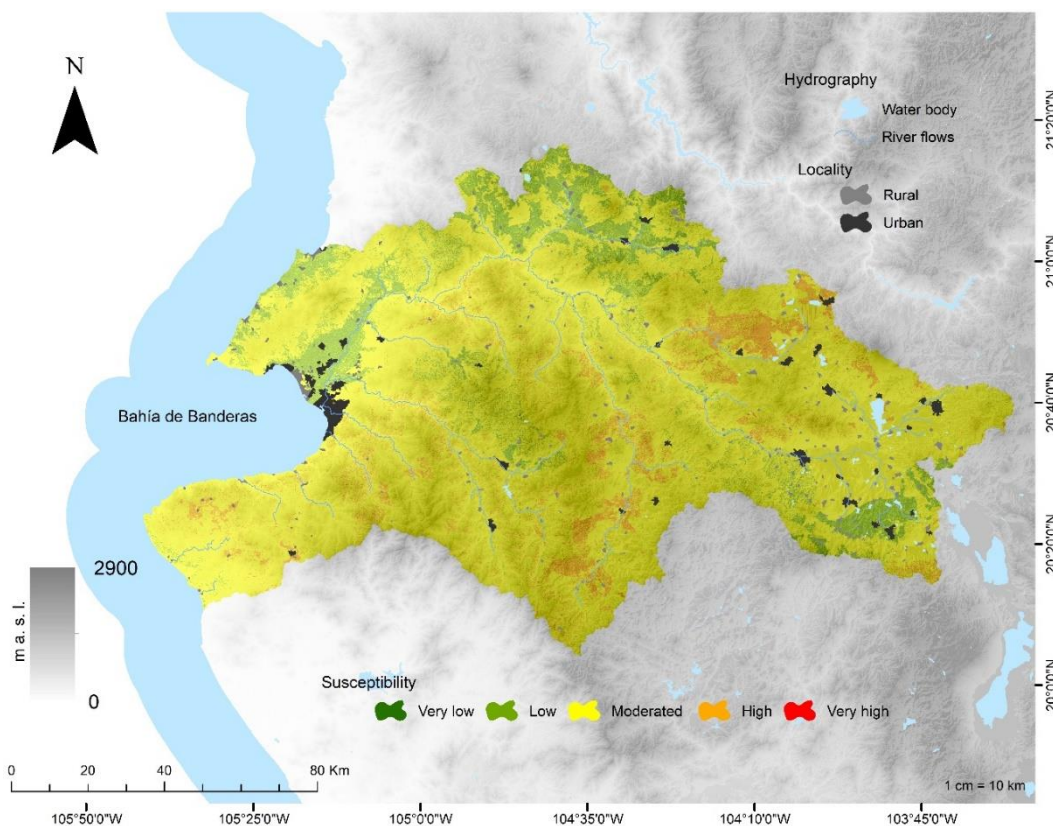


Figure 2. Zoning the susceptibility of hillside landslides in the basins of Bahía de Banderas.

Figura 2. Zonificación de susceptibilidad ante inestabilidad de laderas, en las cuencas que integran la Bahía de Banderas.

Table 1.
Percentage and extension in hectares for each category of susceptibility.

Tabla 1.
Porcentaje y extensión expresado en hectáreas,
para cada una de las categorías de susceptibilidad.

Susceptibility	Area (ha)	Percentage (%)
Very low	27.62	0.0 %
Low	204,929.40	13.3 %
Moderated	1,238,080.50	80.2 %
High	100,475.45	6.5 %
Very high	1.08	0.0%
	1,543,514.04	

infrastructure and communication pathways are expected, which could endanger the movement and the access to goods and services.

On the other hand, by facing a catastrophic event in zones classified with a high susceptibility, visible damaging effects are expected in structural foundations, such as cracks in the walls or breaks in walls and columns, which seriously endanger the structural integrity. Besides, severe damages are expected in communication pathways and public infrastructure (Hernández & Ramírez, 2016).

The study area presents 6.5 % of high susceptibility to hillsides instability, being equivalent to more than 100 thousand hectares in extension, indicating an imminent risk for the infrastructure and urban populations living in the zone (Figure 2).

The literature reflects that those regions with moderated susceptibility are considered as relatively safe zones for urban expansion, however these regions can present some unstable zones, and therefore highly detailed monitoring is recommended (Anbalagan *et al.*, 2008).

Suárez (1998) assures that hillsides that remained stable for a long time can suddenly fail due to changes in topography and in wetness regimes, to seismic and volcanic influence, to changes in soil resistance. Therefore, it is recommended to strictly avoid urban location and modifications in the surroundings of zones categorized as high and very high, due the increase in the probability of occurrence of instability-related phenomena (Anbalagan *et al.*, 2008).

Por otro lado, ante un evento catastrófico en zonas clasificadas con susceptibilidad alta, se esperan efectos de deterioro visibles en los cimientos estructurales, tales como fisuras o roturas en muros y columnas, mismos que comprometen seriamente la integridad estructural. Además de ello, se esperan graves daños en vías de comunicación e infraestructura pública (Hernández & Ramírez, 2016).

El área estudiada, presenta un 6.5 % de susceptibilidad alta ante inestabilidad de laderas, el equivalente a más de 100,000 hectáreas en extensión, significando un riesgo inminente para la infraestructura y las poblaciones urbanas y rurales que ya se encuentran viviendo en la zona (Figura 2).

La literatura refleja, que aquellas regiones consideradas con susceptibilidad moderada son consideradas como zonas relativamente seguras para la expansión urbana, sin embargo, estas regiones pueden presentar algunas zonas inestables, por lo que se recomienda su monitoreo a mayor detalle (Anbalagan *et al.*, 2008).

Suárez (1998) asegura que las laderas que han permanecido estables por mucho tiempo pueden fallar de manera repentina debido a cambios topográficos y en los regímenes de humedad, la influencia sísmica y volcánica, cambios en la resistencia del suelo y el anotropismo. Por lo anterior, se recomienda evitar a toda costa el emplazamiento urbano y las modificaciones en el entorno de las zonas ubicadas en las categorías altas y muy altas, debido al aumento en la probabilidad de ocurrencia de fenómenos asociados a la inestabilidad (Anbalagan *et al.*, 2008).

Conclusions

Urban and rural communities of the study area present trends of accelerated population growth, thanks to job requirements needed by the touristic sector developed on the coasts, which in turn demand a high quantity of land and primary resource for its development.

For many years, trends of generation of goods and services in Mexico have generated a degradation of the resources that make them possible, fostering their damage; being soils one of the most affected resources.

Currently, the region already presents hillsides instability in the form of falls and slight flows, phenomena that could get worse as the damage develops and worsen deforestation, therefore the application of measures of monitoring, control and prevention of instability will be necessary, with the purpose of reducing the uncertainty in its occurrence.

The procedure proposed by Anbalagan *et al.* (2008) has proven to be highly efficient when determining areas susceptible to present hillside landslides-related events in different categories, however, the authors propose more detailed studies for high and very high susceptibility zones, with the purpose of reducing the uncertainty of the event and thus proposing control and prevention plans of the phenomenon.

References

- Anbalagan R., Chakraborty, D. and Kohli, A. (2008) Cartografía de la zona de peligro de los lados del mar (LHZ) en mesoescala para la planificación urbana sistemática en terreno montañoso. Investigación científica e industrial, 486-497.
- CEDESTUR-CEEB-AEBB (Cambio de cobertura vegetal en la región de Bahía de Banderas, México) (2001). Bahía de Banderas a futuro: 2000-2005. Puerto Vallarta, Jalisco. Centro de Estudios Estratégicos para el Desarrollo Turístico Sostenible. Asociación de Empresarios de Bahía de Banderas.
- CENAPRED (El Centro Nacional de Prevención de Desastres) (2001). Cartilla diagnóstico preliminar de inestabilidad de laderas. Ciudad de México, México. Centro Nacional de Prevención de Accidentes.
- CENAPRED (El Centro Nacional de Prevención de Desastres) (2002). El Clima en la inestabilidad de laderas; La época de lluvias. Ciudad de México, México. Centro Nacional de Prevención de Accidentes.
- CONABIO (s.f.). Portal de geoinformación de LA Comisión Nacional para la Conservación de la Biodiversidad. CONABIO. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Cruden, D.M. & Varnes, D.J. (1996). "Tipos y procesos de derrumbes. En: Turner, A.A.K. y Schuster, R.L. (Eds.): Deslizamientos de tierra. Investigación y Mitigación. Junta de Investigación del Transporte, Informe Especial 247, National Academy Press, Washington, DC. USA. P. 36-75.
- Hernández Atencia, Y. & Ramírez Arcila, H. (2016). Evaluación del riesgo asociado a vulnerabilidad física por taludes y

Conclusiones

Las comunidades urbanas y rurales del área de estudio presentan tendencias de crecimiento poblacional acelerado, gracias a los requerimientos laborales que significa el sector turístico que se desarrolla en las costas, que a su vez demanda una gran cantidad de territorio y recursos primarios para su desarrollo.

Durante muchos años las tendencias de generación de bienes y servicios en México, han generado la degradación de los recursos que los hacen posibles, promoviendo su deterioro; siendo los suelos uno de los recursos más afectados.

En la actualidad la región ya presenta inestabilidad de laderas en forma de caídos y flujos leves, fenómenos que podrían agravarse a medida que se desarrolle el deterioro y agrave la deforestación, por lo que es necesaria la aplicación de medidas de monitoreo, control y prevención de la inestabilidad, con la finalidad de reducir la incertidumbre en su ocurrencia.

El procedimiento propuesto por Anbalagan *et al.* (2008) ha demostrado ser de gran eficiencia a la hora de determinar áreas susceptibles a presentar eventos relacionados a la inestabilidad de laderas en diferentes categorías, sin embargo, el autor propone estudios más detallados para las zonas de susceptibilidad alta y muy alta, con la finalidad de reducir la incertidumbre del evento y proponer así, planes de control y prevención del fenómeno.

- laderas inestables en la microcuenca Cay, Ibagué, Tolima, Colombia. *Ciencia E Ingeniería Neogranadina*, 26(2), 111-128. <https://doi.org/10.18359/rcin.1800>
- Highland L. & Bobrowsky P. (2008). *El manual de deslizamientos; una guía para entender los deslizamientos*. Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 p. <https://pubs.usgs.gov/circ/1325/>
- Hinojosa-Corona A., Rodríguez-Moreno V.M., Luis Munguía-Orozco L and Meillón-Menchaca O (2009). El deslizamiento de ladera de noviembre 2007 y generación de una presa natural en el río Grijalva, Chiapas, México. *Boletín de la sociedad geológica mexicana*. 63(1) http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-33222011000100003&script=sci_arttext&tlng=en
- INEGI (El Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2017). Uso de suelos y vegetación de la república mexicana serie VI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Shapefile. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- INEGI (El Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2012). Fallas y fracturas. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Shapefile. <https://www.inegi.org.mx/temas/geologia/>
- INEGI (El Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2010). Mancha Urbana y rural. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Shapefile. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- INEGI (El Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (s.f.). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Información cartográfica. Continuos de Elevación Digitales. <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- Lobo, Deyanira., Cortez, Adriana., Rodríguez, María, F., Ovalles, Francisco., Rey, J. C., Gabriels, Donald, and Parra, Raquel, M. (2010) Análisis de la agresividad y concentración de las precipitaciones en Venezuela. I. Región de los llanos. *Bioagro*. 22(3): 169-176. <https://www.redalyc.org/pdf/857/85717010001.pdf>
- Marín-C, S & Torres-Ruata, C. (1990). Mapa de hidrogeología de la república mexicana. Instituto de Geografía de la Universidad Autónoma de México.
- SEDATU (La Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano)(2014). Bases para la estandarización en la elaboración de atlas de riesgos y catálogo de datos geográficos para representar el riesgo. Ciudad de México. Secretaria de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano. 113 p. <https://www.gob.mx/sedatu>
- SEMARNAT (La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) (2004). Degradación del suelo en la república mexicana. Dirección de geomática de la secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://www.gob.mx/semarnat>
- Suárez D. Jaime (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Bucaramanga, Colombia. Instituto de investigaciones sobre erosión y deslizamientos. [Erosion.com](http://erosion.com)
- SEGOB (Secretaría de Gobernación) (s.f.). Secretaria de Gobernación. Datos abiertos. Biblioteca de archivos digitales. <https://datos.gob.mx/busca/dataset/centro-nacional-de-prevencion-de-desastres/resource/459e6b2c-6b16-41ab-a64a-2c7274dfaf66>.
- SGM (Standard Generalized Markup Language) (2007). Sismología de México: Museo Virtual. Servicio Geológico Mexicano, Gobierno Federal. <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Sismologia-de-Mexico.html>
- UAEM (Universidad Autónoma del Estado de México) (s.f.). Universidad Autónoma del Estado de México. Centro de Recursos Idris, México. <http://idrisi.uaemex.mx/distribucion/superficies-climaticas-para-México>.