

## Predictibilidad de riesgos geomorfológicos en el sistema hidroeléctrico Necaxa, Sierra Norte de Puebla, México

Frank Gustavo GARCÍA RODRÍGUEZ<sup>1</sup> y José Ramón HERNÁNDEZ SANTANA<sup>2</sup>

**Abstract:** *PREDICTIBILITY OF GEOMORPHOLOGICAL RISKS IN THE NECAXA HYDROELECTRIC SYSTEM, SIERRA NORTE DE PUEBLA, MEXICO.* This paper tries to state how landslides can be treated as objects in a contextual analysis. The goal of this research project is to provide a framework that integrates some existing models. Multi scale segmentation and Object-oriented analysis (OOA) have shown good results in the landslide inventory. The combination of the above methods and data mining techniques have allowed for hazard assessment procedures based on susceptibility maps to improve predictions rating landslide threats in the middle portion of the Necaxa River basin. The results were contrasted by the models of frequency ratio, entropy ratio, classification and regression trees and multivariate adaptive regression splines. The models performance were evaluated using the area under the receiver operating characteristic curve (AUC), at time statistic were used to compare the spatial heterogeneity of the typological units. The maximum and minimum probabilities of quality achieved, 0.87246 and 0.728410 respectively, allow us to conclude the validity of the methodology used.

**Resumen:** La segmentación multiescala y la clasificación orientada a objetos, han demostrado buenos resultados en el inventario de deslizamientos. La combinación de los anteriores métodos y técnicas de minería de datos han permitido desarrollar procedimientos de evaluación de peligros basados en mapas de susceptibilidad para mejorar la calificación de las predicciones de amenazas por deslizamientos en la porción media de la cuenca hidrográfica del río Necaxa, donde se localiza el Sistema Hidroeléctrico Necaxa, Puebla, México. Los resultados obtenidos se contrastaron mediante los modelos de índice de frecuencia, índice de entropía, *Classification and Regression Trees* y *Multivariate Adaptive Regression Splines*. La importancia de los modelos se evaluó mediante el área bajo las curvas características operativas del receptor y se utilizaron para comparar la heterogeneidad espacial de las unidades tipológicas. Las probabilidades máximas y mínimas alcanzadas, 0.87246 y 0.728410 respectivamente, permiten concluir la validez de la metodología empleada.

**Palabras clave:** Peligros por deslizamientos. Minería de datos. Necaxa. México.

**Key words:** Landslide hazard. Data mining. Necaxa. Mexico.

### Introducción

En las últimas tres décadas, la práctica de diversas disciplinas académicas ha prestado especial interés para explicar el origen, comportamiento y consecuencias de los riesgos provocados por el movimiento gravitacional de rocas, suelos y de-

tritos, comúnmente llamados deslizamientos. El incremento del número de artículos en revistas y libros de carácter científico es un ejemplo de la actividad desplegada por las diferentes comunidades académicas (Bonnard y Corominas, 2005).

El objetivo primordial de estos estudios, se enfoca a la protección de la población, la economía y el

<sup>1</sup>) Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Interior, s/n, Ciudad Universitaria, Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México.

e-mail: frankggr03@gmail.com (Autor correspondiente).

<sup>2</sup>) Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.

Circuito Interior, s/n, Ciudad Universitaria, Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México.

e-mail: santana@igg.unam.mx

medio ambiente, contra los probables daños causados por estos fenómenos, por lo que la aseveración de Crozier y Glade (2005) resulta pertinente cuando afirman que se requiere de una evaluación precisa de los niveles de amenaza de los deslizamientos como medida objetiva, reproducible, justificable y significativa del riesgo. En este sentido, el riesgo se materializa como un evento de consecuencias calamitosas, que puede ocurrir en el futuro y por tanto, requiere ser “pronosticado espacialmente”.

La cartografía de riesgos presenta el costo anual esperado de los daños por los deslizamientos, mediante la combinación de la probabilidad espacial y temporal del fenómeno, obtenido en los mapas de peligro, y el análisis de las probables ocurrencias de los daños a la sociedad y su infraestructura. En este sentido, la zonificación territorial, mediante la identificación de las amenazas y la calificación del riesgo, es una medida ampliamente utilizada por múltiples instituciones, debido a su viabilidad a escala regional y factibilidad económica de ejecución (Fell *et al.*, 2008). De acuerdo con la ONU (2008), existen dos grupos de medidas para la reducción del riesgo: las medidas estructurales, que comprenden las acciones de intervención física, y las no estructurales, aquellas vinculadas a las políticas públicas. Como medida estructural, la cartografía de amenazas y riesgos, representa una poderosa herramienta de mitigación, porque supone la ordenación y

gestión del territorio, además de constituir un auxiliar en el desarrollo de los planes de emergencia.

En México, en los próximos 15 años, aproximadamente el 70 % de los recursos materiales y humanos de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), se destinarán a la vigilancia, evaluación, monitoreo y mitigación de riesgos por deslizamientos o inestabilidad de laderas en los ríos y embalses que abastecen a las centrales hidroeléctricas, operados por dicha institución paraestatal (Mena *commun. pers.*, 2012). Ante ello, el presente trabajo estudia las relaciones espaciales que se establecen entre los agentes causales preparatorios y los agentes disparadores de deslizamientos, en un modelo teórico cuantitativo que pueda replicarse en condiciones ambientales similares, teniendo como objetivo central validar nuevos elementos metodológicos para mejorar el conocimiento sobre los procesos de riesgos geomorfológicos por deslizamientos, en el área que ocupa el Sistema Hidroeléctrico Necaxa, como base para la predicción efectiva de deslizamientos a futuro.

## Área de Estudio

### Localización geográfica

El área estudiada ocupa parcialmente las cuencas hidrográficas de los ríos Necaxa, Laxaxalpan y San Marcos, en la Sierra Norte de Puebla (figura 1) abar-

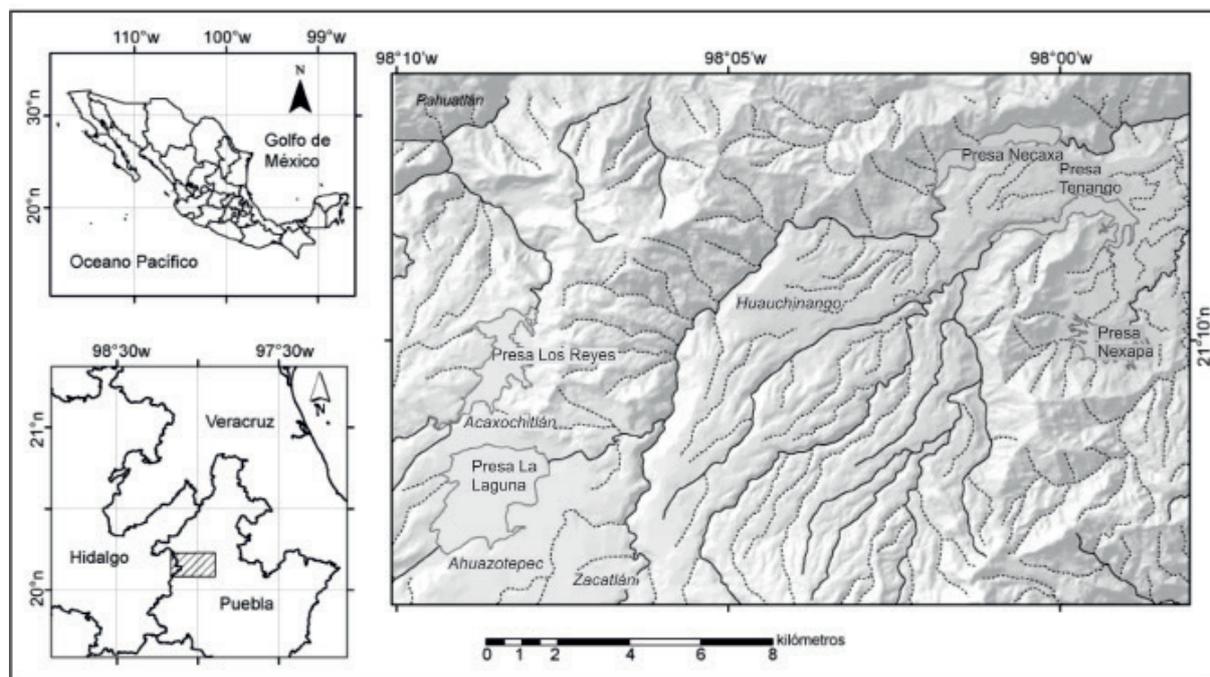


Figura 1. Área de estudio. / Figure 1. Study area.

cando un polígono entre los 20°13'38" y 20°04' 57" de latitud norte y los 97°53'40" y 98°10'04" de longitud oeste y posee una superficie de 458.22 km<sup>2</sup>.

## Características físico-geográficas generales

### Geología y Relieve

De acuerdo con Hernández-Santana *et al.* (2007), en la constitución geológica y el relieve confluyen dos unidades morfoestructurales regionales diferenciadas. La primera representada por el Eje Neovolcánico Transmexicano, con rocas volcánicas de secuencias de estratovolcanes, ocupada por derrames lávicos, llanuras proluviales y fluvio-lacustres, de edades entre el Terciario y el Holoceno; mientras la segunda, perteneciente al orogeno de la Sierra Madre Oriental, está compuesta por cadenas montañosas plegadas sobre rocas metasedimentarias de edades entre el Jurásico y el Cretácico, e intrusiones de cuerpos ígneos, ocasionalmente con presencia de mantos de sobrecorrimiento y monoclinales, con intensa disección erosivo-kárstica.

### Clima

El clima está determinado por su posición en el trópico húmedo y la cercanía al Golfo de México, y la cantidad de precipitaciones está asociada a la distribución regional del relieve. En el verano y el otoño la región es azotada intensamente por los ciclones tropicales y otros eventos extremos, provenientes del Océano Atlántico y del Mar Caribe, que incrementan el aporte de humedad. En invierno, las masas de aire polar provenientes del norte, también aportan precipitaciones. De acuerdo a la clasificación climática de Köppen, modificada por García (2004), en el territorio dominan tres tipos de climáticos bastante similares: clima semicálido húmedo, con 1.565,80 mm de precipitación anual; clima templado húmedo con lluvias todo el año, con 1.951,90 mm; y clima templado y húmedo, con lluvias todo el año, con 1.067,40 mm.

### Suelo, vegetación y uso de suelo

El clima y el relieve son los agentes pedogenéticos más importantes en el área, predominando los suelos andosol, litosol, regosol, acrisol húmico, luvisol, rendzina, cambisol, feozem, fluvisol y vertisol. Los principales tipos de vegetación son el bosque de pino-encino, el bosque de pino, el bosque de encino, el bosque mésofilo de montaña, la selva alta perennifolia y la vegetación secundaria con pastizales.

## Materiales y métodos

### Análisis geomorfológico

Para el levantamiento de unidades geomorfológicas regionales, se interpretaron las ortofotos a escala 1:20.000; la orientación estructural del relieve mediante el mapa de sombreado analítico del relieve, obtenido con el *software SAGA*; la utilización de los mapas morfométricos de hipsometría, ángulo de inclinación de las pendientes, profundidad de disección (m/km<sup>2</sup>) y densidad de disección (km/km<sup>2</sup>), rugosidad del terreno y curvatura de la pendiente; el análisis de las deformaciones tectónicas de las superficies de planación para revelar la amplitud neotectónica y las subcategorías del relieve; y el trabajo de campo para la verificación de las relaciones estratigráficas del relieve y otros aspectos vinculados con la yacencia de los deslizamientos. La clasificación contempló los niveles jerárquicos de categorías y subcategorías geomorfológicas, el piso altitudinal (en m), el tipo morfogenético específico (morfología, morfometría, proceso genético, substrato geológico de yacencia y edad relativa) y el complejo de formas genéticas, incluidas las gravitacionales.

### Análisis estadístico

Realizado el inventario de deslizamientos, y concebido y construido el modelo de roturas de las vertientes, se procedió a seleccionar el conjunto de factores causales preparatorios potenciales que refuerzan la condición de inestabilidad crítica de las laderas. La condición

previa para la selección óptima de las variables cumplió con los requisitos de: constituir atributos estocásticos provenientes de fuentes primarias en el tratamiento de los datos (fotografías aéreas, imágenes de satélite y trabajo de campo); facilidad en la construcción de la cartografía temática digital mediante algoritmos geospaciales utilizados en disímiles contextos geográficos, asegurando minimizar costos y tiempos de adquisición; y determinación de variables cuyos atributos y significados físicos-geográficos fueran susceptibles de ser interpretados, tanto de manera conjunta como de forma individual. Para el tratamiento estadístico espacial de los datos se clasificaron las variables utilizadas, según fueran de tipo continuo o de tipo discreto. Entre las variables de tipo continuo, destacan las categorías del relieve (montañas, lomeríos, llanuras) y sus subcategorías, el gradiente de pendiente y la orientación de ladera, la rugosidad y la curvatura del terreno, el índice de energía del relieve, la densidad de morfoalineamientos, el índice topográfico de humedad; mientras

en las discretas figuran la litología superficial, el índice geológico de resistencia, el tipo de suelo y la cobertura y uso de suelo.

Para la determinación de la susceptibilidad se combinaron procedimientos de álgebra espacial con el software ArcGIS 10.3 Desktop (ESRI, 2015), algoritmos de minería de datos como CART (Salford Systems, 2017a) (Classification and Regression Trees) y MARS (Salford Systems, 2017b) (Multivariate Adaptive Regression Splines), con la suite de minería de datos SPM v 8.0.0.576 (*Salford Predictive Modeler*), y la metodología para predecir espacialmente las probabilidades por deslizamiento en el Sistema Hidroeléctrico Necaxa, Puebla, México (figura 2).

## Resultados y Discusión

### Clasificación morfogénica del relieve

Las características del basamento geológico y del relieve determinaron 15 tipos de relieve (figura 3). De manera sintética, montañas medias a premontañas, consolidadas durante el Plio-

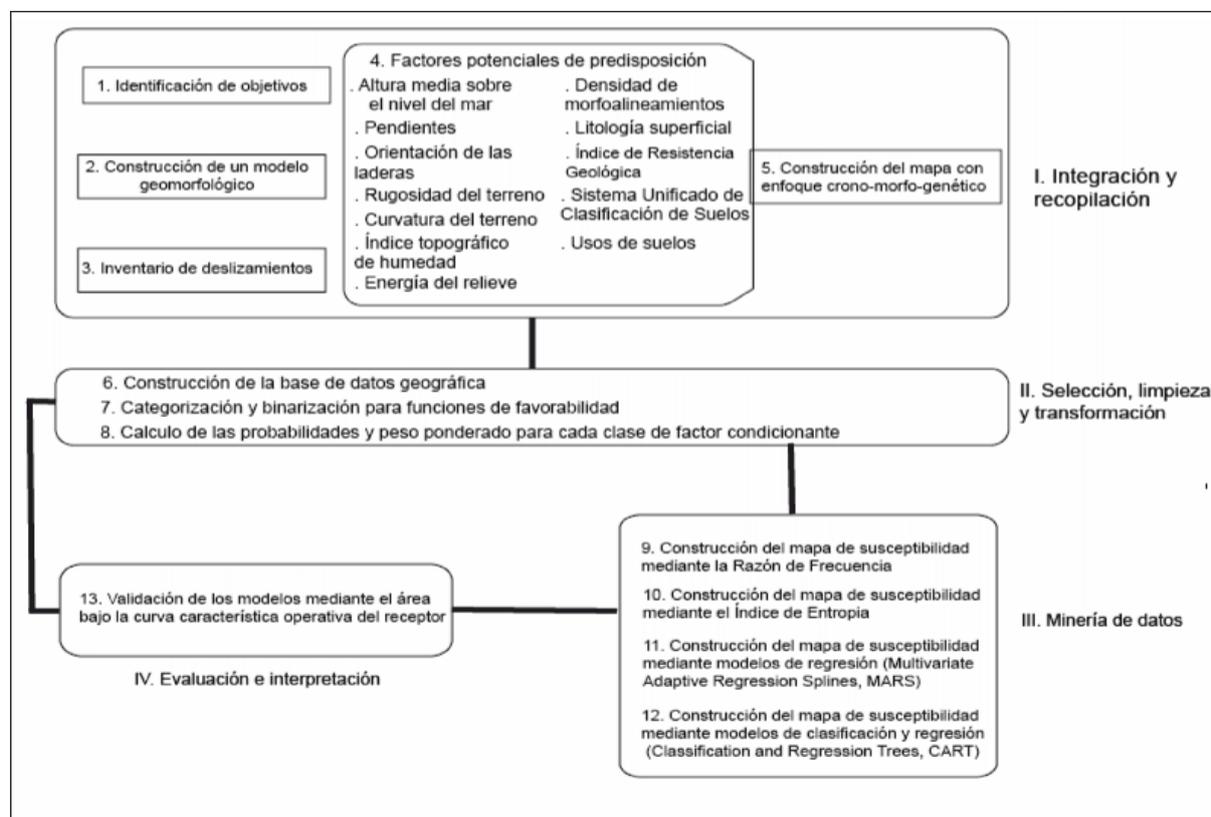


Figura 2. Flujograma metodológico. / Figure 2. Methodological flowchart.

ceno al Cuaternario: (1) medias, en estructuras volcánicas modeladas por procesos denudativos, (figura 3), moderadamente diseccionadas (H, altitud = 1200 m); (2) medias, cupuliformes, sobre depósitos terrígenos jurásico-cretácicos y aislada cobertura de depósitos piroclásticos pliocénico-cuaternarios, moderadamente diseccionadas (H = 1200 m); (3) medias, denudativo-erosivas y denudativo-karstificadas, sobre rocas carbonatadas y terrígenas jurásico-cretácicas, profundamente diseccionadas (H = 1200 m); (4) bajas, erosivo-denudativas, sobre depósitos terrígenos jurásico-cretácicos y aislada cobertura piroclástica pliocénica-cuaternaria, profundamente diseccionadas (H = 600 m); (5) bajas, erosivo-kársticas sobre secuencias litológicas del Cretácico Inferior, moderadamente diseccionadas (H = 600 m); (6) bajas, denudativo-erosivas-karstificadas, sobre rocas carbonatadas y terrígenas jurásico-cretácicas, con cortezas de medianamente diseccionadas (H = 600 m); (7) bajas, en plegamientos, kárstico-denudativas, formadas sobre rocas carbonatadas y aisladamente terrígenas calizas del Jurásico y Cretácico, moderadamente diseccionadas (H = 600 m); (8) premontañas,

cupuliformes en estructuras anulares, kárstico-denudativas, sobre rocas terrígenas lutitas jurásicas y piroclastos terciarios, e intercalaciones de materiales piroclásticos, moderadamente diseccionadas (H = 600 m); (9) premontañas, cupuliformes en estructuras semicirculares, kárstico-denudativas, sobre rocas terrígenas jurásicas y calcáreas cretácicas, moderadamente diseccionadas (H = 600 m); (10) premontañas, erosivo-denudativas, escalonadas sobre rocas carbonatadas y terrígenas miocénicas, ligeramente diseccionadas (H = 600 m); (11) premontañas, en plegamientos, kárstico-denudativas, formadas sobre rocas carbonatadas y terrígenas del Jurásico, intensamente diseccionadas (H = 300 m); (12) premontañas, cupuliformes, kárstico-erosivas, sobre calizas arrecifales del Cretácico Inferior, intensamente diseccionadas (H = 300 m); y llanuras cuaternarias: (13) colinosas y escalonadas, estructuro-denudativas en litomorfoestructuras circulares, intensamente diseccionadas (H = 240 m); (14) colinosas estructuro-denudativas, en litomorfoestructuras circulares, sobre depósitos piroclásticos y depósitos aluviales, ligeramente diseccionadas, muy

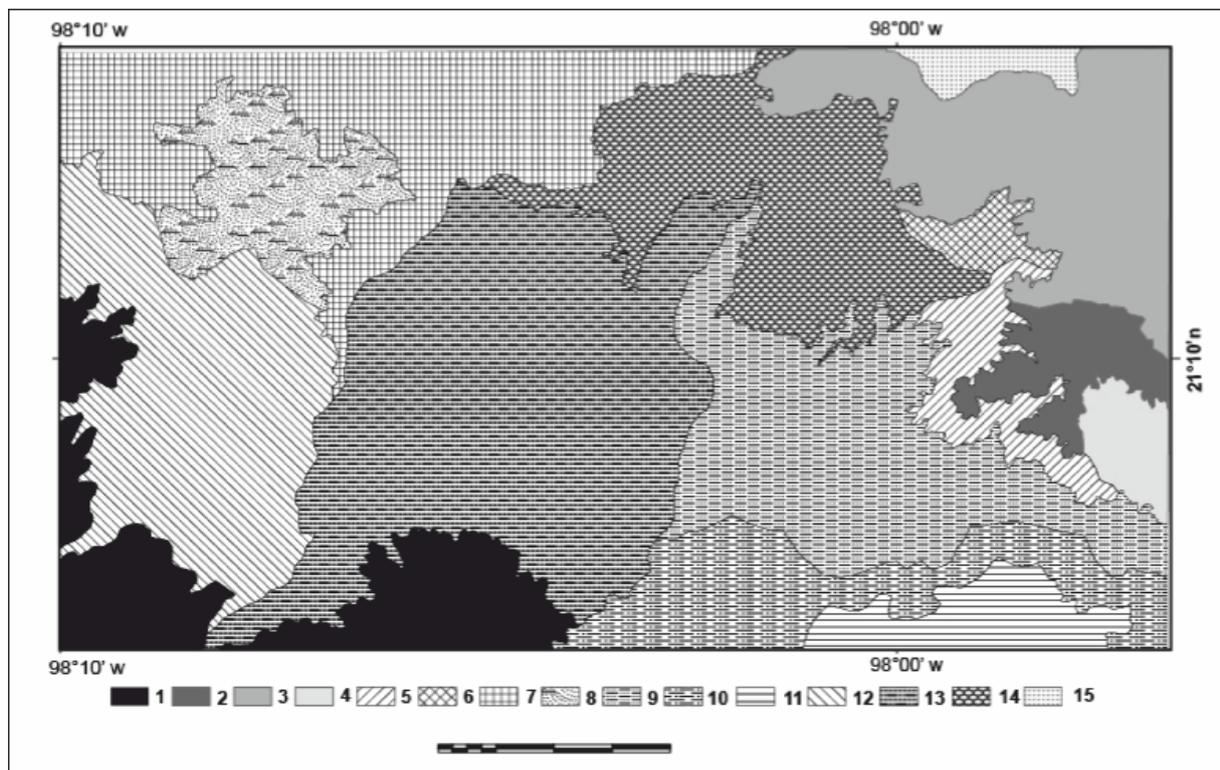


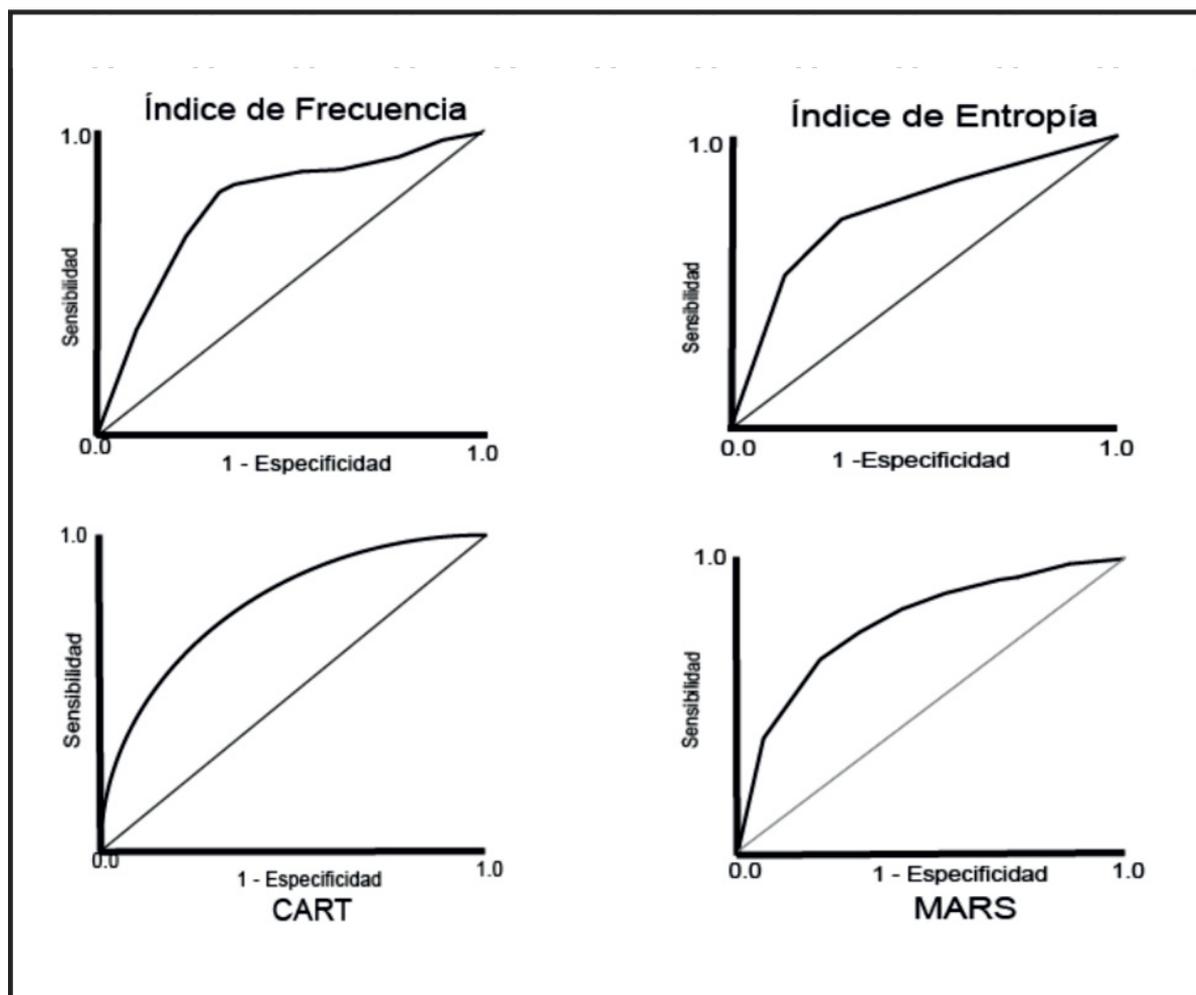
Figura 3. Unidades morfogenéticas del relieve regional. / Figure 3. Regional morphogenetic units.

antropizadas, donde se localizan varios centros urbanos y las presas Necaxa, Tenango y Nexapa ( $H = 160$  m); y (15) mesiforme, estructuro-denudativa, sobre derrames basálticos columnares, plana ( $H = 20$  m).

### Modelos estadísticos y sus comparaciones

La aplicación del primer modelo estadístico, el índice de frecuencias, con vistas a la elaboración de los mapas de susceptibilidad a deslizamientos, partió de una matriz de eventos (deslizamientos y flujos) donde cada factor condicionante se convirtió en una variable categórica y las variables sin información fueron eliminadas (figura 4).

El comportamiento de los factores condicionantes reflejó que las variables montañosas medias y bajas, poseen los niveles más altos, mientras que las laderas escarpadas a las abruptas tienen mayores probabilidades de rupturas por deslizamientos. Sin embargo, en las categorías definidas por la variable orientación de las laderas no existe una preferencia marcada en la relación de frecuencias para una orientación en particular. En el caso del índice de rugosidad, las frecuencias más altas están asociadas a los valores superiores. Por otra parte, las clases de curvatura de laderas muestran una distribución en los valores más altos de curvaturas cóncavas, asociadas con depósitos coluviales en laderas cóncavas. Los mayores valores de energía del relieve ( $H > 500$  m) se asocian a la más alta



**Figura 4.** Áreas bajo las curvas características operativas del receptor. Todos los modelos. / **Figure 4.** Areas under the operating characteristic curves of the receiver. All the models.

probabilidad de eventos, mientras que la probabilidad dominante de morfoalineamientos en el territorio fue de 3.0 a 3.5 km/km<sup>2</sup>.

Con relación a la litología, el mayor valor aparece en las rocas terrígenas (limonitas, areniscas y conglomerados), dominando rocas con muy mala condición de discontinuidades, fracturadas y muy fuertemente fracturadas. Las probabilidades más altas corresponden a las gravas mal graduadas; las mezclas grava-arena con pocos finos o sin finos, mezclados con arenas mal graduadas; arenas con grava, pocos finos o sin finos; y arenas limosas, mezclas de arena y limo. En las coberturas del suelo, las probabilidades elevadas están asociadas con la intervención antrópica.

El segundo modelo analizado fue el Índice de Entropía, cuyo comportamiento en la función de densidad de probabilidades en el análisis bivariado de los eventos de deslizamientos y los factores condicionantes, fue similar al comportamiento del modelo anterior. Se calcularon con *Microsoft Excel* las áreas bajo la curva característica del receptor (AUC) con una sensibilidad de 0.76160 para el primer modelo (Índice de Frecuencia) y un valor ligeramente superior, 0.80330, para el modelo del Índice de Entropía (figura 4).

El modelo 3 (CART) se construyó a partir del índice de Gini, como medida de heterogeneidad, con ocho variables como mínimo por nodo y como método de prueba a la validación cruzada. CART construyó un árbol basado en el criterio de pureza del nodo, que luego se elimina mediante la validación cruzada para evitar la sobreexposición. En este modelo, al utilizar un procedimiento más riguroso de poda de árboles, se incrementa el valor de la importancia de las variables para dividir los nodos y las ramas.

El cuarto modelo se obtuvo mediante el algoritmo *MARS* (*Multivariate adaptive regression splines*) que como se explicó anteriormente, combina la regresión lineal clásica, la construcción matemática de splines y la partición recursiva binaria para encontrar relaciones lineales y no lineales entre los predictores. Para cumplir

con esto, el algoritmo aproxima la función mediante un conjunto de regresiones lineales llamadas “funciones de base”. El valor Y es un puntaje, no una probabilidad y la distribución de los valores de puntuación no está restringida al rango 0-1.

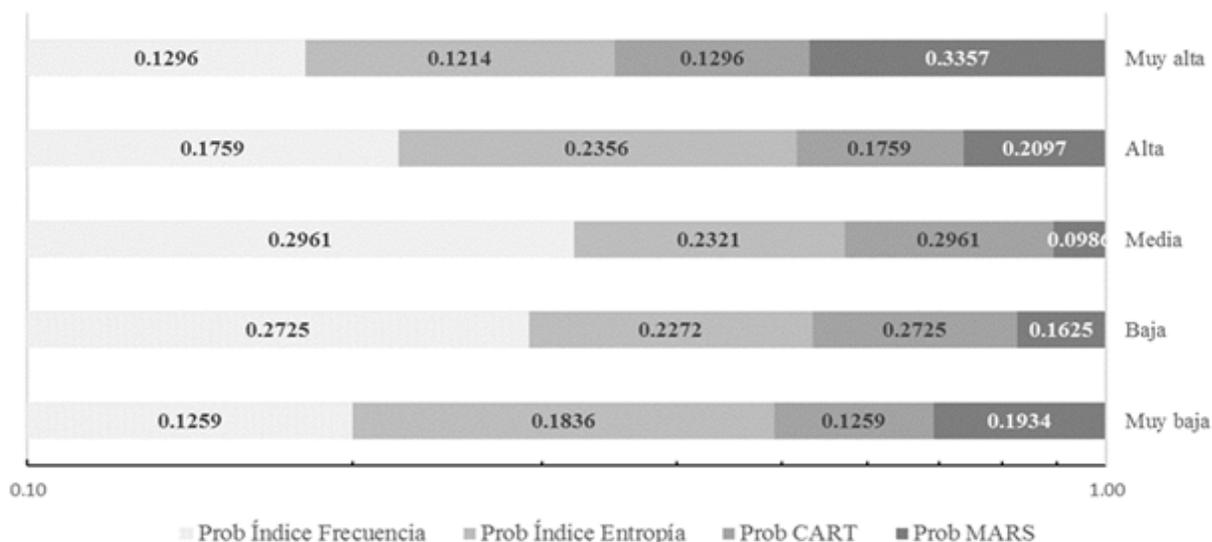
Las áreas bajo la curva característica del receptor (AUC) en el modelo 3, alcanzaron una sensibilidad de 0.87246 (Modelo CART) y 77628, para el modelo del método *MARS* (figura 4).

El resultado final parcial fueron cuatro mapas sintéticos de susceptibilidad a deslizamientos, uno para cada método, calculado a partir de la bondad de ajuste por método y combinándolo en una sola suma. El comportamiento de las probabilidades por cada clase de susceptibilidad en los cuatro mapas de susceptibilidad es el siguiente (figura 5).

A pesar de que el área bajo la curva característica del receptor (AUC) en el modelo *MARS* ocupa el segundo lugar en orden decreciente, el comportamiento probabilístico de las clases adopta una forma de parábola invertida, incrementando sustancialmente la probabilidad de ocurrencia de la clase de susceptibilidad “Muy alta”. Los otros tres modelos se comportan de manera similar (distribución normal) en las cinco clases de susceptibilidad.

A continuación, se describen dos patrones de comportamiento: uno para los deslizamientos y otro para los flujos, de acuerdo a la probabilidad de ocurrencia mostrada por el mejor modelo obtenido, CART (figura 6).

Patrón de comportamiento A. El primer patrón, asociado con los deslizamientos y una probabilidad de 0.911765, corresponde a elevaciones donde dominan procesos estructuro-erosivos (gravitacionales y kársticos), sobre rocas clásticas terrígenas carbonatadas sobre suelos mal graduados, con predominio de gravas y arenas con pocos finos (limos y arcillas), y una alta concentración de cambios bruscos por vectores de las pendientes (rupturas concentradas en pequeñas unidades de superficie). El dominio de orientación de laderas es sureste.

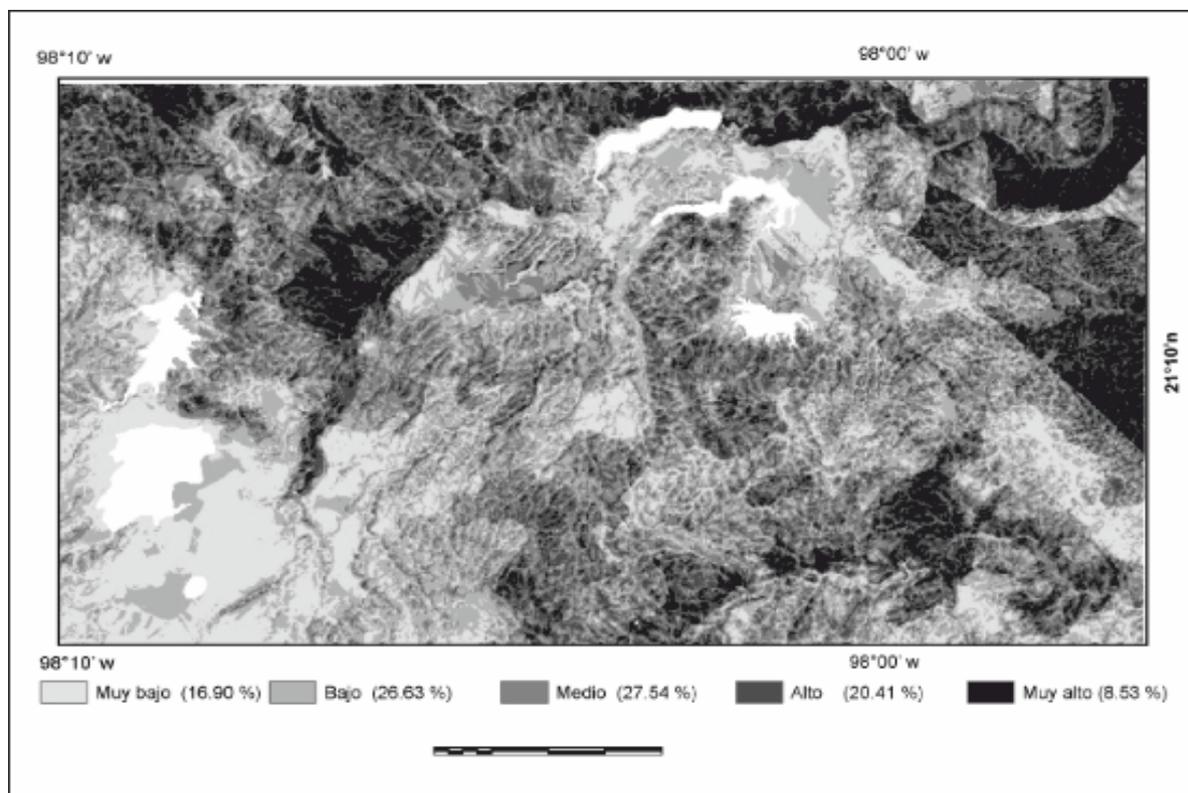


**Figura 5.** Distribuciones de probabilidades por clases de susceptibilidades en los cuatro mapas. / **Figure 5.** Probability distributions by susceptibility classes on all four maps.

Patrón de comportamiento B. El segundo patrón, asociado con los flujos y derrubios, y probabilidades de 0.933333, corresponde a un dominio similar al anterior, pero con la novedad de que intervienen clases de curvaturas cóncavas y cóncavas–rectilíneas.

### Conclusiones

La validación de nuevos elementos metodológicos para mejorar el conocimiento sobre los procesos de riesgos geomorfológicos por deslizamientos en el área del Sistema Hidroeléct-



**Figura 6.** Mapa de clases de susceptibilidad de acuerdo a las probabilidades para el modelo 3, CART. / **Figure 6.** Map of susceptibility classes according to the probabilities for model 3, CART.

trico Necaxa, como base para la predicción efectiva de deslizamientos a futuro, partiendo de cuatro modelos estadísticos aplicados y sus comparaciones, constataron de manera concluyente, que la aplicación de Sistemas de Información Geográfica y algoritmos de minería de datos, donde se relacionan el inventario de eventos gravitacionales y los factores causales preparatorios con el levantamiento geomorfológico a escala regional, permiten la reproducción de patrones en los datos espaciales.

De esta manera, puede afirmarse que los métodos cuantitativos empleados mejoran el rendimiento de la cartografía de susceptibilidad de eventos gravitacionales, en términos generales. Respecto al análisis de minería de datos y el reconocimiento de patrones, su uso permite la construcción de modelos de susceptibilidad, a partir de variables geomorfológicas simples, conocidas por la comunidad académica como las clases de pendientes, la orientación de las laderas y la cobertura del suelo, entre otras, utilizando formulaciones estadísticas objetivas y replicables.

El área bajo la curva característica del receptor y la validación cruzada permitió la comparación de cuatro métodos estadísticos, brindando capacidad para evaluar la predicción probabilística de los modelos. Sin embargo, los modelos sólo pueden explicar una parte de la distribución espacial de los eventos, pues la explicación de las relaciones causales entre las variables independientes y la ocurrencia de los eventos no derivan de ellos.

Al ocurrir un evento los componentes intrínsecos del sistema se modifican (la longitud de la ladera, las zonas de deposición de los depósitos coluviales, la estructura interna de los horizontes del suelo, etc.), por lo que se suele recurrir a premisas muy básicas de partida como el “uniformismo”. Empero, esto no es óbice para explorar satisfactoriamente en términos de posibilidades o probabilidades, la susceptibilidad por eventos geomorfológicos a nivel regional, pues es precisamente a escala regional donde estos métodos constituyen una alternativa interesante para evaluar y comparar

los patrones no causales que intervienen en la predicción de los eventos gravitacionales.

La razón que explica la utilización del área bajo la curva característica del receptor (AUC) para evaluar los rendimientos de los modelos, es que no se limita a un único umbral de decisión, seleccionado arbitrariamente entre las clases adecuadas y no adecuadas, más bien, es porque resume todos los umbrales de decisión posibles. El AUC puede administrar valores que van desde 0.5 (el clasificador aleatorio) hasta 1.0 (el clasificador perfecto). Las curvas ROC y las estadísticas del AUC son invariantes bajo las distribuciones cambiantes en las clases binarias, es decir, presencia/ausencia, en realidad, representan el “porcentaje de observaciones de la clase “1” *versus* el “porcentaje de observaciones de la clase 0”, pues funcionan independientemente del equilibrio entre las dos clases.

También, resulta pertinente señalar que se detectó la ausencia del empleo de los algoritmos de minería de datos en los estudios de riesgos geomorfológicos en México, donde se obtienen estadísticas AUC con objeto de comparar cuantitativamente resultados obtenidos a nivel regional.

Finalmente, si desde esta perspectiva los resultados alcanzados poseen la suficiente robustez, entonces podrían considerarse como una aportación metodológica, que tal vez otros autores pudieran emplear para explorar distintos aspectos en esta dirección: el primero, la aplicación cartográfica junto con otros factores causales predictores, más la probabilidad temporal de los eventos; el segundo, el uso de modelos de síntesis, que incorporen factores disparadores como lluvias extremas, sismos y actividades antrópicas y, el tercero, la comparación con metodologías similares en diferentes regiones del mundo.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el soporte del Posgrado en Geografía, del Colegio de Geografía de la Facultad de Filosofía y Letras, y del Ins-

tituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México en la consecución de los objetivos de la presente investigación. A su vez, agradecen a los árbitros anónimos sus valiosos comentarios y acertadas sugerencias durante el proceso de arbitraje científico.

## References

- Bonnard, C. y Corominas, J. 2005. Landslide Hazard Management Practices in the World. *Landslides*, 2 (4): 245-246.
- Crozier, M.J. y Glade, T. 2005. *Landslide Hazard and Risks: Issues, Concepts and Approach*. En: T., Glade, M., Anderson y M.J., Crozier (eds.) *Landslide hazard and risk*, Wiley Editors, Chichester, pp. 1-40.
- ESRI 2015. *ArcGIS Desktop* (v 10.3). <http://www.esri.com/>.
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E. y Savage, W.Z. 2008. Guidelines for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for Land Use Planning. *Engineering Geology*, 102: 85-98.
- García, E. 2004. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía, UNAM, México, D. F., 106 pp.
- Hernández-Santana, J.R., Lugo-Hubp, J.I. y Ortiz-Pérez, M.A. 2007. *Morfoestructuras Regionales*. En: A. Coll Hurtado (ed.) *Nuevo Atlas Nacional de México*, Geomorfología. México, D. F., Instituto de Geografía, UNAM, p. NA-III-1.
- ONU 2008. *Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres. La gestión del riesgo de desastres hoy: Contextos globales, herramientas locales*. Documento 16829, San José, Costa Rica.
- Salford Systems 2017. a- CART, v. 8.0.0.576. <http://www.salford-systems.com>
- Salford Systems 2017. b- MARS, v. 8.0.0.576. <http://www.salford-systems.com>

**Recibido:** 07 de Noviembre del 2016

**Aceptado:** 19 de Abril del 2017