

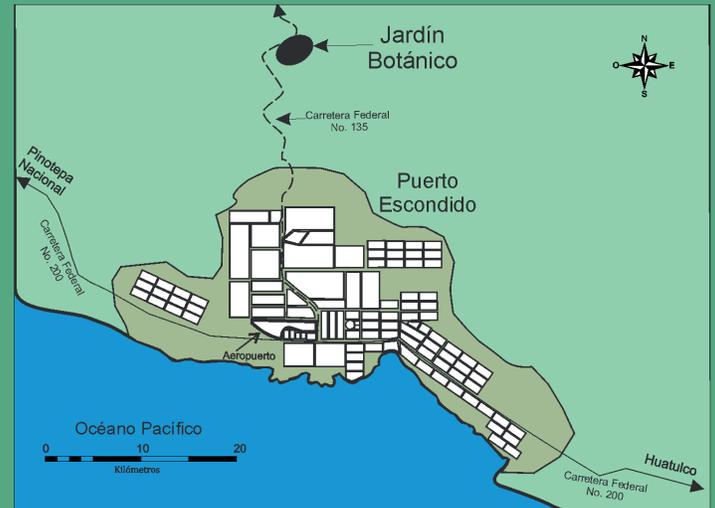
Jardín Botánico

Puerto Escondido



El Jardín Botánico de la Universidad del Mar campus Puerto Escondido se encuentra ubicado en el kilómetro 4.5 de la carretera Puerto Escondido a Sola de Vega y tiene una superficie de 16.7 hectáreas.

El jardín mantiene aproximadamente alrededor de 100 especies de plantas, al igual que algunas especies de animales como onzas, zorras, tlacuaches, zorrillos, armadillos, tuzas, ardillas y más de 90 especies de aves.



Horario:
De Martes a Viernes de 9 a 17 horas
Sábados y Domingos de 9 a 13 horas
Tel: (954) 58 24490 Ext. 0



Susceptibilidad de laderas por tipo de suelo en Puerto Escondido, Oaxaca, México

Edith Galván Ochoa^{1*}, Gricelda Valera Venegas² Allison Tai Rosewicz³
& Miriam Galván Ochoa⁴

Resumen

El asentamiento urbano de Puerto Escondido, al suroeste de la república mexicana, ha sido perjudicada por movimientos de ladera, provocados por la precipitación y el tipo de suelo, afectando, por ende, a la población. En este trabajo identificamos zonas de susceptibilidad de movimientos de laderas por tipo de suelo mediante el uso de sistemas de información geográfica. Nuestros resultados identifican zonas de mayor susceptibilidad en la zona noroeste de dicho asentamiento. A pesar de los métodos empleados en el presente trabajo, expresamos la necesidad de seguir realizando investigaciones detalladas de lugares que permitan comprender la dinámica original de desniveles, la fuerte influencia de los elementos físico-geográficos y las acciones antrópicas.

Palabras clave: Sistemas de Información Geográfica, mapa de susceptibilidad, tipo de suelos, variables físico-geográficas, movimiento de laderas.

Recibido: 10 de agosto de 2018

Abstract

The urban settlement of Puerto Escondido, in the southwest of the Mexican Republic, has been affected by the movement of landslides, caused by precipitation and the type of soil, and is also dangerous to the population. In this research we identifying the area's susceptibility to landslide movements using geographic information systems. Our results identify susceptibility zones located toward the northwest area of the urban settlement. Despite the methods used in this research, we express the need to continue carrying out detailed investigations of places that allow us to understand the original dynamics of slopes, as well as the strong influence of the physical-geographic elements and anthropic actions.

Key words: Geographic information system, Susceptibility map, type of soil, physical-geographical variables, landslides, hillshade.

Aceptado: 28 de febrero de 2019

Introducción

El presente trabajo forma parte de una investigación derivada de una convocatoria publicada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) en la que participó un grupo de profesores de la Universidad del Mar campus Puerto Escondido. La temática de la investigación versa sobre la inestabilidad

de laderas, misma que puede tener sus orígenes, de conformidad con lo señalado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED 2001), en: derrumbes, flujos, deslizamientos y expansión o desplazamientos complejos en la superficie terrestre. Las afectaciones, hoy en día, registran numerosas víctimas y cuantiosas pérdidas económicas; en

¹ Instituto de Ecología, Universidad del Mar campus Puerto Escondido. Carretera Vía Sola de Vega, Puerto Escondido, 71980, San Pedro Mixtepec, Oaxaca, México.

² Instituto de Industrias, Universidad del Mar campus Puerto Escondido. Carretera Vía Sola de Vega, Puerto Escondido, 71980, San Pedro Mixtepec, Oaxaca, México.

³ Departamento de Idiomas; Universidad del Mar campus Puerto Escondido. Carretera Vía Sola de Vega, Puerto Escondido, 71980, San Pedro Mixtepec, Oaxaca, México.

⁴ Escuela Comercial Cámara de Comercio, División de Posgrado. Calle Chiapas 81, Col. Roma Norte, 06700, Ciudad de México, México.

* Autor de correspondencia: geomatica@zicatela.umar.mx (EGO)

México, los casos de susceptibilidad de movimiento de laderas derivan del tipo de suelo; sin embargo, la época de lluvias también la afecta pues ésta se incrementa, provocando daños a poblaciones, infraestructura carretera y vías de comunicación.

El CENAPRED (2001) indica, asimismo, que se puede deber a la combinación de varios factores condicionantes como: a) litología, b) discontinuidad del terreno, c) hidrología, uso de suelo, d) pendiente y e) intemperismo; o a componentes desencadenantes, entre los que se encuentran: lluvias, sismos, actividad volcánica y humana (fugas de agua, cortes de suelos, sobrecarga de construcciones). Los movimientos de laderas ocurren porque se rompe el equilibrio que existe entre ésta, la pendiente y el tipo de suelo. La inestabilidad latente en zonas de suelo es susceptible a poca resistencia y debilidad del material; siendo lo anterior, intensos mecanismos detonadores de su variabilidad (CENAPRED 2001).

De igual manera, existen algunas regiones susceptibles de movimiento de suelo ubicadas en las montañas tropicales, fenómeno que se deriva de la unión de cuatro de los elementos más importantes para su ocurrencia: relieve, sismicidad, meteorización y lluvias intensas (Suárez 1998).

El concepto de susceptibilidad, para efectos del presente trabajo, se define como: "propiedad del terreno que indica qué tan favorables o desfavorables son las condiciones de éste para que pueda ocurrir inestabilidad, se refiere a factores intrínsecos a los materiales naturales de la ladera como tipo de suelo y geología, por mencionar algunos" (Suárez 1998). Por otra parte, la ocurrencia de inestabilidad se refiere a factores intrínsecos a los materiales naturales de la ladera como son: tipo de suelo y geología, por mencionar algunos (Suárez 1998).

En las costas oaxaqueñas, los movimientos de laderas, ocasionados por la susceptibilidad de los suelos, generan impactos negativos en la población (pérdida de vidas, deterioro de viviendas e infraestructura) y en el ambiente (daño en la cubierta vegetal). En los últimos

tiempos se ha observado un aumento en las precipitaciones, teniendo como consecuencia la presencia de intensos flujos de lodo, agua y vegetación en las calles que afectan la vida diaria de los habitantes, tal como ocurrió en la ciudad de Puerto Escondido, Oaxaca, impactada por eventos meteorológicos que provocaron caídas de árboles; daños en la red eléctrica; deterioros en tejados, puertas y ventanas, así como grietas en calles y avenidas durante las dos primeras semanas del mes de junio de 2017 por las tormentas tropicales Beatriz y Calvin; el material natural inherente a cualquier ladera provocó desfavorablemente la susceptibilidad en la superficie terrestre de esa zona. Incidentes de esta naturaleza motivan a realizar estudios que identifiquen el movimiento susceptible de laderas por tipo de suelo, dada la relevancia que representan, al permitir prever acciones encaminadas a proteger la integridad y actividad de la población, al igual que su entorno natural.

El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2013) define movimiento de masa al desplazamiento de terreno (depósitos recientes o roca) sobre pendientes a diferentes velocidades, teniendo como posibles causas factores naturales o antropogénicos. Los depósitos se clasifican: a) "de caída", mismos que se originan en áreas pronunciadas, b) "de tipo deslizamiento", caracterizado por cambio de un volumen de materiales térreos pendiente abajo, en una o varias superficies de falla, c) "de flujo", distinguido por ser el resultado de una acción de fragmentos de material consolidado o colocación en ladera inclinada y d) "de reptación", tendencia subsuperficial naciente o detritos rocosos extremadamente lentos o imperceptibles.

Existen diferentes estudios y propuestas relacionados con diversas metodologías y técnicas para la recopilación de información, entre los más destacados se encuentran: Alcántara & Murrillo (2008), quienes proponen elaborar un inventario nacional de remoción en masa en México que incluya información geológica, de relieve, uso de tierra, clima e hidrología.

Los autores emplean sistemas de información geográfica (SIG) y el método de regresión logística múltiple (RLM).

En este mismo orden de ideas, Muñiz-Jáuregui & Hernández-Madrigal (2012) realizaron la combinación de análisis multicriterio y el método heurístico para crear un mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masa en Puerto Vallarta, Jalisco.

Así mismo, Paz-Tenorio *et al.* (2017) emplearon el método heurístico con variables como geología, desniveles, densidad de drenaje, edafología, uso de suelo y vegetación en Tuxtla, Gutiérrez. Las variables determinantes prioritarias fueron la litología y la edáfica.

Por su parte, Aceves *et al.* (2016) señalan que los protocolos definidos por CENAPRED están basados en reglas de deslizamiento elaboradas en el año 2006 por el Departamento de Reservas Naturales del estado de Washington, de la División de Prácticas Forestales.

En relación al uso de procesos, Eastman (1996) menciona que la evaluación espacial multicriterio es un proceso que implica la evaluación de la elección de alternativas basadas en criterios concretos. De igual forma, Gómez & Baredo (2005 en Paz-Tenorio *et al.* 2017), definen la evaluación espacial multicriterio (EEM) como un conjunto de técnicas orientadas a asistir en los procesos de tomas de decisiones. Así mismo, Santé & Crecente (2005) señalan que el análisis multicriterio proporciona el marco adecuado para la integración de distintos factores ambientales en donde interviene el suelo y el agua. El análisis multicriterio junto con los sistemas de información geográfica, según señalan Scarlet & Pacheco (2013), definen que la evaluación espacial multicriterio es un conjunto de operaciones espaciales, mismos que se aplicaron en el desarrollo del presente trabajo. De Cos Guerra (2007) coincide, desde su punto de vista, que es un conjunto de operaciones espaciales para lograr un objetivo teniendo en consideración simultáneamente todas las variables que intervienen.

La metodología utilizada en el modelo de zonas susceptibles (Ávila 2006) se basó en

el procedimiento: A) Delimitación del área de estudio, subcuenca RH21Cb (San Pedro Mixtepec). B) Revisión de la literatura y colecta de información. C) Selección de imágenes Landsat y datos georreferenciados tipo ráster, así como la clasificación de las capas con tecnología SIG. D) Corroboración con el trabajo de campo, siendo éste relevante. E) Aplicación de las fórmulas matemáticas.

Finalmente, con el propósito de coadyuvar en la prevención de desastres y salvaguarda de la población y otros seres vivos asentados en los sitios objeto de estudio, se elaboraron y entregaron mapas de riesgo a las autoridades municipales correspondientes, permitiéndoles con ello tener acceso a información verídica, confiable y precisa para la toma de decisiones concerniente al crecimiento propio de las poblaciones ahí ubicadas.

En África, durante el año 2018, a partir de un conjunto de datos a los que se les aplicó un modelo de regresión logística múltiple, se mapeó la susceptibilidad de deslaves a nivel continental. Broeckx *et al.* (2018) construyeron dos mapas, en uno cartografiaron todos los tipos de deslaves; en el otro, excluyeron las regiones conocidas como fallas; no obstante, en ambos mapas la topografía fue la variable más significativa por lo que al sobreponerlos se detectó un patrón intercontinental predictivo que se explica con el 80% de la variación observada en la ocurrencia de los deslaves.

En ese mismo año, en una localidad tropical en Java, se realizó un inventario en el mapeo participativo. Samodra *et al.* (2018) lo definen como mapeo simple de deslaves, en él se muestra la localización y el tipo de ocurrencia, datos que fueron transferidos a un Sistema de Información Geográfica (SIG). La relevancia de los resultados estriba en la documentación de los deslaves originada; la preparación preliminar de áreas susceptibles, de peligro y riesgo; también se logró la investigación de su distribución, de su tipo y los patrones de comportamiento, así como la evolución dominante y el proceso en masa.

Con el objeto de identificar las áreas vulnerables de deslaves en Kerala, estado de la

República de la India y ubicado en la zona tropical en Amboor, Naidu *et al.* (2018) estudiaron la región empleando un modelo de análisis de pendiente probabilística. La importancia de cartografiar dichas zonas con un modelo matemático es que establecerá las bases para la identificación de las zonas en las que no se debe permitir el crecimiento urbano, se dice entonces que tiene cierta consistencia la identificación frágil del suelo.

Adicionalmente, se consideraron algunas aportaciones sistemáticas de autores de forma específica a la realidad del fenómeno de los deslaves en zonas tropicales.

Algunas otras investigaciones análogas al presente estudio fueron las realizadas en la provincia de Gansu, al noreste de la República Popular China, en un área aproximada de 49.74 km²; para el desarrollo de esa investigación se designaron dos métodos: uno aplicando sólo la presencia y otro la presencia-ausencia, lo cual sirvió en la evaluación del desempeño para el mapeo de la susceptibilidad de deslizamientos. Las densidades de deslizamientos obtenidas para áreas de alta susceptibilidad fueron: 0.0275/km², 0.082/km² y 0.060/km² aplicando los modelos: de experto, logístico y artificial de redes neuronales; respectivamente. Los resultados indicaron que el modelo basado en el conocimiento de expertos es el más efectivo para predecir la ubicación de las áreas con muy alta susceptibilidad.

En el sector central de Roma, Italia se estudió el riesgo de los flujos provocados por la lluvia, aplicando un índice calculado a partir de la suma de los flujos ocurridos, posteriormente se combinaron las matrices obtenidas. La cantidad de susceptibilidad se obtuvo de los datos de densidad probabilísticos espaciales de flujo y la morfología del terreno; los resultados preliminares del estudio determinaron áreas potencialmente sujetas a inundaciones pluviales, datos necesarios para el mapeo a escala municipal. El estudio permitió detectar áreas de mayor riesgo, ayudando con ello a priorizar la gestión de emergencias y planificación (Di Salvo *et al.* 2018).

Por otra parte, en la sierra costa del Estado de Michoacán, México se elaboró un mapa de peligros como instrumento para la prevención de desastres. El objetivo logrado en ese estudio fue la cartografía de las zonas de inundación y la evaluación de la susceptibilidad a las inundaciones de la cuenca del río Nexpa. Las variables utilizadas fueron: la geopedología, la topografía, la cobertura de suelo y el uso de suelo logrando así evaluar la vulnerabilidad de los asentamientos rurales locales. El método empleado fue la técnica de sobreposición usando un sistema de información geográfica; los resultados mostraron que el 13 % del asentamiento y el 7 % de la red de comunicación se ubican en las zonas de flujo de deslave (González-Arqueros *et al.* 2018). Los investigadores que estuvieron a cargo de los trabajos consideran que este método es efectivo para situaciones que carecen de información hidrometeorológica muy local o en zonas muy pequeñas.

Al norte de la península de Malasia, en las tierras altas de Cameron, caracterizada como zona tropical con elevada densidad de vegetación se realizó un estudio mediante el empleo de datos Lidar e inventarios de deslaves, dichos datos permitieron la obtención de factores como: el aspecto, la pendiente, altitud, así como la intensidad de la sombra. Para la segmentación de la información se usaron tres algoritmos: el llamado aleatorio forestal, la selección de atributos basada en la correlación y la colonización optimizada basada en los rangos de atributos en orden descendente de importancia. Derivado de los estudios se distinguieron los deslizamientos de tierra poco profundos a más profundos en áreas tropicales.

Marco geográfico general

El asentamiento urbano de Puerto Escondido, área objeto de estudio, se ubica entre 97°1'W-97°7'W y 15°49'N-15°55'N, al suroeste de la República mexicana, en el Estado de Oaxaca, el cual se localiza dentro de la subprovincia Costa Sur que se extiende desde punta Mita en Nayarit hasta el Istmo de Tehuantepec, tiene una longitud aproximada

de 1,200 km y un ancho medio de 100 km; la planicie costera es angosta y en algunos lugares no hay playa.

Desde el punto de vista fisiográfico se sitúa en la Sierra Madre del Sur, zona que pertenece a los municipios de San Pedro Mixtepec, al noroeste, y, al sureste, Santa María Colotepec.

Las características principales en relación al relieve son: la altitud que va desde los 0 msnm hasta los 700 msnm, aproximadamente. Al sur, cerca del límite de la línea que divide el mar con la superficie terrestre, es ligeramente ondulado; en cambio, hacia el norte, el terreno se va elevando. Al centro de la zona hay lomeríos con alturas de 60 a 450 msnm.

De conformidad a la geología del lugar, la parte este pertenece a la formación de Terreno Xolapa, depósito que data de 1.68 millones de años (SEDESOL 2011); su litología está constituida por conglomerado polimictico y depósitos aluviales. Asimismo, el Atlas de Riesgos del Municipio de Santa María Colotepec de la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL 2011) señala que Puerto Escondido es ocupado por rocas conglomeradas.

Las características geomorfológicas son definidas a partir de las geoformas, para esto se hace una discriminación y se sectorizan las unidades tomando como criterio la información de INEGI. La subdivisión está definida a partir de sectores de zonas de llanura costera salina cubriendo una gran parte hacia el sur; en cambio al norte, la zona de sierras bajas pertenece a la Sierra Madre del Sur.

Según la Red Hidrológica escala 1:50,000 edición 2.0 de INEGI (2011), la zona de estudio se ubica dentro de la Región Hidrográfica RH21C, llamada R (Colotepec y otros); en este contexto, se sitúa específicamente en RH21Ca y RH21Cb. La subcuenca RH21Cb (San Pedro Mixtepec) se calcula que tiene aproximadamente 66 cauces de corriente de agua intermitente que drena el asentamiento urbano; así mismo, posee zonas de valle y de planicie, ligeramente ondulada, los ríos presentan quebradas accidentadas.

La precipitación interviene como un regulador de la dinámica de los ríos, activando su intensidad por breves períodos en zonas susceptibles de movimiento de laderas (CENAPRED 2001). Castro & Vicuña (1990) plantean que los índices de intensidad de lluvia mensual con tendencia al alza permiten suponer que el terreno puede ser fácilmente susceptible.

De acuerdo con el diccionario de datos climáticos del INEGI (2013), el clima que presenta la zona es A Cálido, w subhúmedo, 0 menos húmedo, (w) lluvia invernal < 5, precipitación del mes más seco <60, temperatura media anual >22. La clave correspondiente es Aw0(w).

La carta consultada de tipos de suelo del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (2001) indica un predominio en la zona de suelos regosoles eútricos, con alta saturación de agua. Adicionalmente, el INEGI (2001) señala que el asentamiento urbano de Puerto Escondido no tiene horizontes, se forman a partir de material no consolidado, de poca profundidad y son pobres en materia orgánica y ácidos. Así mismo, en esta zona afloran arenas que se formaron a partir de sedimentos procedentes de rocas metamórficas. Presencia de varios tipos de texturas gravas hasta areniscas, siendo estas últimas las que predominan aquí.

Por otra parte, el tipo de vegetación corresponde a la selva baja subcaducifolia (SARH 2001), acorde con la publicación del mapa; hacia la zona norte se identifican suelos no aptos forestales; Puerto Escondido se clasifica como perturbado y de escaso bioma. El suelo se ha visto afectado por las actividades antrópicas como el cultivo y el pastoreo.

Inestabilidad de laderas

El mapa de Regiones Potenciales de Deslizamiento de Laderas (CENAPRED 2012) señala que la zona de estudio se localiza fuera del área Pacífico Sur, considerada como

potencial de movimiento de vertiente, es decir, comienza aproximadamente por arriba de los 700 msnm.

La inestabilidad de laderas se ha presentado en la costa oaxaqueña como consecuencia de fenómenos meteorológicos, *v. gr.* las tormentas tropicales Beatriz y Calvin que en 2017 afectaron a la población urbana de Puerto Escondido; los daños ocasionados fueron señalados en la sección de la Introducción del presente escrito. En el caso particular de la zona de investigación, la acción de la precipitación sobre el suelo hace que los movimientos de laderas generen afectaciones en el ámbito social; los pobladores que ahí habitan, muy especialmente quienes han construido sus viviendas en las zonas cercanas a los cauces, sufrieron pérdidas totales o averías parciales.

Material y métodos

Los órganos institucionales en México con registros de eventos de zonas susceptibles de movimiento de laderas provocadas por el tipo de suelo son por antonomasia: el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), los cuales por sus características específicas permiten realizar analogías aplicables al estudio que ahora nos ocupa.

La metodología de CENAPRED y la Secretaría de Gobernación (2006), en su modelo espacial del riesgo para la integración en el sistema de información geográfica, consta de un análisis espacial que incluye transformaciones, operaciones y métodos aplicados a datos geográficos y en la adición de un valor asociado, con el objeto de encontrar un patrón o tendencia que facilite la identificación de las zonas susceptibles de movimiento de laderas por tipo de suelo. La metodología señala que el proceso consiste en sobreponer valores de lluvia, altitud y tipo de suelo generando así mapas de amenazas por inundaciones; las capas están asociadas a atributos que permiten determinar la susceptibilidad del sistema expuesto. De acuerdo con la accesibilidad que se tenga a los datos se pueden

elaborar mapas de susceptibilidad, vulnerabilidad, peligro y finalmente, riesgo. Para el caso que aquí compete, realizar un análisis *a priori* derivado del acceso a los datos obtenidos permitió únicamente el procesamiento de un mapa de susceptibilidad (CENAPRED & Secretaría de Gobernación 2006). Las variables estudiadas en gabinete fueron cinco: tipo de suelo, geomorfología, geología, pendiente y precipitación.

En lo concerniente al método planteado por Mora & Vahrson (1991), basado en la interacción de los factores de susceptibilidad y de disparo, presenta la ventaja del uso de indicadores para áreas similares a la zona de estudio, además de que el acceso a la información es relativamente sencillo y procede de fuentes oficiales.

En el Seminario Internacional “Medición de grupos vulnerables” (INEGI 2011), se señaló que la vulnerabilidad se refiere a zonas susceptibles causadas por la mala planeación del desarrollo urbano y el crecimiento de la población sin control; las características a considerar para este tipo de zonas son: la inestabilidad de laderas, las inundaciones y las sequías. La metodología para comprender el análisis de susceptibilidad consiste en el empleo del modelo digital de elevación, el mapa de geomorfología, el mapa de pendiente, el mapa hidrológico, el mapa de uso actual de suelo y vegetación, el mapa de suelos e imágenes (INEGI 2011). Dicha metodología difiere de la propuesta por el CENAPRED al tener un carácter antrópico, es decir, considera el desarrollo urbano y el crecimiento de la población como las causas de la vulnerabilidad sobre la superficie terrestre.

En este sentido es necesario señalar que tanto el CENAPRED como el INEGI coinciden en el uso de las variables: tipo de suelo y el elemento altitud o modelo digital de elevación; sin embargo, mientras que el primero emplea sólo tres variables, el segundo utiliza cinco. Además, ambos métodos hacen la integración de datos espaciales en un sistema de información geográfica; razones por las que fueron considerados como referencia metodológica.

Preparación de datos

En la ciudad de Puerto Escondido se realizó un trabajo de investigación con el objetivo de identificar zonas susceptibles de movimiento de laderas por tipo de suelo, la metodología seleccionada se describe en la figura 1; como se menciona en la Justificación señalada en párrafos previos, se desarrolló con base en las propuestas por el CENAPRED y la SEGOB (2006) y por el INEGI (2011).

Para la selección del área de estudio (Subcuenca RH21Cb, San Pedro Mixtepec) se obtuvo la red hidrológica con escala 1:50,000, disponible en la página de internet del INEGI.

La revisión literaria inició con el análisis de las metodologías contextualizadas y descritas en la sección Justificación del método, siendo éstas las propuestas por el CENAPRED y SEGOB (2006) y el INEGI (2011). Se continuó con el estudio de los Atlas de los Municipios de San Pedro Mixtepec y Santa Ma. Colotepec (SEDESOL 2011), proporcionados por las autoridades. Así mismo, se consultaron diversos estudios de caso con condiciones similares a las de la presente investigación.

Las imágenes de satélite fueron obtenidas del Servicio Geológico Estadounidense (*United States Geological Survey*, USGS por siglas en inglés) cuyo sitio de internet es de libre acceso, el usuario sólo tiene que registrarse y seleccionar el área de estudio. El conjunto de datos utilizados data del año 2016 que es la información espacial más reciente con la que se dispone.

Del sitio de internet de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad se obtuvieron los archivos tipo *shape*; una vez que se ingresó al sitio de Geoinformación se eligió el contenido para posteriormente descargar la información, atendiendo a las coordenadas geográficas previamente elegidas.

La selección de capas con el SIG se basó en las metodologías propuestas por el CENAPRED (2001) y el INEGI (2011), las

cuales son instituciones que aplican variables físico-geográficas descritas en el párrafo de la Justificación del método del presente documento.

Para obtener el modelo de zonas susceptibles de movimiento de laderas por tipo de suelo, las variables físico-geográficas utilizadas fueron: la pendiente (inclinación de un elemento natural respecto a la horizontal), el tipo de suelo, la geología, la geomorfología y la precipitación.

El trabajo de campo se efectuó los días 6, 7 y 8 de julio del año 2016, en Puerto Escondido, y consistió, en una primera etapa, en una inspección física de la subcuenca RH21Cb, llamada San Pedro Mixtepec, para ello se hicieron recorridos a fin de reconocer visualmente la zona y comprobar información previa proporcionada por las autoridades de protección civil y habitantes que tienen asentadas sus viviendas en las zonas susceptibles de movimiento de laderas; se trató de determinar la relación causa-efecto y dar una explicación de lo observado, considerando de antemano que no es posible manipular directamente la variable, ni tampoco es posible tener el control absoluto de las mismas, como lo argumenta Ávila (2006). Con objeto de documentar la investigación se tomaron fotografías de los sitios (originalmente se contemplaron 39 en gabinete) considerados zonas susceptibles de movimiento de laderas sobre construcciones y casas de todo tipo de material, es decir, áreas drenadas por los cauces (Fig. 2). En las salidas efectuadas en compañía del personal de protección civil se corroboró que 31 muestras de entrenamientos son aptas para el estudio, dados su pendiente y suelos arenosos, elementos característicos físico-geográficos que influyen en el área susceptible. Así mismo, cabe señalar que en las selecciones observadas se sustrajo suelo (Norma NOM-021- RECNAT-2000) que se protegió en una bolsa plenamente identificada con datos básicos como: número de muestra, coordenadas obtenidas con el GPS (Global Position System), fotografías del lugar, fotografías de la muestra y la fecha de recolección (Figs. 3, 4 y 5).

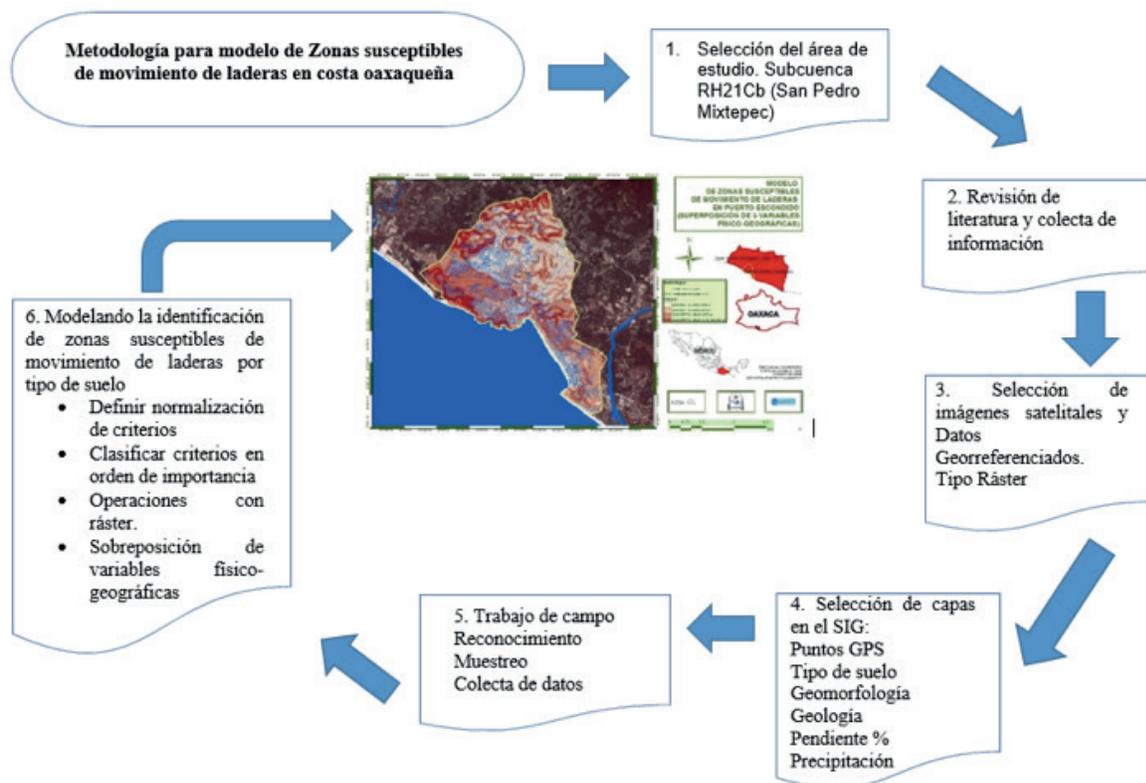


Figura 1. Metodología desarrollada para modelo de zonas susceptibles de movimientos de laderas en la costa oaxaqueña.

El GPS empleado fue el modelo eTrex 20, instrumento de verificación de datos básicos y temáticos, que sirvió como una forma sistemática para el levantamiento y verificación de información que posteriormente fue incorporada al SIG; la corrección diferencial se hizo con un error de <math><1\text{m}</math> del GPS.

Análisis multicriterio

La evaluación espacial multicriterio es un método de análisis y toma de decisiones integrado con bases de datos en un SIG, utiliza un conjunto de operaciones espaciales que considera simultáneamente las variables que intervienen. Las herramientas empleadas para dicha evaluación fueron aplicaciones como ArcGis y software libre, en algunos procesos. En este sentido, se utilizaron parámetros derivados de la elaboración o adecuación de cinco variables en capas (tipo de suelo, geomorfología, geología, pendiente y precipitación) cuya correlación se estudió desde el punto de

vista matemático. El análisis de estas complejas relaciones se simplificó a partir de superposiciones cartográficas con los sistemas de información geográfica; una vez integrado e interpretado ayudó a conformar las zonas susceptibles de movimiento de laderas (Fig. 6).

En el estudio que ahora nos ocupa se emplearon factores de susceptibilidad: tipo de suelo, geología, geomorfología, pendiente y de disparo; considerándose para este último caso, la precipitación. Cada factor se definió por el índice de influencia en determinado sitio de muestreo, otorgándole un peso específico ponderado, de acuerdo con una cierta susceptibilidad más propensa, lo que permitió obtener un valor relativo a ser susceptible.

Los cuadros I, II, III, IV y V describen la división del rango de valores obtenidos para cada variable, en cinco clases susceptibles acordes con las salidas hechas a campo. La

asignación calificativa de la susceptibilidad es una representación cualitativa de los diferentes niveles de amenaza.

De conformidad con la propuesta formulada por Saaty (1984), se estableció la escala

común de clasificación para cada parámetro, posteriormente se procesó la matriz de pares, la cual se basa en una técnica de comparación y conjunto de pesos de medida determinados por especialistas en el tema (se entrevistaron a cinco personas). Una vez realizada la consulta

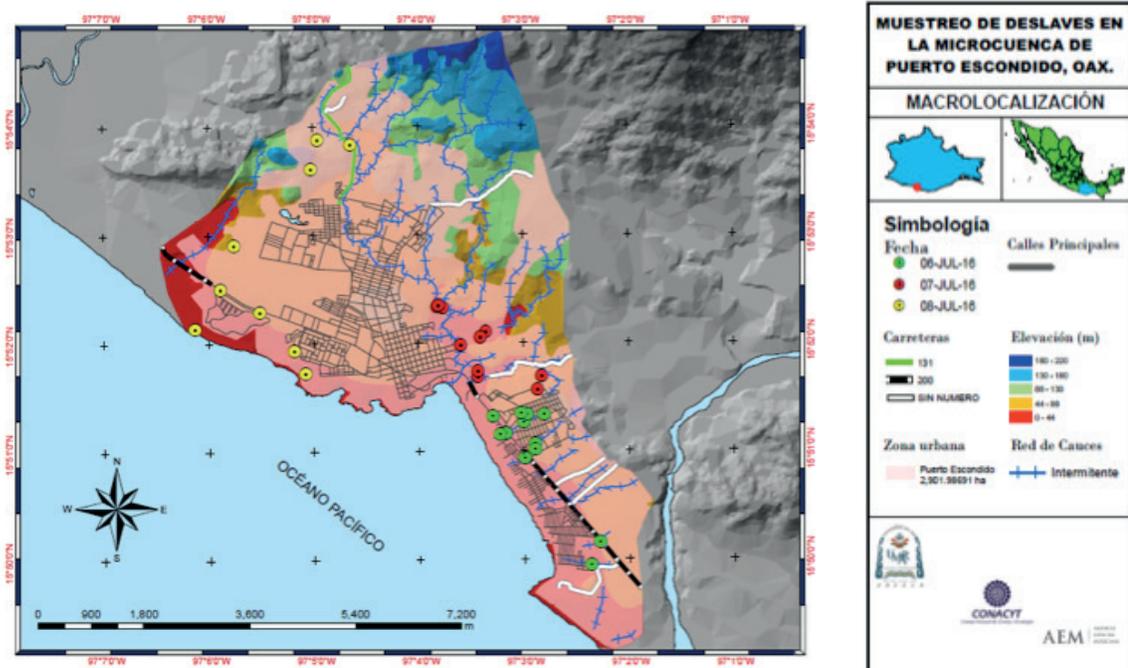


Figura 2. Mapa muestreo de deslaves (Elaborado por Edith Galván Ochoa).



Figura 3. Mapa muestreo sureste, 6 de julio 2016 (Elaborado por Edith Galván Ochoa).



Figura 4. Mapa muestreo centro, 7 de julio 2016 (Elaborado por Edith Galván Ochoa).



Figura 5. Mapa muestreo noroeste, 8 de julio 2016 (Elaborado por Edith Galván Ochoa).

a expertos se calculó el peso específico para cada factor cuya suma debe totalizar uno (Caloni 2010), es decir, cada peso representa un porcentaje.

La fórmula utilizada para el cálculo es:

$$\text{Normalización} = \frac{\text{Valor del criterio}}{\text{Valor más alto} - \text{valor más bajo}}$$

El cálculo de la susceptibilidad se basó en el trabajo de Mujica & Pacheco (2013), representado por una suma ponderada, la cual está dada por el peso o grado de influencia de cada variable en porcentaje, de acuerdo con su propensión a generar procesos de movimiento de laderas, empleando el método estadístico multivariado con una cierta aproximación semicuantitativa.

La capa fue cruzada a través de álgebra de mapas considerando la columna de pesos ponderados obtenidos de la matriz analítica. El algoritmo utilizado fue el siguiente:

$$\text{Susceptibilidad} = \frac{(\text{Grid 1}) + (\text{Grid 2}) + (\text{Grid 3}) + (\text{Grid 4}) + (\text{Grid 5})}{5}$$

Donde:

Susceptibilidad es el área homogénea, zona susceptible de movimiento de laderas.

Grid 1 = Geología,

Grid 2 = Pendiente,

Grid 3 = Geomorfología,

Grid 4 = Precipitación,

Grid 5 = Tipo de suelo.

Resultados

El asentamiento urbano de Puerto Escondido y el límite de la subcuenca RH21Cb

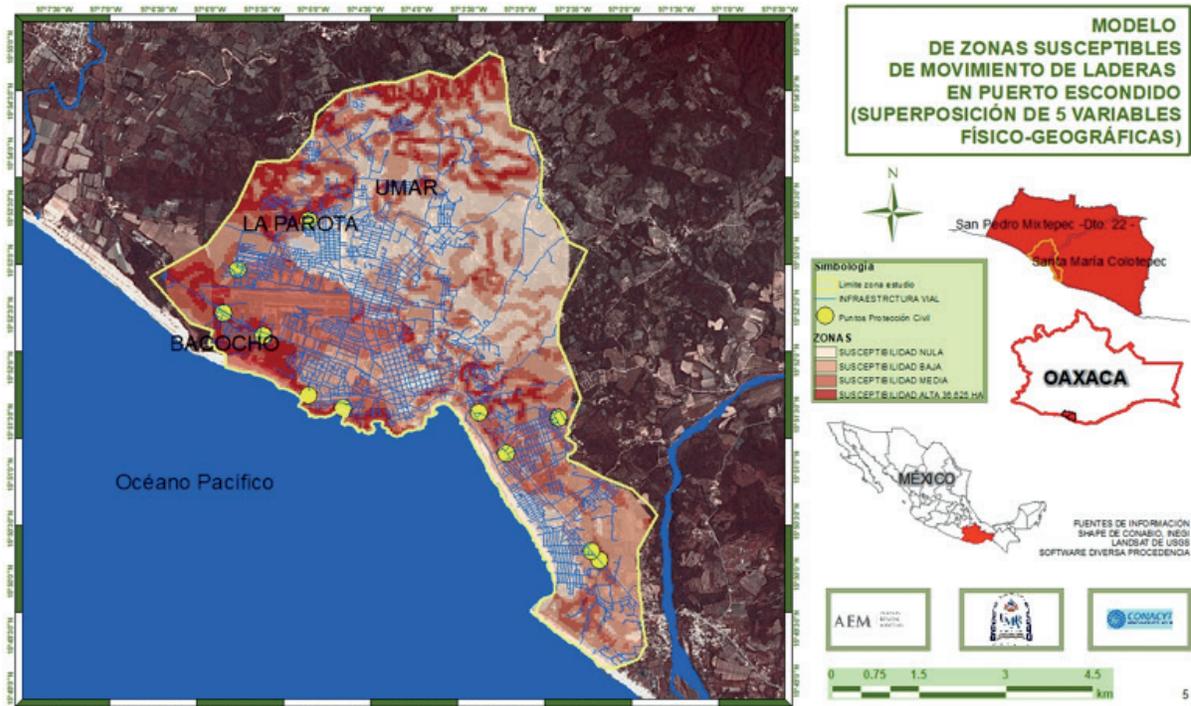


Figura 6. Modelo de zonas susceptibles de movimiento de laderas en Puerto Escondido (superposición de cinco variables físico-geográficas).

Cuadro I. Variable: tipo de suelo.

Variable en gabinete		
Tipo	Atributo	Ponderación
Tipo de suelo	Regosolo eutrico, textura gruesa, fase sódica	3
	Regosol eutrico textura gruesa, fase lítica	4
	Cambisol, textura media, fase litica	5

Nota: El más alto representa la mayor susceptibilidad de movimiento de laderas.

Fuente: Mujica & Pacheco 2013.

Cuadro II. Variable: geomorfología.

Variable en gabinete		
Tipo	Atributo	Ponderación
Geomorfología	N/CI	1
	Metamórfica	2
	Sedimentaria	3

Notas: N/CI No clasificada

El más alto representa la mayor susceptibilidad de movimiento de laderas.

Fuente: Mujica & Pacheco 2013.

Cuadro III. Variable: geología.

Variable en gabinete		
Tipo	Atributo	Ponderación
Geología	N/CI	1
	Litoral	2
	Aluvial	3
	Granito-Granodiorita	4
	Gneiz	5
	Caliza	6
	Conglomerado	7

Notas: N/CI No clasificada.

El más alto representa la mayor susceptibilidad de movimiento de laderas.

Fuente: Mujica & Pacheco 2013.

Cuadro IV. Variable: pendiente.

Variable en gabinete		
Tipo	Atributo	Ponderación
Pendiente %	0 - 1.4	1
	1.5 - 3.7	2
	3.8 - 6.4	3
	6.5 - 10	4
	11 - 21	5

Nota: El más alto representa la mayor susceptibilidad de movimiento de laderas.

Fuente: Mujica & Pacheco 2013.

Cuadro V. Variable: Precipitación.

Variable en gabinete		
Tipo	Atributo	Ponderación
Precipitación	77-80	1
	81-82	2
	83-84	3
	85-85	4
	86-86	5

Nota: El más alto representa la mayor susceptibilidad de movimiento de laderas.

Fuente: Mujica & Pacheco 2013.

tienen una orientación inclinada, derivada del tipo de relieve que va de 0 a 700 msnm, aproximadamente. Resulta significativo que la urbanización está creciendo al lado noroeste-noreste, como en forma de abanico, con orientación noroeste, de acuerdo con la inspección visual hecha en la imagen de satélite, lo cual también sirve de argumento para corroborar lo hecho en el proceso de gabinete al aplicar la fórmula de susceptibilidad.

La susceptibilidad nula, baja, media y alta se refiere a las zonas con condiciones extremas de acuerdo con los datos y los métodos matemáticos sencillos aplicados en esta investigación.

En el trabajo de campo se localizaron 39 puntos de los cuales 31 fueron considerados zonas susceptibles de movimiento de laderas,

determinadas de acuerdo con criterios hechos en el terreno, consultas en gabinete y procesos algebraicos aplicados. La fórmula de susceptibilidad sirvió para identificar lugares homogéneos, es decir, con el valor más alto; para este tipo de zonas es evidente la marcada fragilidad de las variables de precipitación y tipo de suelo arenoso en Puerto Escondido.

De conformidad con los resultados cartografiados impresos, los modelos de zonas susceptibles de movimiento de laderas, basados en el análisis multicriterio para toda la zona de interés, identifican a las áreas homogéneas hacia el noroeste (Colonia La Parota, la zona de Bacocho, el Aeropuerto Internacional de Puerto Escondido; se estiman 36.625 hectáreas

con alta prioridad), el centro queda susceptible en categoría media y el sureste como baja.

Discusión

La presente investigación es un primer análisis de susceptibilidad de movimiento de laderas provocado por la precipitación y el tipo de suelo en Puerto Escondido, Oaxaca; el objetivo general propuesto para la misma se centró en la identificación de las zonas antes mencionadas, así como su representación cartográfica. Se estimaron 36.625 hectáreas catalogadas como de prioridad alta, es decir, zonas susceptibles de movimiento de laderas; algunas de las colonias y sitios de interés ubicados en éstas son: La Parota, Fraccionamiento Bacocho y el Aeropuerto Internacional de Puerto Escondido.

La derivación de lo anterior es relevante porque el estudio de este fenómeno puede coadyuvar en la prevención y protección de la integridad y actividad de la población, así como del entorno natural; no debemos olvidar que la ciudad de Puerto Escondido es un polo de desarrollo turístico que recibió en el año 2016 (últimos datos disponibles) 367,301 turistas nacionales e internacionales (Secretaría de Turismo 2017); así mismo, en el mes de noviembre se lleva a cabo el Torneo Internacional de Surf al que asisten deportistas de talla mundial provenientes de Australia, Hawái y Japón, entre otros países, lo cual tiene un impacto considerable en el desarrollo socio-económico en los ámbitos local, regional y nacional.

En otro orden de ideas, los métodos empleados en la elaboración de este trabajo de investigación ayudan a conocer zonas susceptibles de movimiento de laderas; sin embargo, de manera natural involucra incertidumbre porque son sólo modelos que representan una aproximación a la realidad y expresan la necesidad de seguir realizando investigaciones detalladas que permitan comprender la dinámica original de desniveles, la fuerte influencia de los elementos físico-geográficos y acciones antrópicas.

Por último, es menester resaltar que hacen falta estudios complementarios multidisciplinarios que consideren la interacción con el medio físico, el crecimiento urbano, así como algunos otros elementos no contemplados en el presente documento como: crecimiento de la población; de los bienes y servicios; ocurrencia de desastres que depende de la configuración, características y dinámica.

Agradecimientos

Agradecemos al Fondo Sectorial de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación en Actividades Espaciales, CONACYT-AEM por el financiamiento otorgado. A dos revisores anónimos que contribuyeron a mejorar la calidad del presente manuscrito.

Referencias

- Aceves Quesada, J., Legorreta Paulin, G., Lugo Hubp, J., Umaña Romero, J. & H. Legorreta Cuevas. 2016. Sistemas de Información Geográfica y cartografía geomorfológica aplicados al inventario de deslizamiento y cartografía de susceptibilidad en la cuenca del río El Estado, Pico de Orizaba, México. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía*. UNAM, 43-55.
- Alcántara Ayala, I., & F. Murillo García. 2008. Procesos de remoción en masa en México: hacia una propuesta de elaboración de un inventario nacional. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía UNAM(66)*, 47-64.
- Anónimo. 2012. *Atlas de Riesgo del Municipio de San Pedro Mixtepec*. Gobierno Prevención de Riesgos. San Pedro Mixtepec: Prevención de Riesgos. SEDESOL.
- Anónimo. 2013. *Diccionario de datos de Inventario Nacional Fenómenos Geológicos escala 1:250,000*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascaliente: INEGI.
- Ávila Baray, H. 2006. Introducción a la metodología de la investigación. Recuperado el 21 de Septiembre de 2017
- Barrantes Castillo, G., Barrantes Sotela, O. & O. Nuñez Roman. 2011. Efectividad de la metodología MORVAHRSO Modificada en el caso de los deslizamientos provocados por el terremoto de Cinchona, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 2(162), 141-162.
- Broeckx, J., Vanmaercke, M., Duchateau, R. & J. Poesen. 2018. A data-based landslide susceptibility map of Africa. *Earth-Science Reviews*, 102-121.
- Caloni, N. 2017. *Files Especialización*. Obtenido de <http://files.especializacion-tig.webnode.com/>

- 200000744-52cdb53c9c/03ppt_ANALISIS%20ESPACIAL%20CON%20SIG%20RASTER%20%5BModo%20de%20compatibilidad%5D.pdf:http://files.especializacion-tig.webnode.com/200000744-52cdb53c9c/03ppt_ANALISIS%20ESPACIAL%20CON%20SIG%20RASTER%20%5BModo%20de%20compatibilidad%5D.pdf
- Castro, C. & P. Vicuña. 1990. Caracterización de la erosión lineal en planicies costeras en Chile Central. *Revista de Geografía Norte Grande* (17). Obtenido de http://revistanortegrande.cl/archivos/17/05_17_1990.pdf.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). 2001. *Inestabilidad de Laderas*. Serie Fascículos. México: Secretaría de Gobernación.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). 2012. Regiones Potenciales de Deslizamiento de laderas en México. México, México: CENAPRED.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) & Secretaría de Gobernación (SEGOB). 2006. *Guía básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos*. México: CENAPRED-SEGOB.
- Di Salvo, C., Pennica, F., Ciotolo, G. & G. Cavinato. 2018. A GIS-based procedure for preliminary mapping of pluvial flood risk at metropolitan scale. *Environmental Modelling & Software*, 64-84.
- Forestales, I. N. & la, B. C. 10 de 07 de 2001. 'Mapa Edafología'. Escalas 1:250000 y 1:1000000. México. México: INEGI-INIFAP-CONABIO.
- González-Arqueros, M., Mendoza, M., Bocco, G. & B. Solíz Castillo. 2018. Flood susceptibility in rural settlements in remote zones: The case of a mountainous basin in the Sierra-Costa region of Michoacán, Mexico. *Journal of Environmental Management*, 685-693.
- Intituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2011. *Vulnerabilidad de la población ante peligros naturales*. México, D. F.: INEGI.
- International Union of Soil Sciences (IUSS). Grupo de Trabajo WRB. 2007. *Base Referencial Mundial del Recursos Suelo. Primera actualización 2007*. Roma: Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103.
- Mora, S., & W. Vahrson. 1991. Determinación a priori de la amenaza de deslizamientos sobre grandes áreas, utilizando indicadores morfodinámicos. *Memoria sobre el Primer Simposio*, (págs. 259-273). Bogotá, Colombia.
- Mujica S. & H. Pacheco. 2013. Metodología para la generación de un modelo de zonificación de amenaza por procesos de remoción en masa, en la cuenca del río Camurí Grande, estado Vargas, Venezuela. *Revista de Investigación N° 80 Vol. 37 Septiembre – Diciembre 2013*.
- Muñiz-Jáuregui, J. A. Q., & V. M. Hernández-Madrugal. 2012. Zonificación de procesos de remoción en masa en Puerto Vallarta, Jalisco, mediante combinación de análisis multicriterio y método heurístico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29(1), 103-114.
- Naidu, S., Sajinkumar, K., Oommen, T., Anuja, V., Samuel, R., & C. Muraleedharan. 2018. Early warning system for shallow landslides using rainfall threshold an slope stability analysis. *Geoscience Frontiers*, 1871-1882.
- Paz Tenorio, J., Gonzalez Herrera, R., Gómez Ramírez, M., & J. Velasco Herrera. 2017. Metodología para elaborar mapas de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, análisis de caso ladera sur de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Investigaciones Geográficas*(92), 1-16.
- Ridha Mezaal, M., & P. Biswajeet. 2018. An improved algorithm for identifying shallow and deep-seated landslides in dense tropical forest from airborne laser scanning data. *Catena*, 147-159.
- Saaty, T. 1984. *Décider face à la complexité*. París: Entreprise Moderne d'Édition.
- Samodra, G., Chen, G., Sartohade, J., & K. Kasama. (2018). Generating landslide inventory by participatory mapping: an example in Purwosari Area, Yogyakarta, Java. *Geomorphology*, 306-313.
- Santé, R. I. & M. R. Crecente. 2005. Evaluación de métodos para la obtención de mapas continuos de aptitud para uso agroforestales. *GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Teconología de la Información Geográfica* 5: 40-68.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 05 de 07 de 2001. Inventario Nacional de Gran Visión, 1991-1992; Uso de suelo y vegetación. SARH-INEGI.
- Secretaría de Desarrollo Social. 2011. *Atlas de Reisos Santa María Colotepec*. Gobierno del Estado de Oaxaca. Prevención de Riesgos. Santa María Colotepec: Prevencion de Riesgos SEDESOL.
- Secretaría de Turismo. 2017. *Anuario Estadístico y Geográfico de Oaxaca 2017* [en línea]. SECTUR. Disponible en internet: Base de datos SECTUR. https://www.data-tur.sectur.gob.mx/ITxEF/ITxEF_OAX.aspx.
- Suárez, J. 1998. *Deslizamiento y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Colombia: Bucaramanga.
- Zhu, A.-X., Miao, Y., Yang, L., Bai, S., Liu, J. & H. Hong, H. 2018. Comparison of the presence-only method and presence-absence method in lanslide susceptibility mapping. *Catena Elsevier*, 222-233.

UNIVERSIDAD DEL MAR

Campus Puerto Ángel

División de Estudios
de Posgrado



Doctorado en Ecología Marina

Líneas de investigación:

- Ecología Marina
- Ecología de Peces y Biología pesquera
- Ecología de Tetrápodos Marinos
- Ecología y Taxonomía del Bentos
- Flujos de carbono en el Océano y Contaminación Marina
- Hidrodinámica de la Zona Costera
- Manejo de Recursos Marinos
- Taxonomía, Biogeografía y Ecología de Arrecifes Coralinos



Maestría en Ciencias: Ecología Marina



Doctorado en Ciencias Ambientales

Líneas de investigación:

- Análisis Químico de Contaminantes
- Biorremediación
- Diseño de Sistemas de Tratamiento
- Fenómenos de Transporte
- Gestión Ambiental
- Ingeniería Ambiental
- Química de Productos Naturales
- Simulación y Control de Procesos
- Técnicas Electroquímicas
- Toxicología Ambiental



Maestría en Ciencias Ambientales

Áreas de concentración:
Química Ambiental
Ingeniería Ambiental

Informes

Dr. Miguel Ángel Ahumada Sempol
Jefe de la División de Estudios de Posgrado
Tel. (958) 584 3057 Ext. 111
Fax. (958) 584 3078
posgrado@huatulco.umar.mx

www.umar.mx