



Certificación ISO 9001:2008 ‡

Establecer la vulnerabilidad y evaluar el riesgo por deslizamientos, inundaciones pluviales y socavación de puentes en la Red Federal de Carreteras

Juan Carlos Vázquez Paulino

Miguel Ángel Backhoff Pohls

Jonatan Omar Gonzalez Moreno

Elsa María Morales Bautista

**Publicación Técnica No. 470
Sanfandila, Qro., 2016**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

Establecer la vulnerabilidad y evaluar el riesgo por deslizamientos, inundaciones pluviales y socavación de puentes en la Red Federal de Carreteras

Publicación Técnica No. 470
Sanfandila, Qro, 2016

Esta investigación fue realizada -en coautoría con el Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente A.C.- en la Coordinación de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geoespaciales por el Lic. Juan Carlos Vázquez Paulino en colaboración con el M. en Geog. Miguel Ángel Backhoff Pohls, Jefe de la Unidad de Sistemas de Información Geoespacial; la M. en S.C. Elsa María Morales Bautista y el M. en C. Jonatan Omar González Moreno, investigadores de la misma unidad.

Contenido

Resumen		iv
Abstract		v
Introducción		6
Capítulo 1.	Marco teórico	11
	1.1 Agentes perturbadores	12
	1.2 Vulnerabilidad	14
	1.3 Riesgo	16
	1.4 Socavación	17
Capítulo 2.	Metodología	
	2.1 Fase 1. Recopilación de información geoespacial y bases de datos actualizadas	19
	2.2 Fase 2. Revisión y utilización de los datos del Centro Mario Molina A.C.	20
	2.2.1 Análisis de datos	21
	2.3 Fase 3. Correlación espacial de la Red Federal de Carreteras con la información sobre deslizamientos e inundaciones	22
	2.3.1 Cálculo de variables de deslizamiento e inundación	25
	2.3.2 Cálculo de variables de socavación	34
	2.4 Fase 4. Determinación de la vulnerabilidad de tramos afectados y expuestos a deslizamientos e inundaciones	36
	2.5 Fase 5. Generación de mapas digitales de caracterización	45
Capítulo 3.	Conclusiones	67
Bibliografía		70



Resumen

Cada año en México, durante la temporada de lluvias se generan daños a la población y a la infraestructura que se encuentra cercana a los ríos, arroyos, zonas de laderas y de inundación; y que debido a la intensidad, fuerza y concentración del agua de lluvia pudieran ser susceptibles de deslizarse, desbordarse y -de este modo- afectar tanto a las personas como dañar las obras construidas; sean estas viviendas, escuelas, hospitales, carreteras, etc.

Es primordial contar con información detallada, actualizada, precisa y confiable que permita identificar la ubicación, cantidad y características de la infraestructura carretera. Una vez obtenida la información, desarrollaremos un método indirecto para determinar la vulnerabilidad y evaluar el riesgo relacionado con deslizamientos potenciales, inundaciones pluviales; así como el desarrollo de un método de identificación de socavación en puentes, por parte del Centro Mario Molina A.C.

Para el desarrollo de la metodología, seleccionaremos características técnicas de las carreteras y a partir de estas, serán calculadas las ponderaciones y posteriormente utilizaremos el análisis geoespacial para identificar los tramos de carretera con mayor vulnerabilidad a deslizamientos e inundaciones pluviales. De este modo, los resultados podrán ser utilizados para diseñar políticas sectoriales enfocadas al proceso de gestión, construcción y mantenimiento de la infraestructura carretera; desde el punto de vista de la vulnerabilidad a los tipos de evento descritos anteriormente.

Abstract

Every year in Mexico, during the rainy season damage to the population and infrastructure located near rivers, streams, hillsides and flood are generated, and because of the intensity, strength and concentration of rainwater , could be susceptible to slip, overflow and thus affect both people and damaging the constructed works, whether these homes, schools, hospitals, roads, etc.

It is essential to have detailed information, date, accurate and reliable to identify the location, quantity and characteristics of the road infrastructure. Once the information, an indirect method was developed to determine the vulnerability and assessing risk related to potential landslides, flooding rain, and the development of a method of identifying scour at bridges by Centro Mario Molina A.C.

For the development of the methodology technical characteristics of roads were selected and from these, weights were calculated and then geospatial analysis is used to identify road sections more vulnerable to landslides and flooding rain. Thus, the results may be used to design public policies focused on process management, construction and maintenance of road infrastructure from the point of view of vulnerability to the event types described above.

Introducción

Desde que son construidos carreteras y puentes, en México, en cada temporada de lluvias -y sobre todo cuando estas son en una cantidad y frecuencia que exceden el promedio- se generan daños en algunos tramos de carreteras así como en la infraestructura asociada en aquellos lugares donde existen ríos, arroyos, zonas de laderas y de inundación que podrían ser susceptibles de desbordarse, deslizarse o caer sobre la carretera, y de inundarse o cubrir completamente la carretera; por ejemplo, entre el 13 y el 20 de septiembre del 2013, en el Pacífico mexicano se formó el decimosexto ciclón tropical de la temporada de huracanes en dicho océano, en el 2013; Manuel¹ fue el más destructivo de dicha temporada. Afectó principalmente el sur-suroeste y occidente de México (en especial la costa de Guerrero). Casi al mismo tiempo se formó en el Golfo de México el huracán Ingrid (12 – 17 de septiembre) y aunque no fue el más intenso, sí fue el más destructivo de la temporada de huracanes en el Atlántico durante el 2013. Entre estos dos huracanes provocaron lluvias intensas en por lo menos 22 estados del país. Distintas fuentes dan las siguientes cifras aproximadas: 123 muertos, 33 heridos, 68 desaparecidos, 59,000 desalojados y por lo menos 200,000 personas afectas, así como 35,000 viviendas dañadas.²

En la zona de Acapulco Diamante quedaron varados 40,000 turistas; hubo que rescatarlos usando helicópteros y tender un puente aéreo para que pudieran

¹ Inició como depresión tropical, pasó por tormenta tropical, se debilitó a depresión tropical, se intensificó y volvió a ser tormenta; y al final huracán categoría 1 de la Escala de Huracanes Saffir-Simpson. Tocó tierra en dos ocasiones, la primera a 20 km de Manzanillo, Colima; la segunda, a 150 km de Los Mochis, Sinaloa.

www.cenapred.gob.mx/es/documentosWeb/Publicaciones/informe_de_actividades2013.pdf

<http://www.nhc.noaa.gov/archive/2013/MANUEL.shtml?>

² Álvaro Delgado (2013). Proceso (ed.): «[Suman 123 muertos por lluvias, hay daños en 26 estados, reporta Segob](#)»

regresar a sus ciudades de origen, varios días después de que sucedió el evento; esto debido a que el aeropuerto sufrió severas inundaciones y se mantuvo cerrado.³

La SCT -en su comunicado 214, del 18 de septiembre- reportó 91 carreteras y autopistas federales afectadas por las lluvias, entre ellas la Autopista del Sol -en el tramo de Acapulco a Tierra Colorada, con más de 20 cortes a la circulación por deslaves y derrumbes así como dos túneles colapsados- la carretera Ixtapa – Zihuatanejo, colapso del puente Coyuca de Benítez en la Acapulco – Zihuatanejo, , carretera Oaxaca – Puerto Escondido; derrumbes, deslaves y afectaciones diversas en la carretera Siglo XXI, carretera Cd. Victoria – Monterrey, carretera Durango – Mazatlán, carretera Pachuca – Tuxpan, etc. ⁴ Y de acuerdo con el titular de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, requerirían más de 4,000 millones de pesos para reconstruir las carreteras afectadas. ⁵

Por otro lado, el 12 de abril de 2013, el *Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente A.C.* suscribió el convenio de colaboración IMT-Q-CG-02-13 con el IMT, el cual tiene como objetivo “*desarrollar programas de intercambio y colaboración mutua que contribuyan al mejor logro de los propósitos que cada una persigue y para lograr el cumplimiento de este objetivo, ambas partes realizarán las acciones que le correspondan, en temas de interés común para asimilar, adaptar y desarrollar tecnología para la planeación, estudio y proyecto, construcción, conservación, reconstrucción y operación de la infraestructura del transporte*”. Para esto, desarrollaremos los anexos en donde serán detalladas las acciones llevadas a cabo en forma concreta para la

³ <http://www.excelsior.com.mx/nacional/2013/09/18/919076>

⁴ <http://www.sct.gob.mx/despliega-noticias/article/91-carreteras-y-autopistas-federales-afectadas-por-ingrid-y-manuel-en-el-pais-ruiz-esparza/>

⁵ <http://mexico.cnn.com/nacional/2013/10/26/reconstruir-carreteras-de-guerrero-costara-4000-millones-de-pesos>

elaboración de proyectos conjuntos entre ambas instituciones⁶. En el Centro *Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente A.C.* han aplicado la *Metodología para determinar el peligro de deslizamientos*, así como la *Metodología para delimitar áreas con peligro por inundación pluvial*, y que forman parte de la Información Estratégica para la Adaptación al Cambio Climático. Es así como se ha generado información diversa entre la que destacan deslizamientos, inundaciones pluviales y periodos de retorno de lluvias.⁷

Así mismo, en el proyecto EE17/10 *Discriminación de puentes de la DGCC/SCT con alta probabilidad de socavación*, realizado en el IMT, y aplicando técnicas de análisis geoespacial y relacionando la base de datos del SIPUMEX 2009⁸ con factores medioambientales; fueron identificados los puentes de la red de carreteras libres federales a cargo de la DGCC/SCT que presenten alta probabilidad de socavación en sus cimientos. El reporte final del proyecto menciona la “*exigencia de profundizar en la caracterización de las variables a nivel local para determinar y dimensionar el riesgo por socavación de los puentes de México*”⁹ y que “*en los últimos cinco años, la Dirección General de Conservación de Carreteras (DGCC), de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), ha observado un incremento en el número de puentes de carreteras federales con problemas de socavación*”.¹⁰ Y esto “*puede deberse a un incremento en el número de actividades meteorológicas fuera de los tiempos de retorno regularmente utilizados en el diseño hidráulico de los puentes, pero también a*

⁶ Convenio de colaboración No. IMT-Q-CG-02-13; Anexo 1, “Riesgo de puentes carreteros prioritarios en México ante potenciales avenidas en cauces de ríos y arroyos”

⁷ <http://centromariomolina.org/cambio-climatico/>

⁸ Sistema de Puentes Mexicanos. Subsecretaría de Infraestructura. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. México. 2009

⁹ Conclusiones y recomendaciones, pag. 46. Informe final de Investigación EE17_10_Socavación_13Abr12.doc

¹⁰ Resumen ejecutivo, pag. 3. Informe final de Investigación EE17_10_Socavación_13Abr12.doc

malas prácticas de diseño, al no considerar las lluvias extraordinarias producto del cambio climático actual.”¹¹

En la búsqueda de información que sustente el proyecto propuesto, encontramos el *Programa Especial de Cambio Climático 2014 – 2018 (PECC)* publicado en el Diario Oficial de la Federación, el día 28 de abril de 2014; en donde se describen los objetivos, estrategias, acciones y metas para enfrentar el cambio climático; mediante la definición de prioridades en materia de *“adaptación, mitigación, investigación, así como la asignación de responsabilidades, tiempos de ejecución, coordinación de acciones y de resultados y estimación de costos, de acuerdo con la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC).”¹²*

El PECC contribuye con diversos programas sectoriales de las secretarías de Estado que conforman la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC) y sus respectivos objetivos; en forma específica para el *Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes 2013-2018*, y particularmente con su objetivo No. 3: *“Generar condiciones para una movilidad de personas integral, ágil, segura, sustentable e incluyente, que incremente la calidad de vida”*. Asimismo, en la *Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC)*, en el capítulo 5. *Pilares de la política nacional de cambio climático*, el párrafo Investigación, desarrollo y adopción de tecnologías indica que la *“investigación sobre los efectos del cambio climático, el desarrollo de la tecnología de mitigación y la identificación de las mejores prácticas para enfrentar los efectos de este fenómeno deberán estar integrados dentro de una plataforma”*. Y que esta debe tener como objeto *“integrar el conocimiento generado y se tiene que incluir la investigación sobre gestión del territorio; el análisis de vulnerabilidad de la población y la identificación de obras; los inventarios de infraestructura y sus elementos asociados, esto mediante*

¹¹ Ibidem

¹² http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5342492&fecha=28/04/2014

consorcios de investigación que favorezcan la coordinación efectiva entre instituciones académicas y de investigación, públicas, privadas, nacionales y extranjeras". Lo anterior es muy importante debido a que cada secretaría de Estado y sus dependencias están obligadas a alinear sus programas de trabajo, proyectos y metas, a los objetivos y prioridades de la planeación nacional de desarrollo¹³; y para los fines del proyecto, el incremento en el número de huracanes, las lluvias ocasionadas, el aumento en el caudal de los ríos, la socavación generada por la fuerza del agua y el material arrastrado, los deslizamientos de laderas y la generación de áreas de inundación son algunas de las consecuencias del cambio climático.

Por lo anteriormente expuesto, es de vital importancia contar con información fidedigna, actualizada, precisa y compatible que sea de utilidad para conocer la ubicación de la infraestructura carretera que se encuentre expuesta a diversos peligros; como los deslizamientos potenciales de tierras, las inundaciones y la socavación en los puentes. Y de esta manera podremos diseñar acciones que permitan actuar en la medida de lo posible antes de que suceda el evento o, en otras palabras, al conocer dónde y qué se encuentra expuesto, será posible prevenir los futuros daños que podrían suceder el presentarse algún evento natural desastroso; para esto será necesario diseñar planes de manera correcta.

¹³ Programa especial de cambio climático - 2014-2018 - Plan Nacional de Desarrollo 2013 - 2018

1 Marco teórico

En la actualidad, existen diversas definiciones sobre los temas relacionados con peligro, riesgo, vulnerabilidad y desastres. Los autores de estos conceptos van ajustándolos a sus áreas de estudio o de interés, conforme va transcurriendo el tiempo y se generan nuevos conocimientos y conceptualizaciones sobre estos temas.

En este capítulo serán retomados algunos de estos conceptos y su relación entre sí, para de este modo sentar las bases teóricas acerca del tema de investigación.

El desastre es, de acuerdo con Omar Darío Cardona¹⁴, *un evento o suceso que ocurre, en la mayoría de los casos, en forma repentina e inesperada, causando sobre los elementos sometidos alteraciones intensas, representadas en la pérdida de vida y salud de la población, la destrucción o pérdida de los bienes de una colectividad y/o daños severos sobre el medio ambiente*. Esta situación significa la desorganización de los patrones normales de vida; genera adversidad, desamparo y sufrimiento en las personas, efectos sobre la estructura socioeconómica de una región o un país o la modificación del medio ambiente; lo anterior determina la necesidad de asistencia y de intervención inmediata.

Los desastres pueden ser originados por un fenómeno natural, provocados por el hombre, o ser consecuencia de una falla de carácter técnico en sistemas industriales.

Existen diversos tipos de peligros, sean estos naturales, tecnológicos y sociales; la definición es “el grado de amenaza potencial para un lugar o asentamiento

¹⁴ Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo. 1993.
<http://www.desenredando.org/public/libros/1993/ldnsn/html/cap3.htm>

humano medida en cierto periodo”¹⁵. También es definido como “la magnitud y duración de una fuerza o energía potencialmente peligrosa que tiene la capacidad de destruir o desestabilizar un sistema”¹⁶.

Por ejemplo, las lluvias pueden provocar peligro de inundación; los sismos pueden ocasionar movimientos fuertes del terreno y estos -a su vez- peligro de deslizamientos y de avalanchas.

En este punto es necesario identificar cuáles son los fenómenos naturales y antrópicos que pudieran afectar una zona, región, estado o país.

1.1 Agentes perturbadores

En México, el Sistema Nacional de Protección Civil reconoce, de acuerdo con su origen, los siguientes agentes perturbadores:

- Fenómenos geológicos, son aquellos fenómenos en los que intervienen la dinámica y los materiales del interior o superficie de la tierra; los cuales son:
 - Sismicidad
 - Vulcanismo
 - Maremotos
 - Movimientos de laderas y suelos

¹⁵ Documento “El impacto de los desastres naturales en el desarrollo: Documento metodológico básico para estudios nacionales de caso”. CEPAL. 14 diciembre 2005. También se puede consultar la Estrategia Internacional para la Reducción de los Desastres de Naciones Unidas: <http://www.eird.org/esp/terminologia-esp.htm>

¹⁶ Políticas públicas para la reducción de la vulnerabilidad frente a los desastres naturales y socio-naturales. Jorge Enrique Vargas. Serie Medio Ambiente y Desarrollo. CEPAL. ONU. Chile. Abril 2002

- Fenómenos hidrometeorológicos, son los que se generan por la acción extrema de los fenómenos atmosféricos; siguen los procesos de la climatología y del ciclo hidrológico, entre ellos:
 - Lluvias
 - Granizadas
 - Nevadas
 - Heladas
 - Sequias

- Fenómenos químicos, son los asociados a la producción, manipulación, almacenamiento y transportación de sustancias químicas, tales como:
 - Derrame
 - Fuga
 - Incendio
 - Explosión

- Fenómenos sanitario-ambientales, son los eventos relacionados con la contaminación, la actividad agrícola y la salud
 - Contaminación ambiental
 - Desertificación
 - Epidemias

- Socio-organizativos, se dan en el marco de grandes concentraciones o movimientos masivos de población, puede ser motivada por errores humanos o acciones premeditadas.
 - Accidentes
 - Grandes concentraciones de población
 - Sabotaje o terrorismo

1.2 Vulnerabilidad

La vulnerabilidad es definida como la disposición interna a ser afectado por una amenaza; por lo que sin vulnerabilidad no existe la pérdida, daño o destrucción. También se define como “las características y las circunstancias de una comunidad, sistema o bien que los hacen susceptibles a los efectos dañinos de una amenaza”¹⁷. Se expresa en escalas desde 0 (sin daño) hasta 1 (pérdida total).

De acuerdo con el documento *Políticas públicas para la reducción de la vulnerabilidad frente a los desastres naturales y socio-naturales*, la vulnerabilidad depende de los siguientes factores:

- *Grado de exposición* que es el tiempo y modo en que se somete un sistema a los efectos de una actividad potencialmente peligrosa, esto es, cuánta energía potencialmente destructiva recibe y por cuánto tiempo.
- La *Protección* son las defensas del sistema que permiten reducir o eliminar la afectación que podría causar una actividad con potencial destructivo.

¹⁷ Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastres. Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres. Naciones Unidas. 2009

- La *Reacción inmediata* es la capacidad del sistema para reaccionar, protegerse y eliminar el daño en el momento en que se desencadena la energía con potencial destructivo.
- La *Recuperación básica* es el restablecimiento de las condiciones esenciales de subsistencia de los componentes del sistema.
- *Reconstrucción* es cuando se recupera el equilibrio y las condiciones normales del sistema, su retorno a la condición previa o algo deseable sería a una nueva condición más evolucionada y menos vulnerable.

Por ejemplo, para el caso de las carreteras, se detalla un ejemplo de la amenaza de deslizamiento y que factores la ocasionan:

- Toda la carretera se encuentra en un área de riesgo, por la fuerte pendiente que presenta; algunas secciones tienen taludes inestables que es donde se podría desplazar una cantidad de tierra y del mismo modo existen secciones en donde no hay taludes y será menos probable el deslizamiento (alto y bajo *grado de exposición* al mismo tiempo)
- Existen algunos bosques o barreras naturales que podrían servir como medios para detener para el deslizamiento; del mismo modo, las barreras o muros de contención podrían proteger a la carretera (*protección*)
- Siempre se ha mencionado que existe la posibilidad de un deslizamiento, aunque no se tenga la información suficiente ni los métodos consolidados para la identificación de las zonas propensas; por lo que no hay manera de implementar una alerta temprana que pueda ser activada tras detectar alguna alteración en los taludes. (*reacción inmediata*)

1.3 Riesgo

El riesgo, de acuerdo con la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), organismo de las Naciones Unidas, es definida como *“el resultado de la interacción de tres factores: peligro, vulnerabilidad y exposición”*.¹⁸ También se define como *“la probabilidad de consecuencias perjudiciales o pérdidas esperadas (muertes, lesiones, daños a propiedad pública o privada, interrupción de actividades económicas)”* y desde hace unos años le agregaron la parte del medio ambiente y su deterioro. Aunque la tendencia es integrar la exposición dentro de la vulnerabilidad como un término implícito.

Otra definición de riesgo, también de la CEPAL, es *“la magnitud probable de daño de un ecosistema específico o en algunos de sus componentes, en un periodo determinado, ante la presencia de una específica actividad con potencial peligroso”*.¹⁹ En el mismo documento aparece que *“al poder o energía que se puede desencadenar se le llama amenaza y a la predisposición para sufrir daño se le llama vulnerabilidad”*.

Derivado de los conceptos anteriores, podemos decir que el riesgo de desastre se compone de dos partes:

- La amenaza potencial y
- La vulnerabilidad de las partes del sistema a dicha amenaza

Esto se expresa de la siguiente manera:

$$\text{Riesgo de desastre} = f(\text{amenaza, vulnerabilidad})$$

¹⁸ Documento “El impacto de los desastres naturales en el desarrollo: Documento metodológico básico para estudios nacionales de caso”. CEPAL. 14 diciembre 2005. También se puede consultar la Estrategia Internacional para la Reducción de los Desastres de Naciones Unidas: <http://www.eird.org/esp/terminologia-esp.htm>

Por ejemplo, si aplicamos esta forma sencilla de conceptualizar un hipotético riesgo por deslizamiento en carreteras quedaría de la siguiente manera:

- La masa o volumen de tierra que pudiera desprenderse y que es propensa a moverse debido a la lluvia, a la baja compactación o al nulo mantenimiento dado a los taludes a un lado de alguna carretera (esto es la amenaza)
- Las características de la carretera que hacen posible que se vea afectada por el deslizamiento; esto es, su localización, la falta de mantenimiento a las obras adyacentes, diseño de bajas especificaciones (o sea la vulnerabilidad, a partir de la cual se desarrolla la hipótesis presentada), etc.

En cuanto a la socavación, esta es la “remoción de material del lecho del cauce por acción del flujo del agua, y se puede clasificar en 3 tipos”²⁰:

- General
- Contracción
- Local

1.4 Socavación

La socavación general, de acuerdo con el Centro Mario Molina, es un fenómeno que se da en todos los elementos fluviales que existen, ya que puede ocasionarse por la variación de la velocidad del flujo o simplemente por la geomorfología del río.

¹⁹ Políticas públicas para la reducción de la vulnerabilidad frente a los desastres naturales y socio-naturales. Jorge Enrique Vargas. Serie Medio Ambiente y Desarrollo. CEPAL. ONU. Chile. Abril 2002

²⁰ Evaluación del peligro por socavación en Puentes carreteros de México. Estudio de caso. Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente A.C. Documento inédito.

Por otro lado, la socavación por contracción ocurre por la disminución del área hidráulica de paso del flujo, ya sea por causas naturales como el crecimiento de vegetación en cauce, o por causas antrópicas como la construcción de infraestructura (como los puentes) o la acumulación de basura.

En cuanto a la socavación local, es la derivada de elementos de apoyo de los puentes; en otras palabras, es la provocada por la creación de vórtices hidráulicos derivado de la obstrucción del flujo en el cauce. Específicamente las pilas y los estribos provocan este tipo de socavación y su influencia no es necesariamente el total del ancho efectivo de la sección transversal.

Se tiene identificado que, en los puentes, la acción de la socavación local y por contracción son las que tienen un mayor impacto. Por lo anterior, planteamos como premisa conocer los principales factores de ocurrencia de estos dos tipos de socavación; el primero causado por la presencia de las pilas y estribos que constituyen al puente, y el segundo debido a que la misma obra de cruce, genera un estrechamiento de la sección hidráulica del cauce. ²¹

²¹ Evaluación del peligro por socavación en Puentes carreteros de México. Estudio de caso. Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente A.C. Documento inédito.

2 Metodología propuesta

El objetivo principal de este proyecto es determinar la vulnerabilidad y evaluar el riesgo en relación con deslizamientos potenciales, inundaciones pluviales y socavación de puentes en la Red Federal de Carreteras. Para alcanzar su cumplimiento, el estudio se estructuró en cinco fases, a saber:

2.1 Fase 1

Recopilación de información geoespacial y bases de datos actualizadas.

En esta fase ubicamos las bases de datos geoespaciales necesarias para el análisis, algunas capas ya existían como parte del acervo de la Unidad de Sistemas de Información Geoespacial del IMT. Algunas otras se solicitaron a las instituciones que las generan y el resto fueron descargadas a través de Internet, en las páginas web indicadas en la sección de bibliografía.

Revisamos las capas de información e identificamos cuáles eran las requeridas para realizar el análisis y cuáles eran las que se usarían para construir el mapa base digital en donde mostraríamos los resultados.

A continuación, el listado de las capas de información geoespacial

- Basemap de ESRI
- Límites estatales del México
- Climas (CONABIO)
- Degradación del suelo

- Densidad de población por localidad
- Rangos de humedad
- Uso del suelo
- Hidrografía
- Localidades INEGI
- Principales ciudades medias y pequeñas (INEGI)
- Peligro de deslizamiento (Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente A.C.)
- Peligro de inundación (Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente A.C.)
- Periodo de retorno 30 años (lluvias) (Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente A.C.)
- Periodo de retorno 10 años (lluvias) (Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente A.C.)
- Red Nacional de Caminos, versión 2014 (IMT/SCT/INEGI)

2.2 Fase 2

Revisión y utilización de los datos resultantes de la metodología para determinar el peligro de deslizamientos y peligro por inundación pluvial del Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente A.C., así como de las variables medioambientales relacionadas con la socavación en puentes.

Por medio del convenio con el Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente A.C., obtuvimos las capas de información geoespacial correspondientes a:

- Peligro de deslizamientos
- Peligro de inundación pluvial
- Periodos de retorno de lluvias a 30 años
- Periodos de retorno de lluvias a 10 años

2.2.1 Análisis de datos

El nivel de aproximación de las capas de deslizamientos e inundación pluvial es de 30 metros por pixel, lo que hace que la información de las áreas que pudiera afectar a las carreteras sea muy específica en su grado de aproximación; en algunas ocasiones, las potenciales áreas de deslizamiento o inundación se encuentran muy fraccionadas o son muy pequeñas; y, aunque se encuentren cerca de la carretera y pudieran afectarla, la zona de afectación sería demasiado pequeña para ser utilizada; observamos que esta información no se ajustaría a los fines del proyecto, y resolvimos utilizar otro método (indirecto) para el cálculo del índice de vulnerabilidad aplicado a deslizamiento e inundación pluvial.

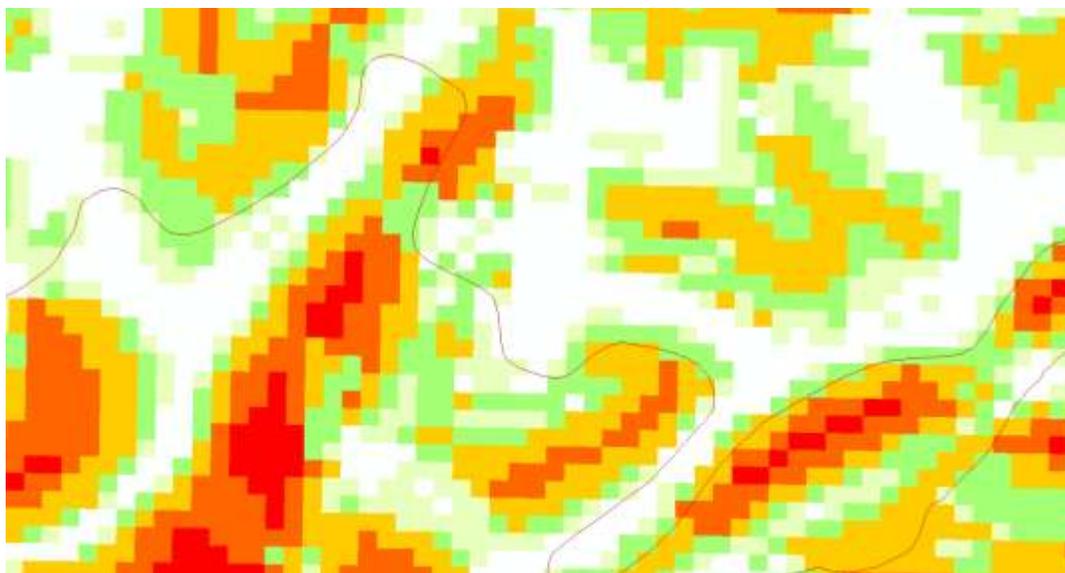


Fig. 1. Acercamiento a una zona en donde se observa la Red Nacional de Caminos y los pixels que representan el peligro de deslizamiento (en tonos rojos y naranjas). Elaboración propia.

2.3 Fase 3

Correlación espacial de la Red Federal de Carreteras y los puentes, con la información relacionada a deslizamientos e inundación pluvial

Al principio, utilizamos la capa de carreteras correspondiente al Inventario Nacional de Infraestructura para el Transporte, en su versión 2011; más adelante decidimos cambiarla por la *Red Nacional de Caminos INEGI / IMT-SCT, versión 2014*, la cual es el resultado de un esfuerzo interinstitucional entre la SCT-IMT y el INEGI; y es la representación cartográfica, en formato digital y georreferenciada, de la red oficial de transporte terrestre actualizada²² que integra las carreteras, vialidades y caminos del país, modelada y estructurada con el propósito de facilitar el cálculo de rutas; manteniendo la conectividad con servicios de interconexión de transporte como aeropuertos, puertos, estaciones de ferrocarril, entre otros.

Integra la totalidad de las carreteras pavimentadas del país, las vialidades de las localidades urbanas y rurales con las que se conectan, las vías fluviales donde se transbordan vehículos; la mayoría de los caminos rurales; los servicios de interconexión de transporte como aeropuertos, puertos, estaciones de ferrocarril, aduanas, puentes y túneles; sitios de esparcimiento y recreativos, y sitios de interés para el turismo.

Asimismo, considera los elementos físicos restrictivos y funcionales para la circulación vehicular (pasos a desnivel, distribuidores, camellones, sentidos de vialidad, maniobras prohibidas, etc.)²³

En la actualidad, los cálculos de vulnerabilidad de carreteras se basan en la accesibilidad y en lo que sucedería si la red se corta debido a algún evento catastrófico ²⁴ (en donde la vulnerabilidad es la susceptibilidad o propensión del sistemas expuesto a ser afectado o dañado por el efecto de un evento perturbador; es decir, el grado de desconexión de un tramo con respecto al resto de la red), desde este punto de vista, la vulnerabilidad es mayor donde se genera un corte a la red y no hay comunicación hacia otros segmentos; por el contrario, cuando existen rutas alternas, la vulnerabilidad es menor. Gradilla (2011)²⁵ propone el uso de un índice de importancia de los tramos de carretera para jerarquizarlos a partir de los cambios en la conectividad de la red, la accesibilidad a localidades, así como el tiempo de viaje.

²² http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5362762&fecha=06/10/2014

²³ <http://www.imt.mx/images/files/USIG/rnc/NOTA-SINOPSIS.pdf>

²⁴ <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt354.pdf>

²⁵ Ibidem

Hasta la fecha no existen propuestas de cálculos de la vulnerabilidad a partir de las propiedades técnicas de las carreteras; aunque sí existen algunos trabajos en donde se calcula la vulnerabilidad a sismos para obras o edificios, tomando como base su tipología.

La propuesta aquí descrita parte de la hipótesis de que las carreteras cuentan con ciertas características técnicas de acuerdo con cierta tipología; por ejemplo, una carretera de altas especificaciones contará con mayores obras hidráulicas y de ingeniería que una carretera estatal, y esta a su vez que un camino municipal o local, por lo que se supone que una carretera o autopista federal resistirá de mejor manera un deslizamiento o una inundación que un camino de bajas especificaciones.

En este sentido, la pendiente también es un factor para el cálculo de la vulnerabilidad ya que generalmente las carreteras mejor construidas presentan obra civil que disminuye el valor promedio de la pendiente. Así, al calcular un valor para las carreteras de acuerdo con su tipología o infraestructura presente y luego al correlacionarla con la pendiente e intersectarla espacialmente con los deslizamientos o inundaciones sería posible obtener un índice de vulnerabilidad para cada uno de estos temas.

2.3.1 Cálculo de variables de deslizamiento e inundación

Para esto, seleccionamos y calculamos valores para los variables de la Red Nacional de Caminos que pudieran representar alguna característica técnica.

- Administración
- Derecho de tránsito
- Velocidad aproximada
- Carriles
- Tipo de vialidad

Administración	Valor
Federal	4
Estatad	3
Municipal	2
Otros (N/A, otro, particular, desconocido)	1

Tabla 1. Valores ponderados para el campo *Administración*. Se muestran los valores para cada ocurrencia en el dominio de valores. 1 es el valor más bajo, 4 es el más alto. Elaboración propia

Derecho de tránsito	Valor
Cuota	2
Libre	1

Tabla 2. Valores ponderados para el campo *Derecho de tránsito*. Se muestran los valores para cada ocurrencia en el dominio de valores. 1 es el valor más bajo, 2 es el más alto. Elaboración propia

Carriles	valor
1	1
2	1
3	2
4	2
5	3
6	3
7	4
8	4
9	5
10	5
20	5

Tabla 3. Valores ponderados para el campo *Carriles*. Se muestran los valores para cada ocurrencia en el dominio de valores. 1 es el valor más bajo, 5 es el más alto. Elaboración propia

Velocidad aproximada	valor
10	1
15	1
18	2
20	2
25	2
30	3
35	3
38	4
40	4
45	4
50	5
55	5
60	6
65	6
70	7
75	7
80	8
85	8
90	9
95	9
98	10
100	10
110	10

Tabla 4. Valores ponderados para el campo *Velocidad aproximada*. Se muestran los valores para cada ocurrencia en el dominio de valores. 1 es el valor más bajo, 10 es el más alto. Elaboración propia

Tipo vialidad	Valor
Ampliación	0
Andador	0
Avenida	1
Boulevard	1
Calle	1
Callejón	0
Calzada	1
Camino	2
Carretera	2
Cerrada	0
Circuito	0
Circunvalación	0
Continuación	0
Corredor	0
Diagonal	0
Eje vial	1
Enlace	0
Glorieta	0
Otro	0
Peatonal	0
Periférico	1
Privada	0
Prolongación	0
Rampa de frenado	0
Retorno	0
Viaducto	1

Tabla 5. Valores ponderados para el campo *Tipo vialidad*. Se muestran los valores para cada ocurrencia en el dominio de valores. 0 es el valor más bajo, 2 es el más alto. Elaboración propia

Una vez que asignamos los valores ponderados a las líneas que conforman la Red Nacional de Caminos, generamos una tabla resumen que muestra el número de registros que cumplen con la condición así como el cálculo de la suma total en kilómetros por tipo de variable. Tablas de la 6 a la 10.

Variable: Administración

VPAdmin	registros	kms	vp
Federal	70,589	60,307.88	4
Estatad	95,444	112,337.41	3
Municipal	93,778	109,851.41	2
N/A	358,796	39,529.58	1
Particular	823	558.17	1
Otro	24	75.34	1
Desconocido	280	199.96	1

Tabla 6. Valores ponderados para el campo *Administración*. Se muestran los valores para cada ocurrencia en el dominio de valores, así como el número de registros y la suma total en kilómetros por tipo de administración. 0 es el valor más bajo, 4 es el más alto. Elaboración propia.

Variable: Derecho de tránsito

VPDerTran	registros	kms	vp
cuota	14,236	15,320.15	2
libre	247,644	267,549.00	1
N/A	357,854	39,990.14	0

Tabla 7. Valores ponderados para el campo *Derecho de tránsito*. Se muestran los valores para cada ocurrencia en el dominio de valores, así como el número de registros y la suma total en kilómetros por derecho de tránsito. 0 es el valor más bajo, 2 es el más alto. Elaboración propia.

Variable: Carriles

Vpcarril	registros	kms	vp
0	69	9.10	0
1	36,293	14,914.00	1
2	522,425	297,323.42	1
3	40,512	7,109.02	2
4	17,620	3,175.74	2
5	1,568	180.80	3
6	1,033	117.89	3
7	113	16.26	4
8	93	11.93	4
9	3	0.32	5
10	4	0.35	5
20	1	0.23	5

Tabla 8. Valores ponderados para el campo *Carriles*. Se muestran los valores para cada ocurrencia en el dominio de valores, así como el número de registros y la suma total en kilómetros por número de carriles. 0 es el valor más bajo, 5 es el más alto. Elaboración propia.

Variable: Velocidad aproximada

VPVelAprox	registros	kms	vp
0	94	13.92	0
10	10,158	2,166.51	1
15	645	20.78	1
18	1	0.12	1
20	19,462	1,993.27	2
25	4,783	335.81	2
30	48,944	17,611.84	3
35	401	158.32	3
38	1	0.01	3
40	223,443	99,003.72	4
45	25,363	2,324.36	5
50	74,577	25,487.94	5
55	1	0.10	5
60	117,407	72,945.48	6
65	751	506.81	6
70	25,493	28,257.03	7
75	506	605.31	7
80	35,405	35,448.33	8
85	103	102.21	8
90	13,140	14,149.49	9
95	4,550	2,524.48	9
98	1	1.40	9
100	8,659	10,760.77	10
110	5,846	8,441.54	10

Tabla 9. Valores ponderados para el campo *Velocidad aproximada*. Se muestran los valores para cada ocurrencia en el dominio de valores, así como el número de registros y la suma total en kilómetros para cada velocidad. 0 es el valor más bajo, 10 es el más alto. Elaboración propia.

Variable: Tipo de vialidad

VPTipVial	registros	kms	vp
Ampliacion	32	3.56	0
Andador	64	4.35	0
Avenida	91,394	10,273.51	1
Boulevard	35,787	5,010.93	1
Calle	159,696	17,336.01	1
Callejon	127	12.01	0
Calzada	7,264	914.75	1
Camino	79,746	110,812.93	2
Carretera	181,181	172,514.20	2
Cerrada	62	4.47	0
Circuito	1,979	254.05	0
Cincunvalación	71	11.54	0
Continuación	22	4.71	0
Corredor	107	19.72	0
Diagonal	233	24.42	0
Eje vial	1,170	217.28	1
Enlace	24,068	2,765.59	0
Glorieta	5,827	139.55	0
Otro	16	2.07	0
Peatonal	73	6.37	0
Periferico	6,943	1,332.90	1
Privada	349	31.07	0
Prolongación	5,802	613.15	0
Rampa frenado	22	7.73	0
Retorno	17,378	480.01	0
Viaducto	321	62.29	1

Tabla 10. Valores ponderados para el campo *Tipo de vialidad*. Se muestran los valores para cada ocurrencia en el dominio de valores, así como el número de registros y la suma total en kilómetros para cada tipo de vialidad. 0 es el valor más bajo, 2 es el más alto. Elaboración propia.

Aplicamos la ecuación:

$$VPFinal = \sum_{i=1}^5 w1$$

Donde VPFinal es la suma de los valores ponderados para cada uno de los registros o líneas que conforman la RNC, lo que da como resultado un rango de valores desde 1 (valor mínimo) hasta 19 (valor máximo calculado).

Se transformó la suma del valor ponderado en un ID compuesto (1.1.4.3.1.0) para de esta manera, al analizar una línea o un conjunto de ellas, sea posible verificar los valores que dan origen a la suma.

Como mencionamos anteriormente, la pendiente es un dato sumamente importante para el cálculo del índice; por lo que interpolamos las líneas que representan las carreteras de la Red Nacional de Caminos²⁶ con la capa de pendientes (en porcentaje) generada a partir del Modelo Digital de Elevación de la República Mexicana²⁷

Una vez obtenido el valor de la pendiente para cada línea de carretera, aplicamos la ecuación:

$$vpF = vpFinal.pendiente$$

De esta manera obtuvimos la correlación de la suma total de los valores ponderados con la pendiente en porcentaje.

Al interpolar nuevamente la Red Nacional de Caminos con la capa de peligro por deslizamiento o inundación, obtuvimos la identificación de las zonas en donde existe cierto grado de peligro, si los valores son coincidentes en ambas capas, entonces damos por válido el cálculo.

²⁶<http://imt.mx/micrositios/sistemas-de-informacion-geoespacial/servicios-tecnologicos/red-nacional-de-caminos/acerca-de.html>

²⁷ <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/queesmde.aspx>

El resultado es la Red Nacional de Caminos con el índice de vulnerabilidad por deslizamiento e inundación, en donde los valores más elevados muestran los tramos de carreteras en los que se podrían presentar problemas a causa de dichos eventos.

Obtuvimos una matriz de pesos relativos, donde los grados de vulnerabilidad para deslizamiento son dados por los siguientes valores:

Rango de valores	Descripción
0- 1	muy bajo
1 - 7	bajo
7 - 15	medio
15 - 25	alto
--> 25	muy alto

Tabla 11. Rango de valores de deslizamiento resultantes de la suma de valores ponderados de las variables utilizadas. Elaboración propia.

Y los grados de vulnerabilidad para inundación son:

Rango de valores	Descripción
0 - 0.05	muy alto
0.05 - 0.1	alto
0.1 - 0.25	medio
0.25 - 0.5	bajo
--> 0.5	muy bajo

Tabla 12. Rango de valores de inundación resultantes de la suma de valores ponderados de las variables utilizadas. Elaboración propia.

2.3.2 Cálculo de variables de socavación

En cuanto a la socavación y dado que su origen es multifactorial²⁸, y que “la socavación es consecuencia de la interacción de ciertas variables generales, pero cada factor infiere de manera distinta según sea el caso”, el Centro Mario Molina propone un análisis diferenciado por región hidrológica.



Mapa 1. Regiones Hidrológicas (CONAGUA), a través del Centro Mario Molina A.C.

El Centro Mario Molina A.C. considera el gasto líquido máximo que pasa por la sección del puente en un instante determinado como un elemento básico para el cálculo de la profundidad de socavación. También considera diversos factores o variables hidrológicas y fisiográficas de las cuencas, las cuales propone analizar y que son:

- ✓ Variabilidad del régimen pluvial mensual histórico
- ✓ Área de la cuenca
- ✓ Pendiente de la cuenca
- ✓ Nivel de permeabilidad
- ✓ Intensidad de la lluvia

Cada una de estas variables tiene sus propios métodos de cálculo y definiciones, las cuales están en el documento inédito *Evaluación del peligro por socavación en puentes carreteros de México. Estudio de caso. Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente A.C.*, realizado en el marco del acuerdo de colaboración con el IMT.

Partiendo de la base de datos de 1374 puentes, proporcionado por el IMT, sabemos que dicha base es resultado de tres filtros antecedentes que fueron aplicados a la base original que está compuesta por 7169 puentes. Los filtros que ya fueron aplicados son los siguientes:

- El puente atraviesa un río o arroyo.
- Los estribos y pilas tienen cimentación directa.
- Los puentes fueron construidos entre 1940 y 1980.

²⁸ Evaluación del peligro por socavación en puentes carreteros de México. Estudio de caso. Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente A.C. Documento inédito realizado en el marco del acuerdo de colaboración con el IMT.

Además de lo anterior, en el presente análisis proponemos dos filtros complementarios²⁹ :

- Si el puente ha sido reconstruido.
- Si el puente presenta un esviajamiento mayor a 30°.

El antecedente de reconstrucción es importante, ya que *si un puente ha sido reconstruido, muy probablemente sea como resultado de un evento destructivo importante, en consecuencia, ese sitio podría estar sujeto a la acción de un evento futuro con características similares.*

2.4 Fase 4

Determinación de la vulnerabilidad de los tramos afectados y expuestos a deslizamientos e inundaciones.

A continuación, aparecen las tablas de resumen con el número de kilómetros totales por tipo de administración y por grado de vulnerabilidad.

²⁹ A los filtros propuestos, se les llama “factores estructurales”.

conteo	Administración	Valor	Longitud total (kms)
20	Otro	Muy bajo	72.25
220	Desconocido	Muy bajo	122.70
538	Particular	Muy bajo	350.45
34198	Federal	Muy bajo	22,236.21
261143	N/A	Muy bajo	28,271.57
41104	Municipal	Muy bajo	36,696.11
48792	Estatal	Muy bajo	46,230.71
4	Otro	Bajo	3.09
60	Desconocido	Bajo	77.29
215	Particular	Bajo	155.03
86381	N/A	Bajo	9,984.81
28219	Federal	Bajo	26,401.37
33707	Estatal	Bajo	41,013.04
37259	Municipal	Bajo	43,398.85
54	Particular	Medio	44.70
8897	N/A	Medio	1,044.35
5177	Federal	Medio	7,303.35
8303	Estatal	Medio	16,270.75
10272	Municipal	Medio	19,127.22
13	Particular	Alto	6.08
1847	N/A	Alto	191.28
1955	Federal	Alto	3,419.51
3452	Estatal	Alto	7,445.45
4026	Municipal	Alto	9,293.32
3	Particular	Muy alto	1.91
528	N/A	Muy alto	37.58
1040	Federal	Muy alto	946.94
1117	Municipal	Muy alto	1,335.92
1190	Estatal	Muy alto	1,377.46

Tabla 13. Grados de vulnerabilidad para deslizamiento, con número de registros, administración y suma de kilómetros. Elaboración propia.

conteo	Administración	valor	Longitud total (kms)
5	Otro	Muy bajo	3.86
128	Desconocido	Muy bajo	118.68
418	Particular	Muy bajo	299.28
160105	N/A	Muy bajo	18,393.15
50634	Federal	Muy bajo	49,566.16
64231	Estatal	Muy bajo	84,757.78
67513	Municipal	Muy bajo	87,124.24
10	Otro	Bajo	50.25
71	Desconocido	Bajo	53.34
127	Particular	Bajo	102.83
9146	Federal	Bajo	6,303.84
70417	N/A	Bajo	8,595.06
13440	Municipal	Bajo	13,992.87
14282	Estatal	Bajo	16,331.92
36	Desconocido	Medio	15.76
4	Otro	Medio	15.97
78	Particular	Medio	70.50
4547	Federal	Medio	2,385.17
6815	Municipal	Medio	5,678.57
7140	Estatal	Medio	6,682.44
59867	N/A	Medio	6,762.42
1	Otro	Alto	1.82
12	Desconocido	Alto	3.44
18	Particular	Alto	16.25
1157	Federal	Alto	415.30
1590	Municipal	Alto	1,140.21
1643	Estatal	Alto	1,362.45
20813	N/A	Alto	1,790.97
4	Otro	Muy alto	3.44
33	Desconocido	Muy alto	8.78
182	Particular	Muy alto	69.31
5105	Federal	Muy alto	1,636.92
4420	Municipal	Muy alto	1,915.52
8148	Estatal	Muy alto	3,202.82
47594	N/A	Muy alto	3,987.98

Tabla 14. Grados de vulnerabilidad para inundación, con número de registros, administración y suma de kilómetros. Elaboración propia

Para la socavación en puentes, el Centro Mario Molina A.C. seleccionó dos sitios que son muy diferentes hidrológicamente y fisiográficamente entre sí. Los sitios son la *Región Hidrológica de Armería-Coahuayana* y la *Cuenca Hidrológica del Río San Juan*.



Mapa 2. Ubicación de las zonas de análisis para socavación

Fuente: Centro Mario Molina A.C. 2015.

ARMERÍA-COAHUAYANA

La región hidrológica número 16 -denominada Armería-Coahuayana- se encuentra localizada al oeste del país, en los estados de Colima, Jalisco y Michoacán; está delimitada al Norte con las Regiones Hidrológicas Lerma Santiago y Río Ameca, al Sur con la Región Hidrológica Costa de Michoacán y el Océano Pacífico, al Este con la Región Hidrológica Balsas y al Oeste con la Región Hidrológica Costa de Jalisco. La superficie total que ocupa comprende un área de 17626.6 Km². Su sistema hidrológico está constituido principalmente por los ríos Armería y Coahuayana.

Partiendo de la base de datos proporcionados por el IMT, la cual está constituida por 1374 puentes repartidos en la República Mexicana³⁰, fueron identificados un total de 14 puentes que inciden en la Región Hidrológica Armería Coahuayana, de los cuales uno fue identificado con “trabajo de cauce” y lleva por nombre “El Salado”.



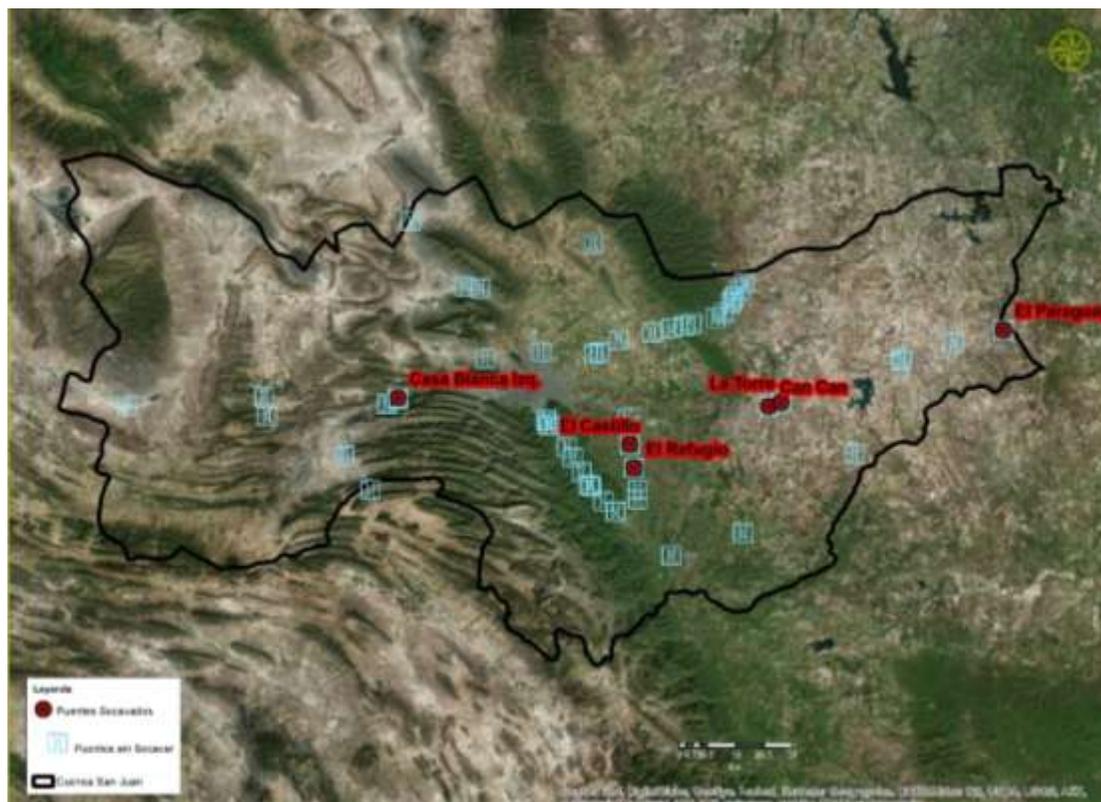
Mapa 3. Ubicación de los puentes identificados en la zona de estudio, en este caso, Armería – Coahuayana. Fuente: Centro Mario Molina A.C. 2015.

³⁰ Resultado de aplicar los tres filtros mencionados en la pág. 31-32 de este documento.

SAN JUAN

La cuenca San Juan tiene un área total de 30200 Km² e influencia en los Estados Tamaulipas, Nuevo León y Coahuila. Su principal corriente es la denominada “San Juan”, que es tributaria del río Bravo, y a su vez desemboca en el golfo de México. La Cuenca Hidrológica San Juan es parte de la Región Hidrológica Bravo-Conchos.

Dentro de la cuenca hidrológica “San Juan” identificamos un total de 49 puentes, de ellos 6 presentan “trabajo de cauce”.



Mapa 4. Ubicación de los puentes identificados en la zona de estudio, en este caso, San Juan. Fuente: Centro Mario Molina A.C. 2015.

Como mencionamos anteriormente, ambas regiones presentan características hidrológicas y fisiográficas muy diferentes, por lo que les asignamos distintos

valores de ponderación a las variables seleccionadas, la función de peligro, para el caso de la Región Hidrológica Armería Coahuayana, es expresada como:

$$f(P.Soc)=\sum (0.15*Llu)+(0.1*Pend)+(0.2*N)+(0.2*\text{Área})+(0.35*Fest)$$

Y al aplicar esta función a los datos, los resultados son los siguientes:

Cuenca	Índice de Peligro por Socavación	Nivel de Prioridad
<i>Cobianes</i>	0.72	2
<i>El Ticuiz</i>	0.61	3
<i>La Caja</i>	0.36	9
<i>La Difunta</i>	0.31	12
<i>La Garita</i>	0.54	6
<i>La Zorrillera</i>	0.36	10
<i>Las Animas Tonila</i>	0.55	5
<i>Mezquitan</i>	0.30	13
<i>Platanar</i>	0.30	14
<i>San Agustín</i>	0.59	4
<i>San Juan de Alima</i>	0.35	11
<i>Tecolotlan</i>	0.37	8
<i>El Coajinque</i>	0.52	7
<i>El Salado</i>	0.77	1

Tabla 15. Índice de peligro por socavación y nivel de prioridad en la Región Armería-Coahuayana. Elaborada por el Centro Mario Molina A.C. 2015.

Al evaluar la función de peligro por socavación propuesta para la Región de Armería-Coahuayana, podemos establecer que el mayor nivel de peligro le corresponde al puente que le antecede el registro de haber tenido daños por socavación, esto permite determinar que la metodología propuesta cumple la correlación buscada. El nivel de prioridad surge con base en el nivel de peligro evaluado; a mayor índice de peligro, mayor prioridad.

Para la Región Hidrológica San Juan, la ponderación se carga hacia los factores estructurales. En inicio, es de suponer una mayor presencia de eventos ciclónicos para esta región del país, y una consecuente subestimación de umbrales de diseño y menos mantenimiento preventivo

Entonces, la función de peligro para la Cuenca Hidrológica San Juan es expresada como:

$$f(P.Soc)=\sum(0.05*Llu)+(0.05*Pend)+(0.05*N)+(0.05*\text{Área})+(0.80*Fest)$$

Los resultados son los siguientes:

Cuenca	Índice de Peligro por Socavación	Nivel de Prioridad
5511	0.12	27
5259	0.09	35
5299	0.51	12
5323-5324	0.12	30
5347-5348	0.13	25
5350	0.12	28
5360	0.51	14
5361	0.09	36
5365-5366	0.12	29
5368-5369	0.13	24
5387	0.53	5
5397	0.51	13
5417-5418	0.52	9
5433	0.49	19
5450-5451	0.52	7
5459	0.52	11
5470	0.89	2
5508-5509	0.52	6
5532-5533	0.52	8
5540	0.52	10
5542	0.88	4
5555	0.08	44
5573-5568	0.11	32
5618-5604	0.91	1
5625	0.08	40
5744-5746	0.07	45
5766	0.07	49
5769	0.08	42
5771	0.08	41
5789	0.07	46
5800	0.13	26
5813	0.49	17
5823	0.09	37
5825	0.10	34
5828	0.49	18
5836	0.50	16
5838	0.08	43
5849	0.11	31
5855	0.47	21
5858	0.07	48
5869	0.09	38
5871	0.10	33
5874	0.09	39
5882	0.07	47
5913	0.50	15
5927	0.47	22
cero_1	0.47	23
cero_2	0.48	20
cero_3	0.88	3

Tabla 16. Índice de peligro por socavación y nivel de prioridad en la Región San Juan. Elaborada por el Centro Mario Molina A.C. 2015.

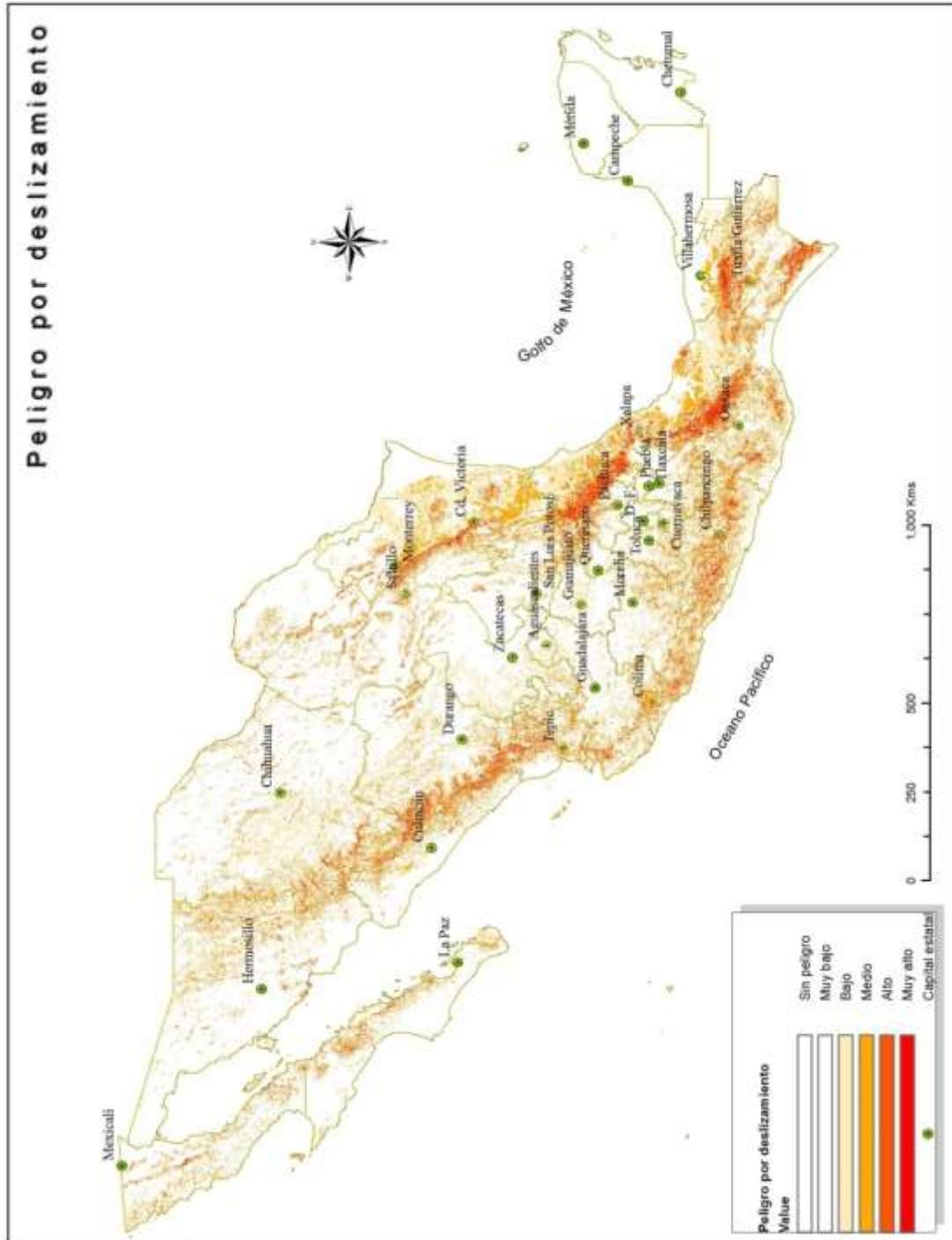
Resultado de la evaluación de la función de peligro por socavación propuesta para la cuenca del San Juan, identificamos que el orden de prioridad de los puentes que presentan “trabajo de cauce” es alta.

Es de notar que la ponderación se inclina mucho al “factor estructural”; esto es en consecuencia de una premisa fundamental, y que vemos de manera más clara en la distribución de los puentes con “trabajo de cauce” a lo largo del país; puesto que hay presencia de puentes socavados en casi todo el territorio nacional, incluso donde las lluvia tiene regímenes muy bajos (500 mm anuales). Dicha situación hace suponer que la potencialidad que pudiera darse ante la ocurrencia de eventos pluviales recae en el esviamiento previo de un puente o en el antecedente de reconstrucción de este.

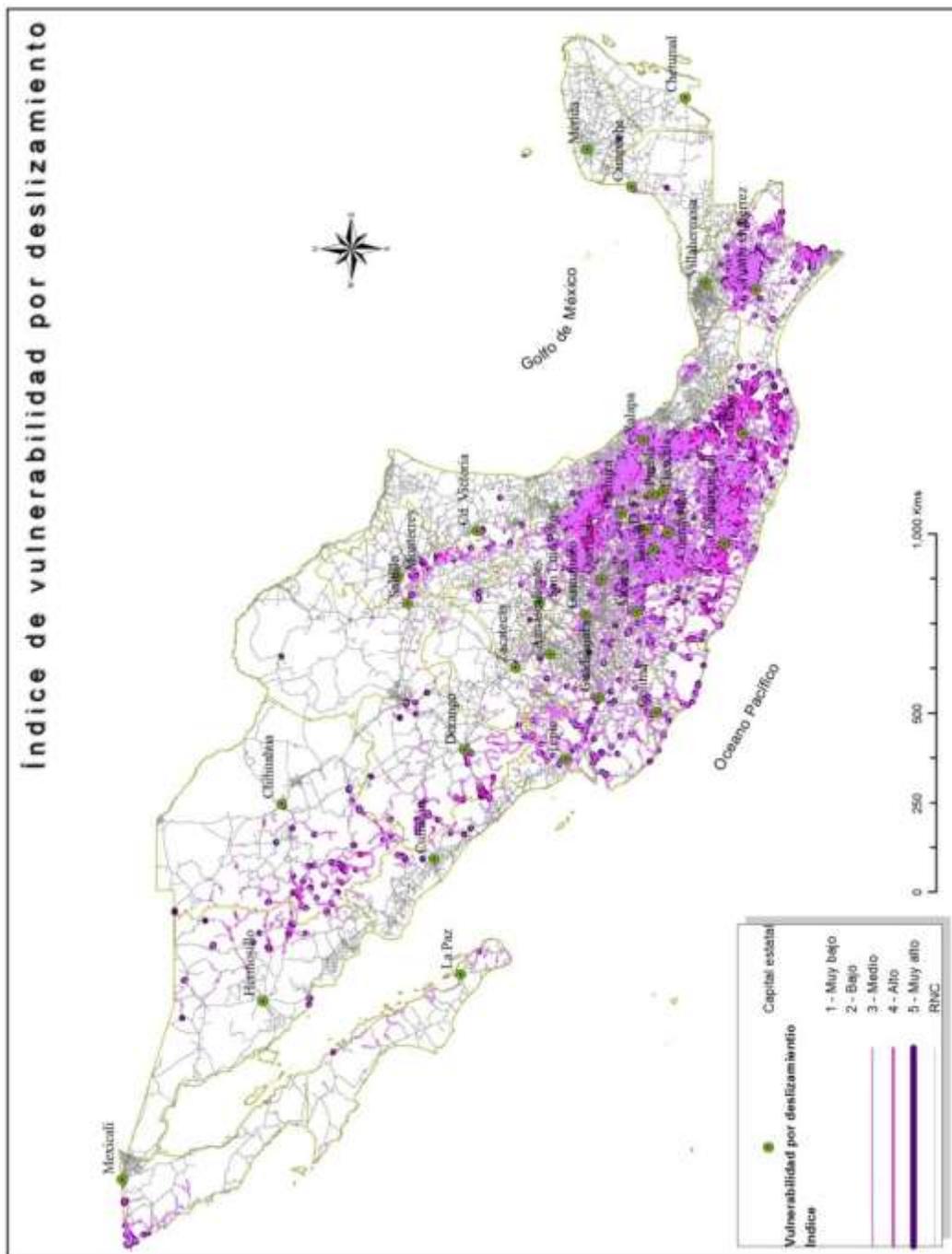
2.5 Fase 5

Generación de mapas digitales de caracterización de las carreteras expuestos a deslizamientos e inundaciones.

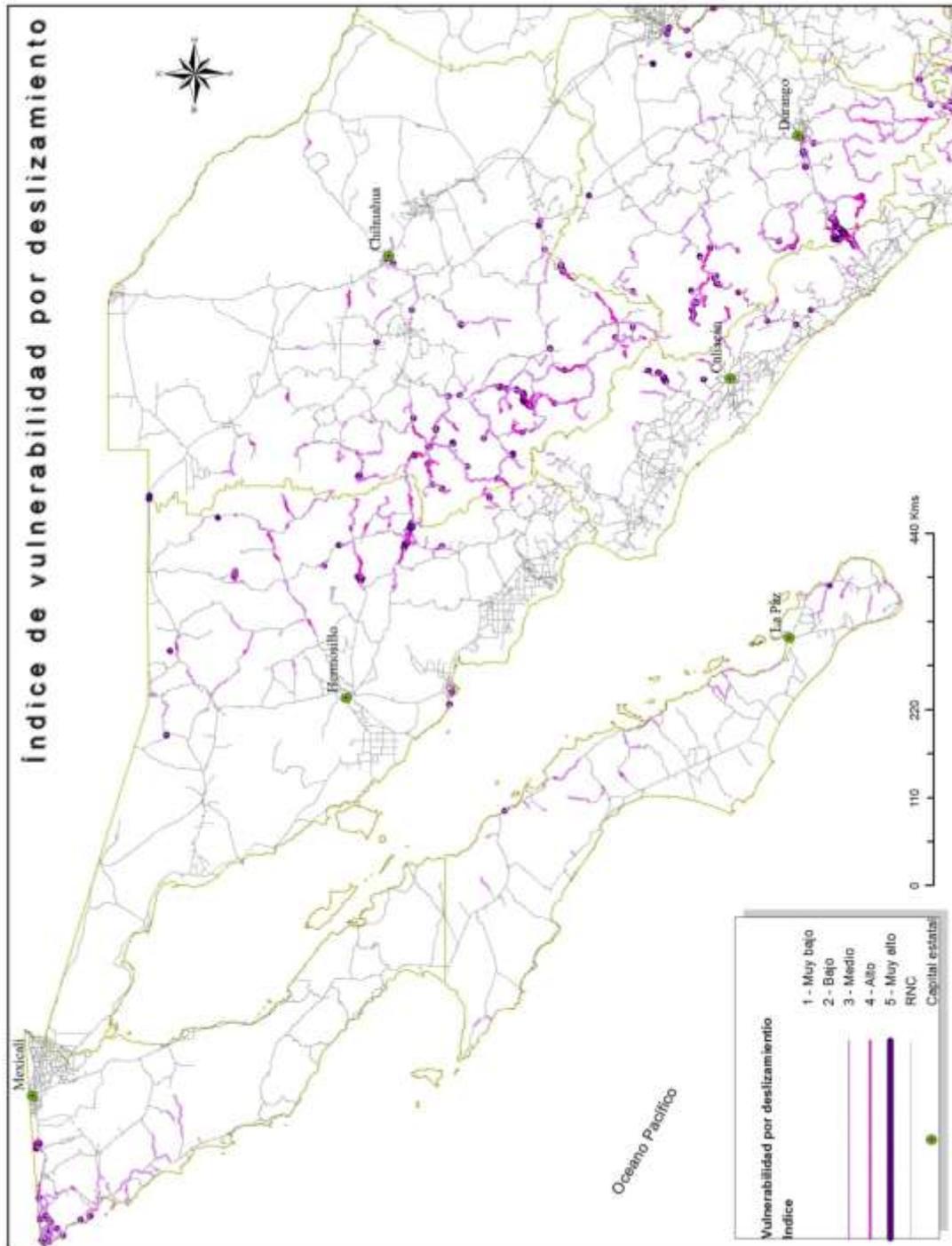
Diseñamos mapas en donde aparecen distintas vistas y acercamientos a la información geográfica básica, así como al resultado del análisis y combinación geoespacial de dicha información.



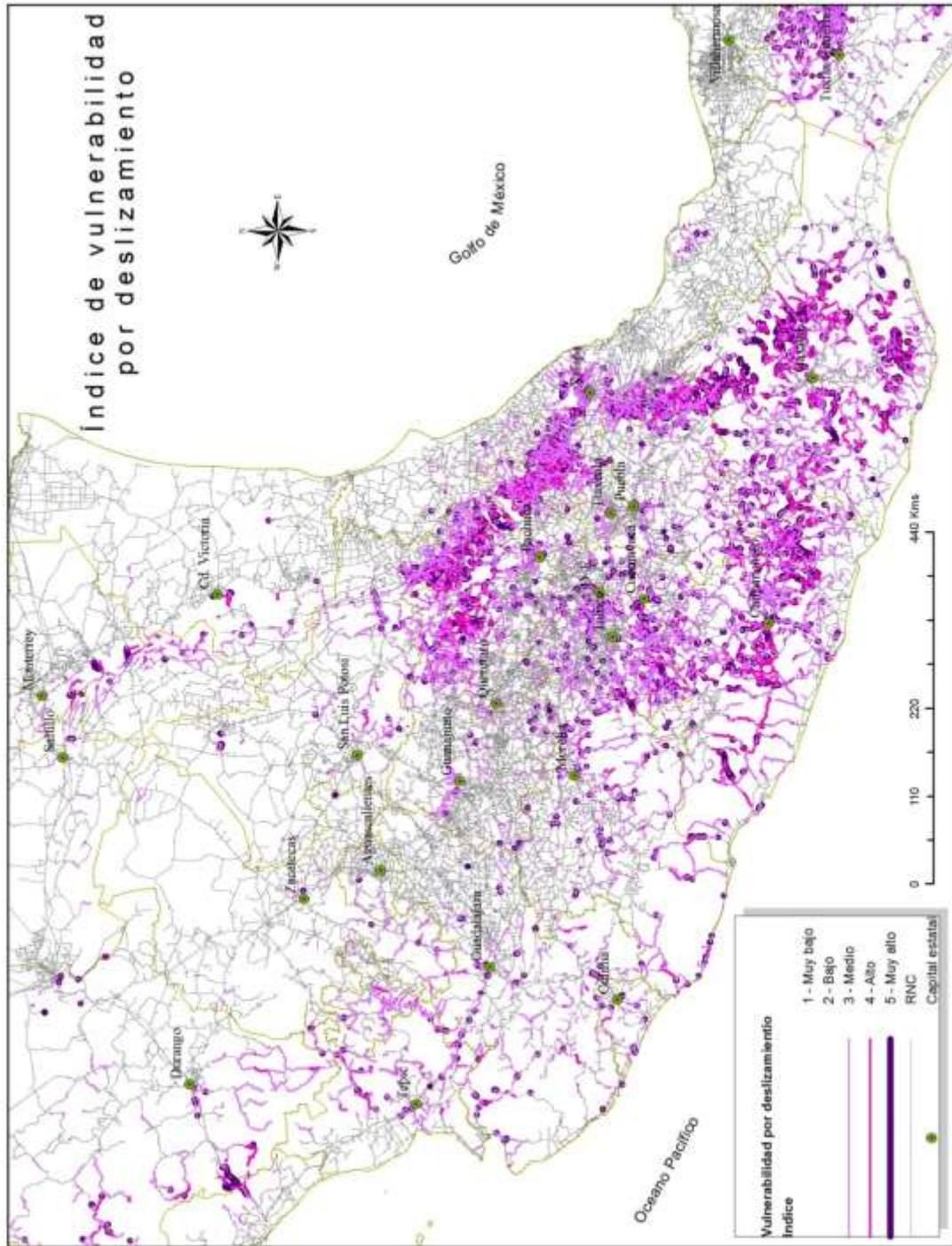
Mapa 5. Peligro por deslizamiento. Elaboración propia a partir de datos del Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente A.C.



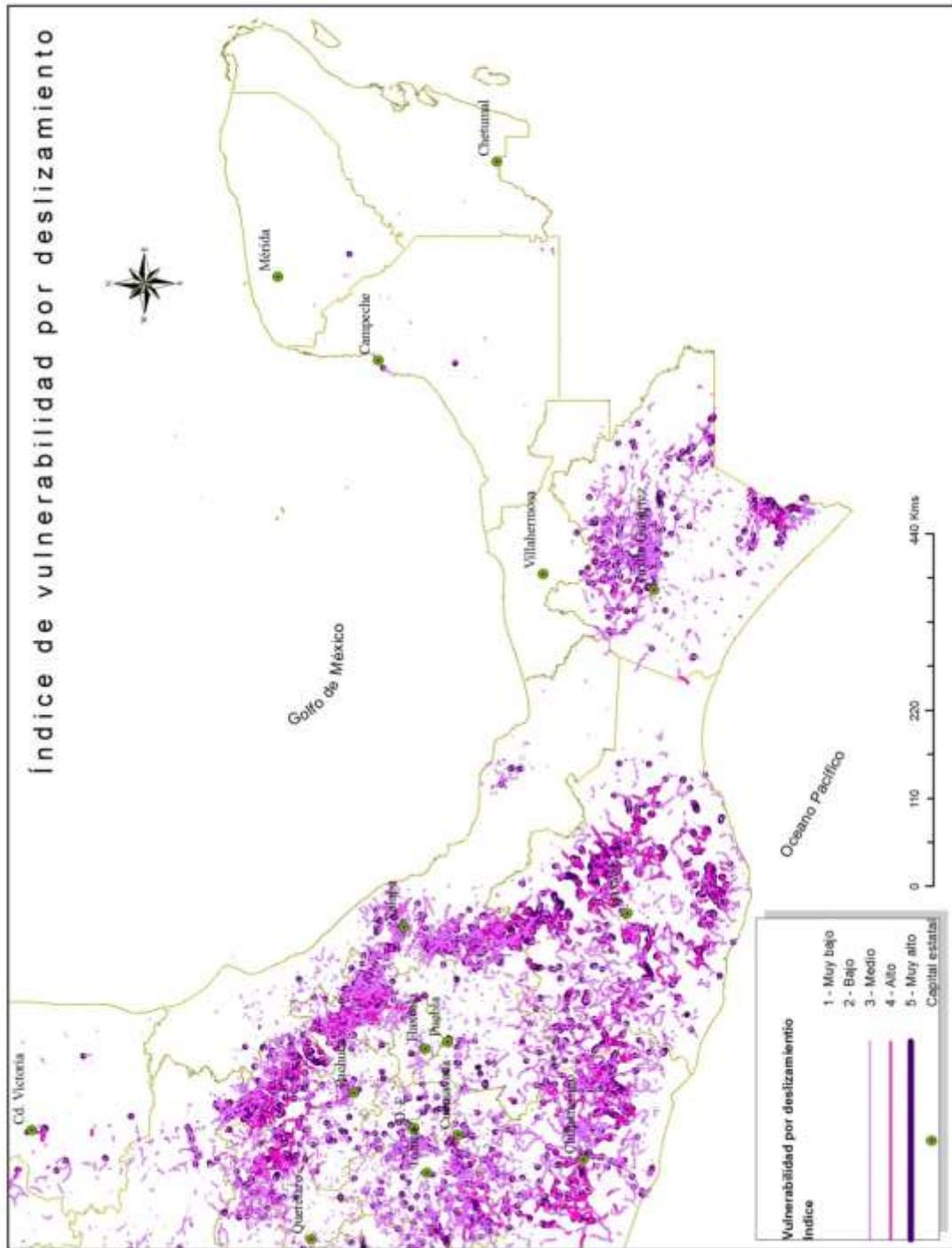
Mapa 6. Índice de vulnerabilidad por deslizamiento. Vista general de todo el país. Se puede observar que la distribución espacial de la vulnerabilidad corresponde al peligro mostrado en el Mapa 5. Elaboración propia.



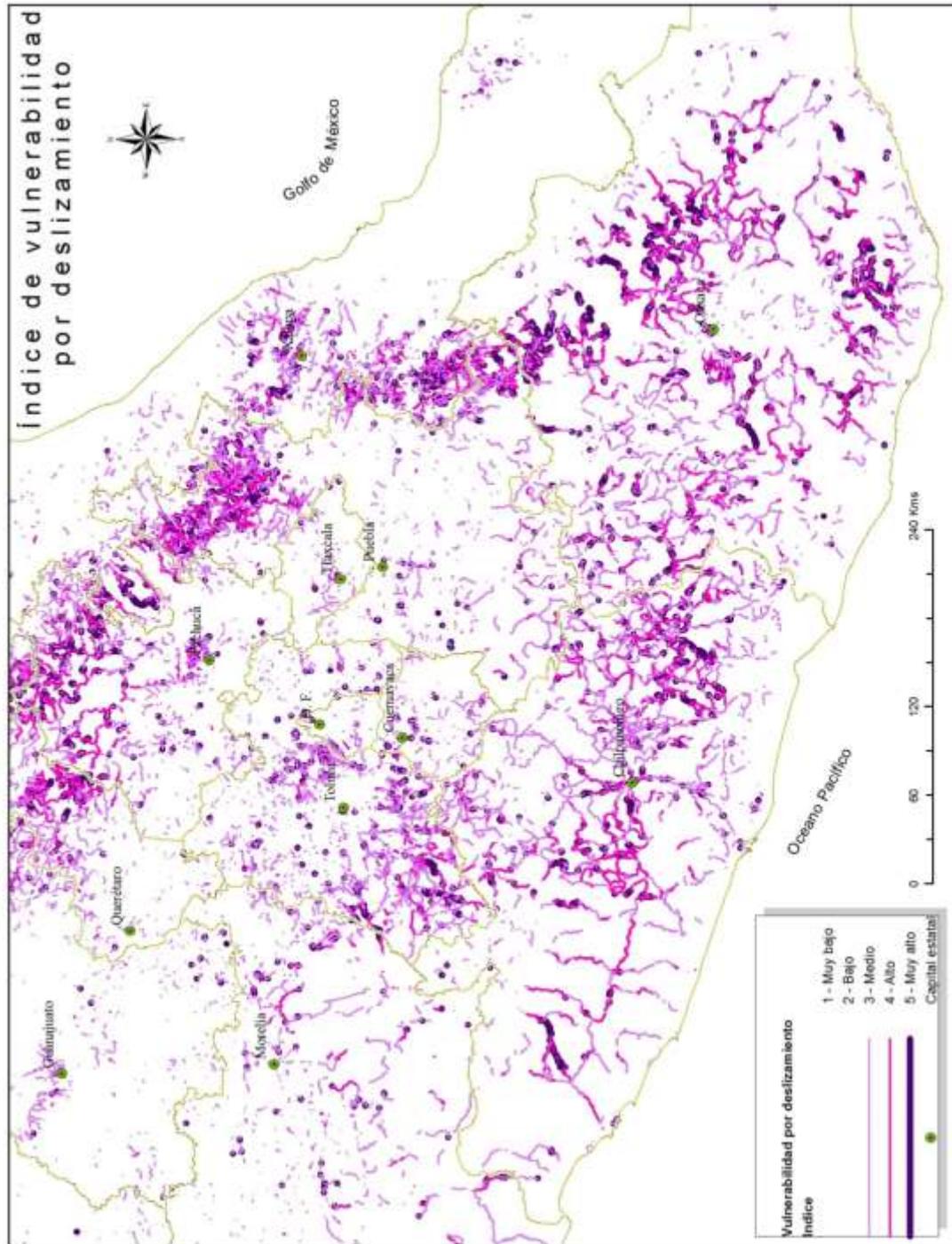
Mapa 7. Índice de vulnerabilidad por deslizamiento. Acercamiento a la zona noroeste del país. Elaboración propia.



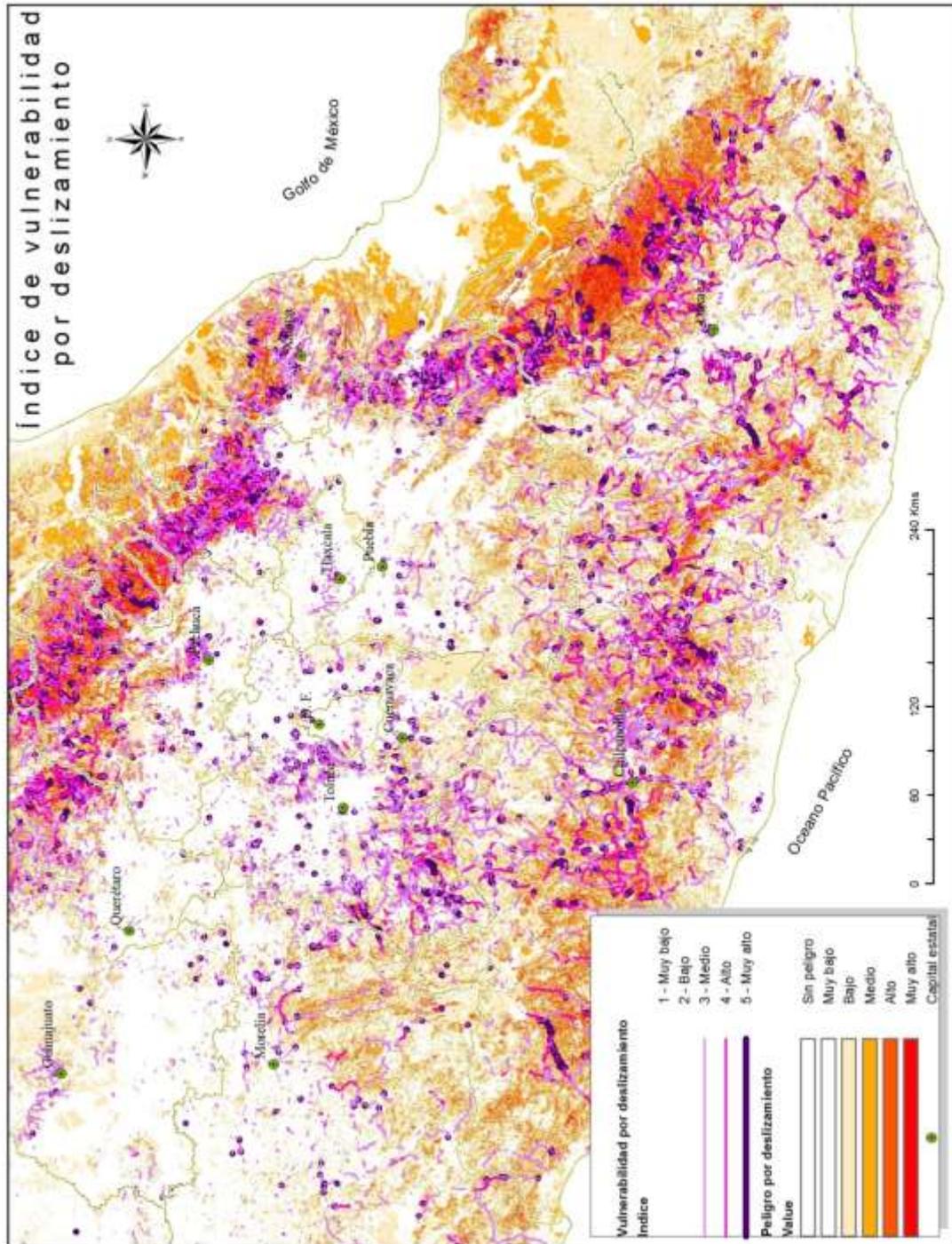
Mapa 8. Índice de vulnerabilidad por deslizamiento. Acercamiento a la zona centro del país. Elaboración propia.



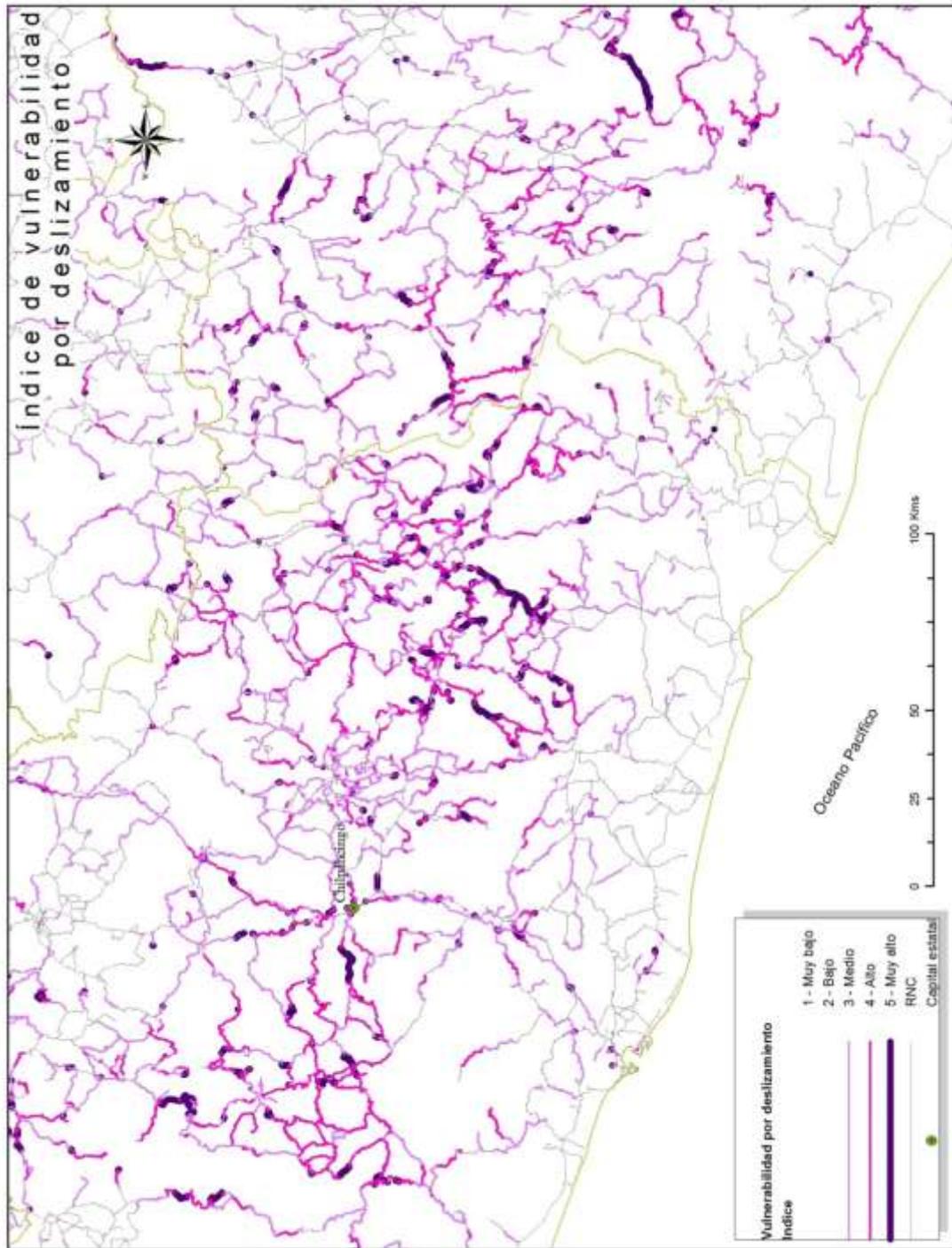
Mapa 9. Índice de vulnerabilidad por deslizamiento. Acercamiento a la zona centro del país y península de Yucatán. Elaboración propia.



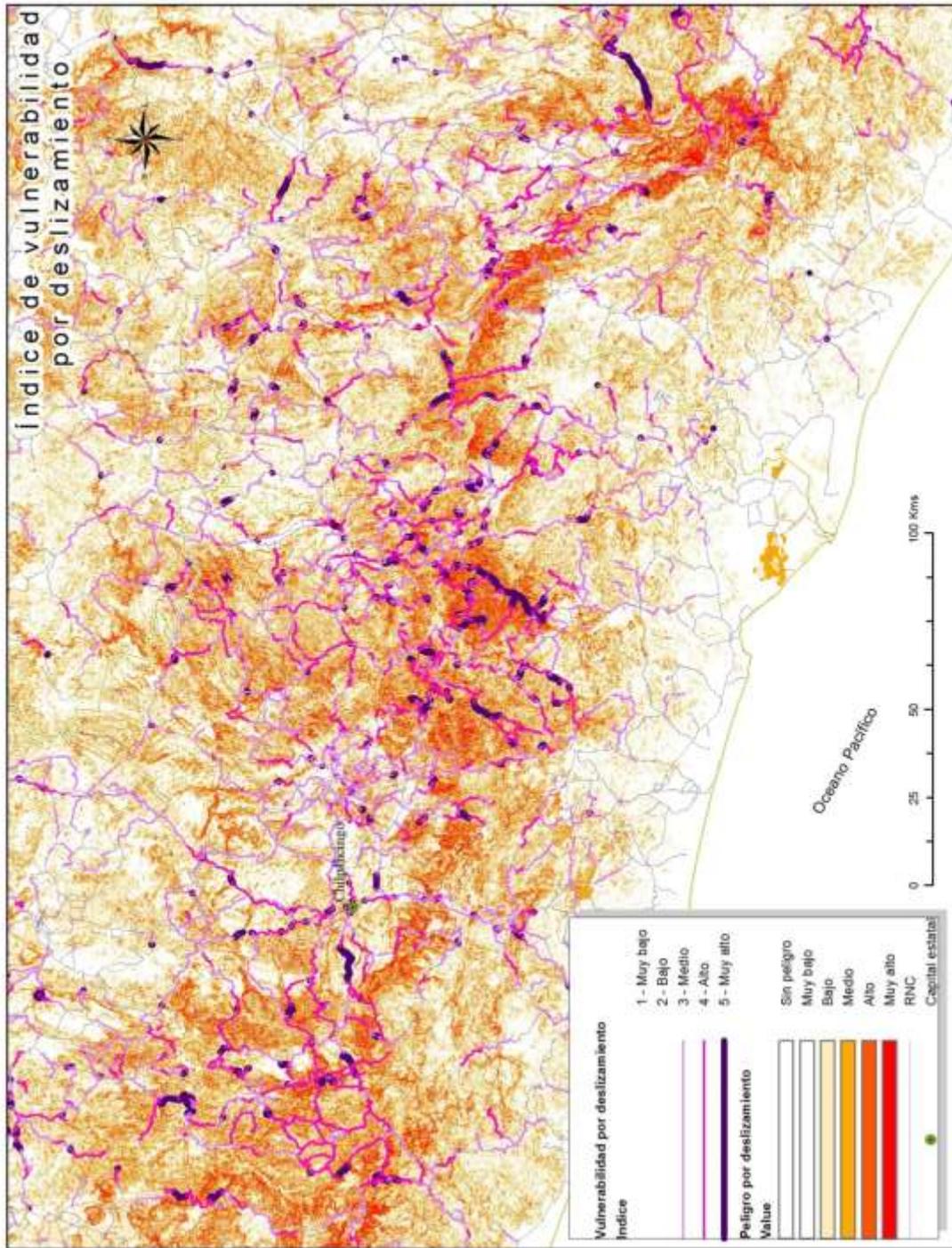
Mapa 10. Índice de vulnerabilidad por deslizamiento. Acercamiento a la zona centro del país. Elaboración propia.



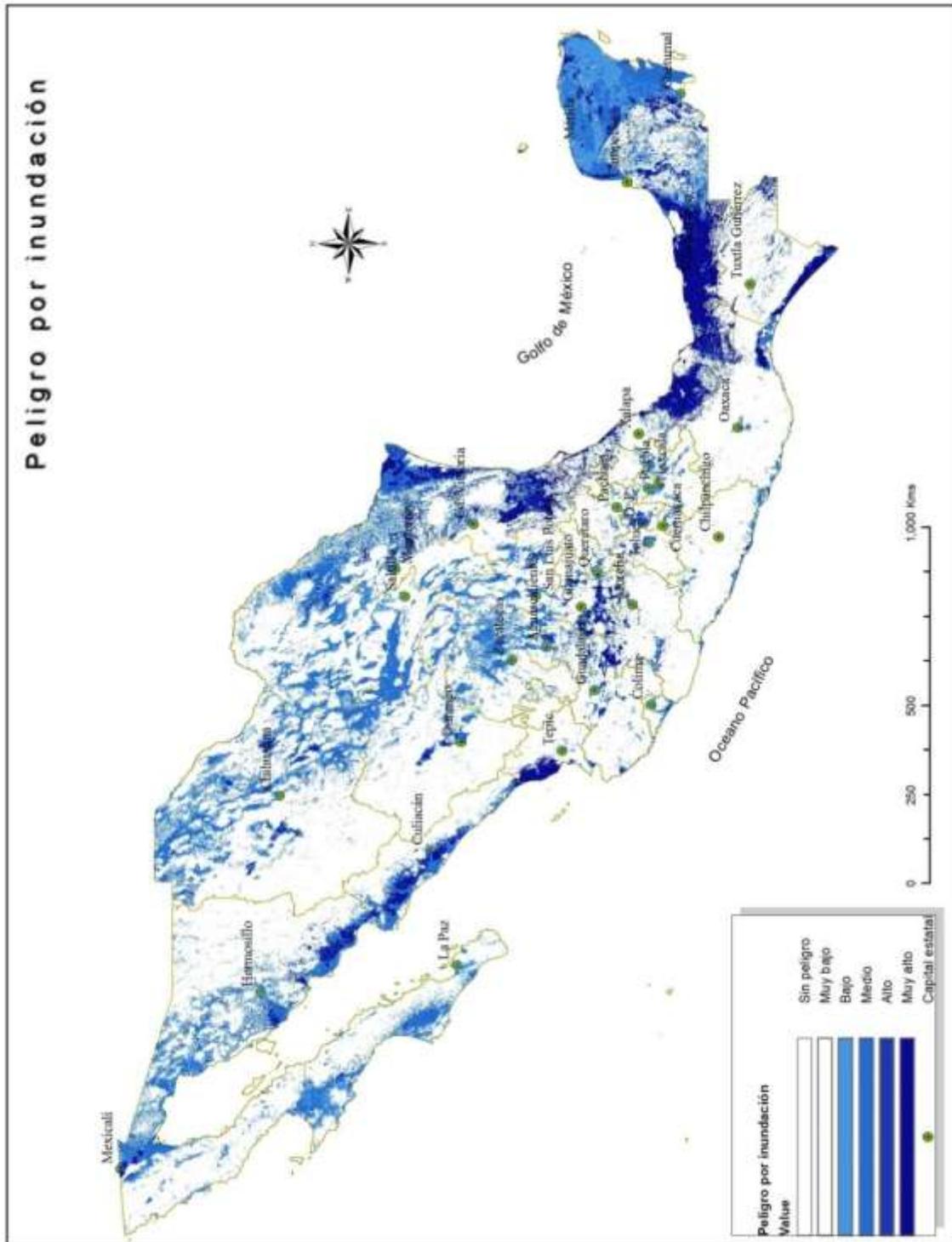
Mapa 11. Índice de vulnerabilidad por deslizamiento y peligro de deslizamiento. Acercamiento a la zona centro del país. Elaboración propia.



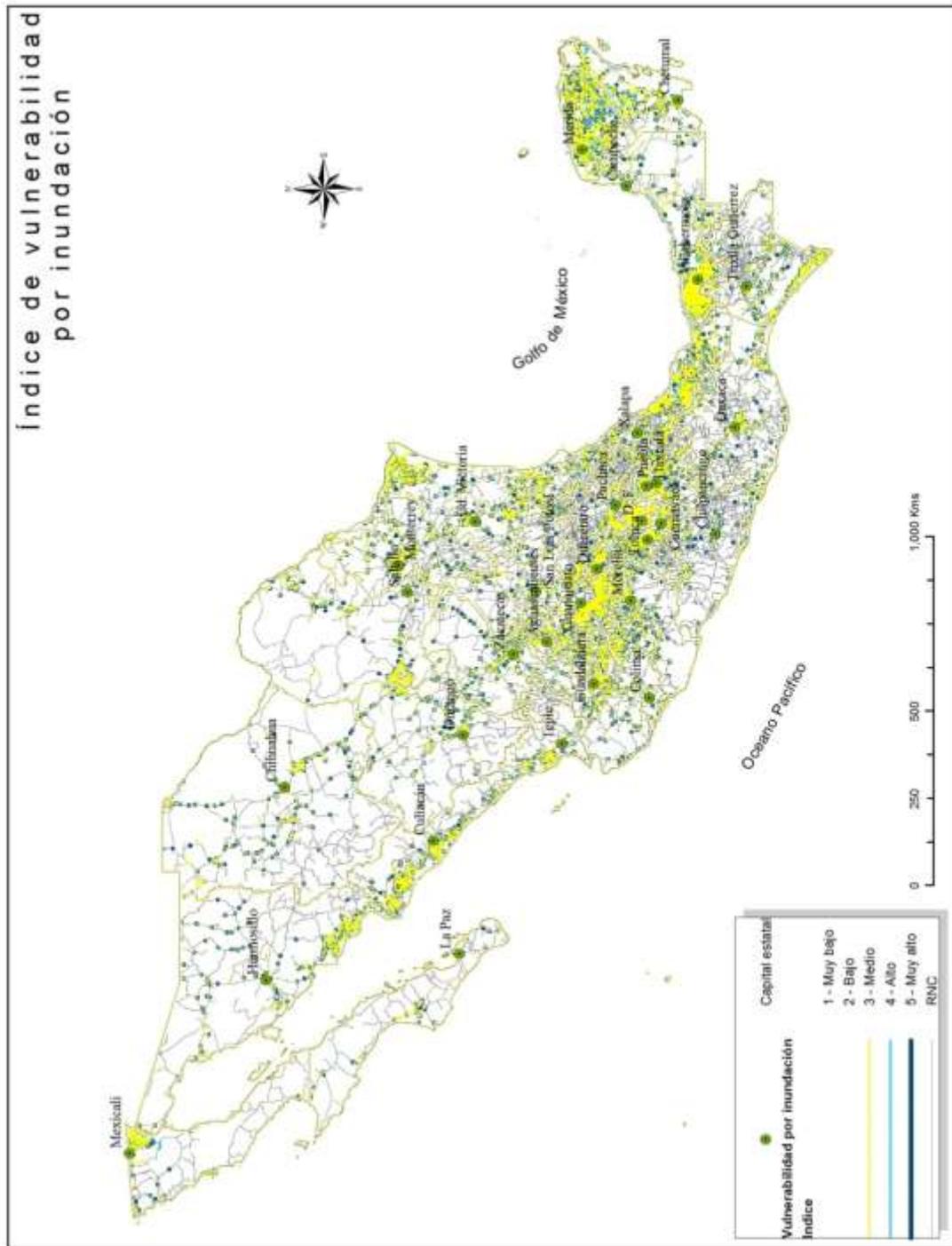
Mapa 12. Índice de vulnerabilidad por deslizamiento. Acercamiento a la zona de Guerrero, México. Elaboración propia.



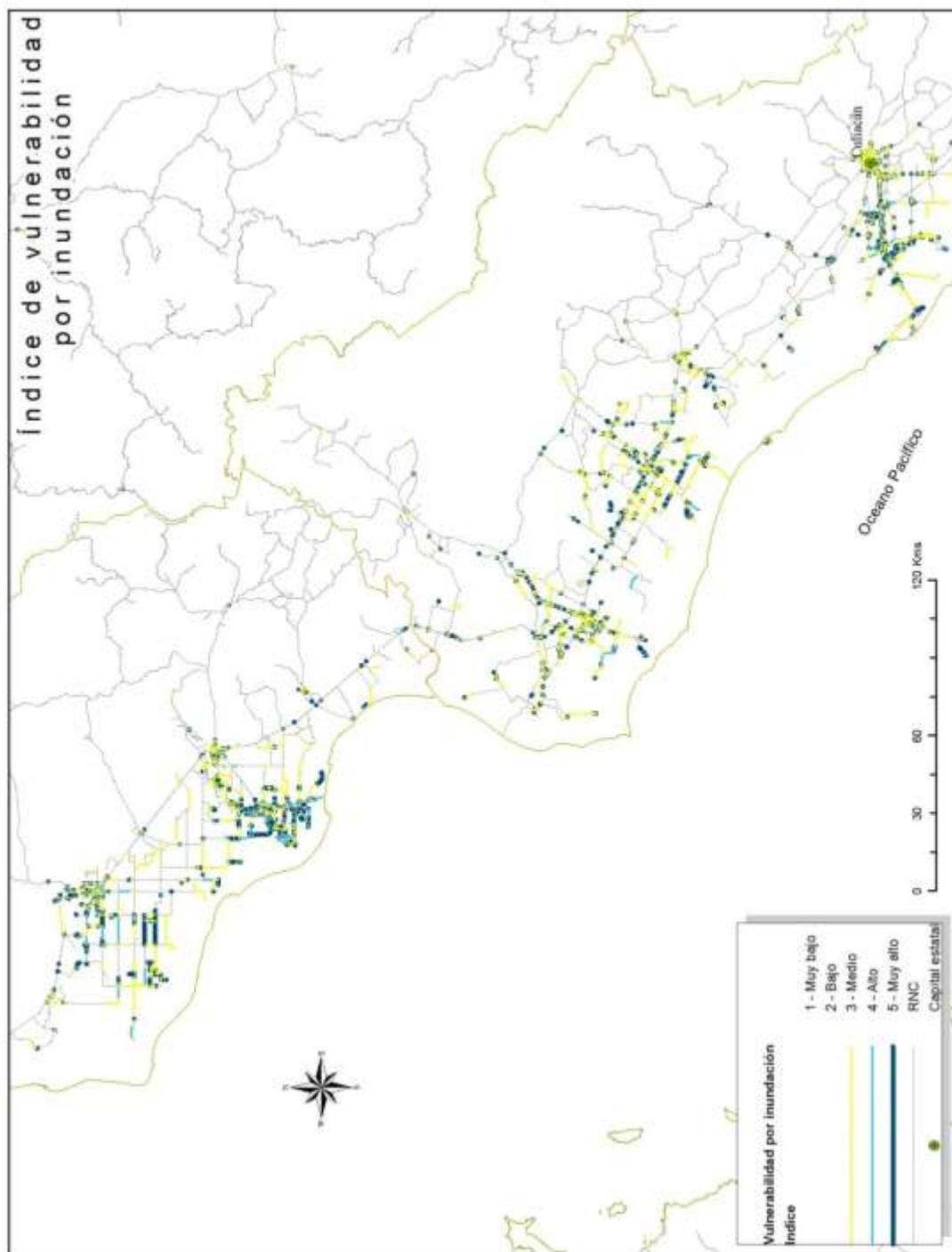
Mapa 13. Índice de vulnerabilidad por deslizamiento y peligro de deslizamiento. Acercamiento a la zona de Guerrero, México. Elaboración propia.



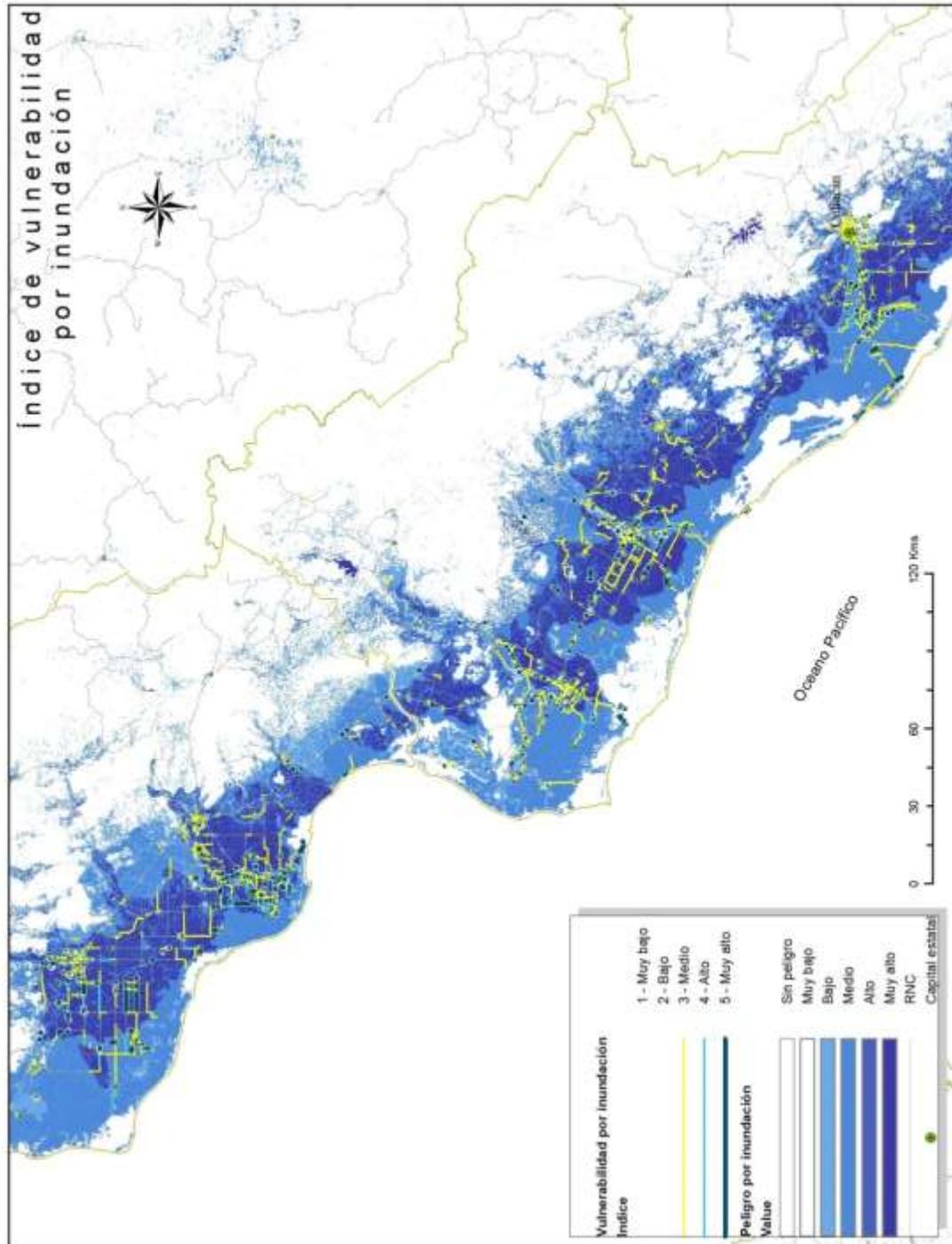
Mapa 14. Peligro por inundación. Elaboración propia.



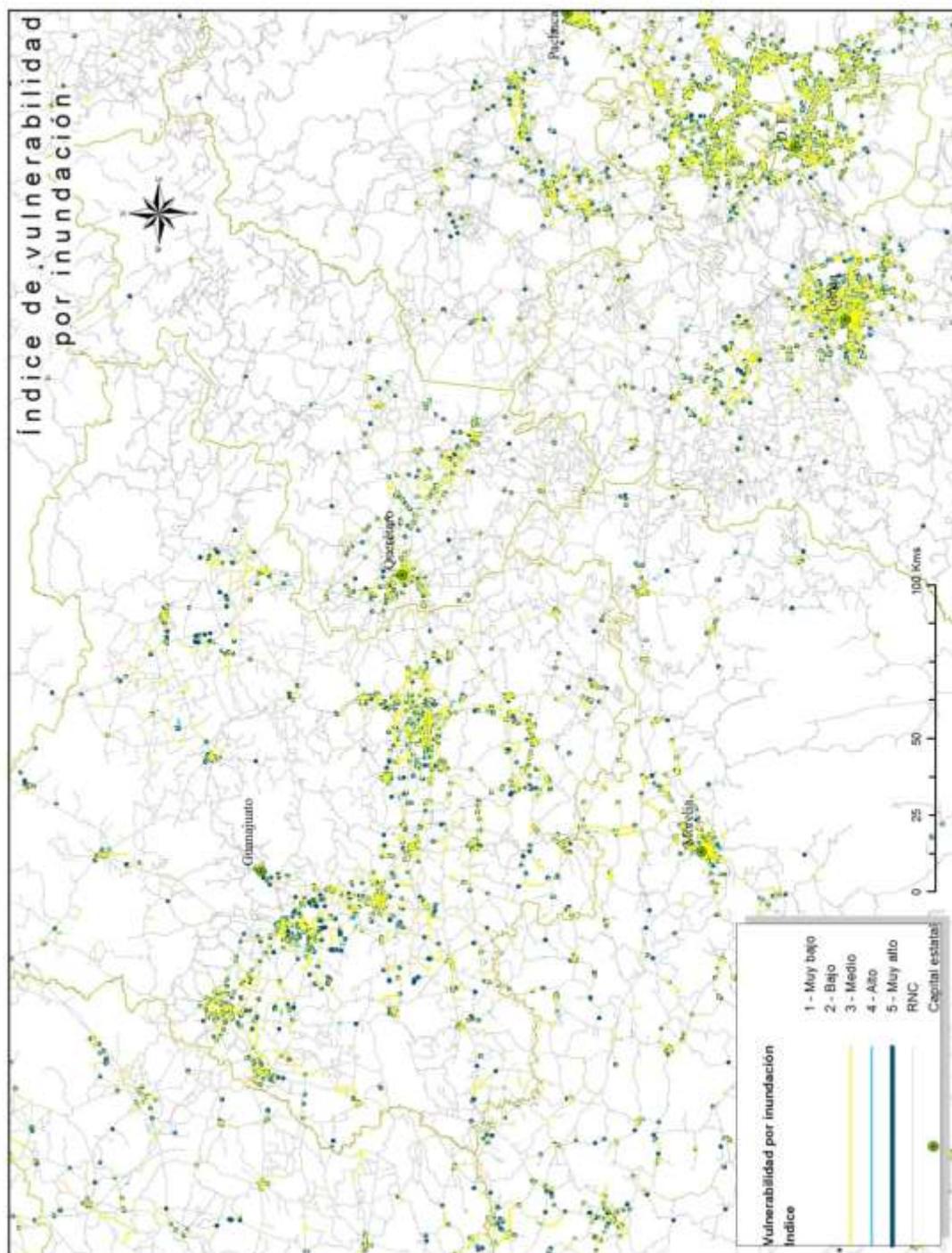
Mapa 15. Índice de vulnerabilidad por inundación. Elaboración propia.



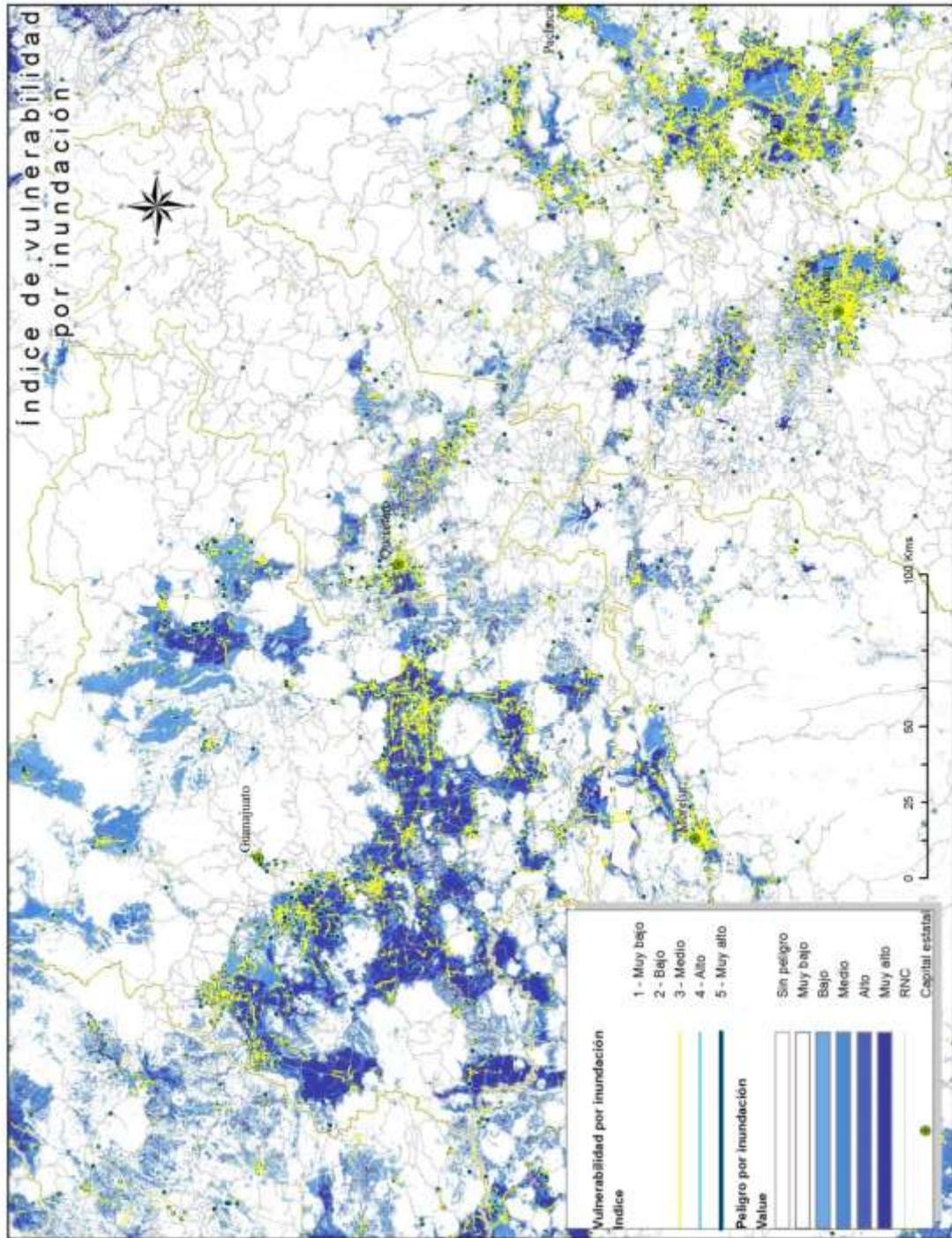
Mapa 16. Índice de vulnerabilidad por inundación. Acercamiento zona Pacífico Norte. Elaboración propia.



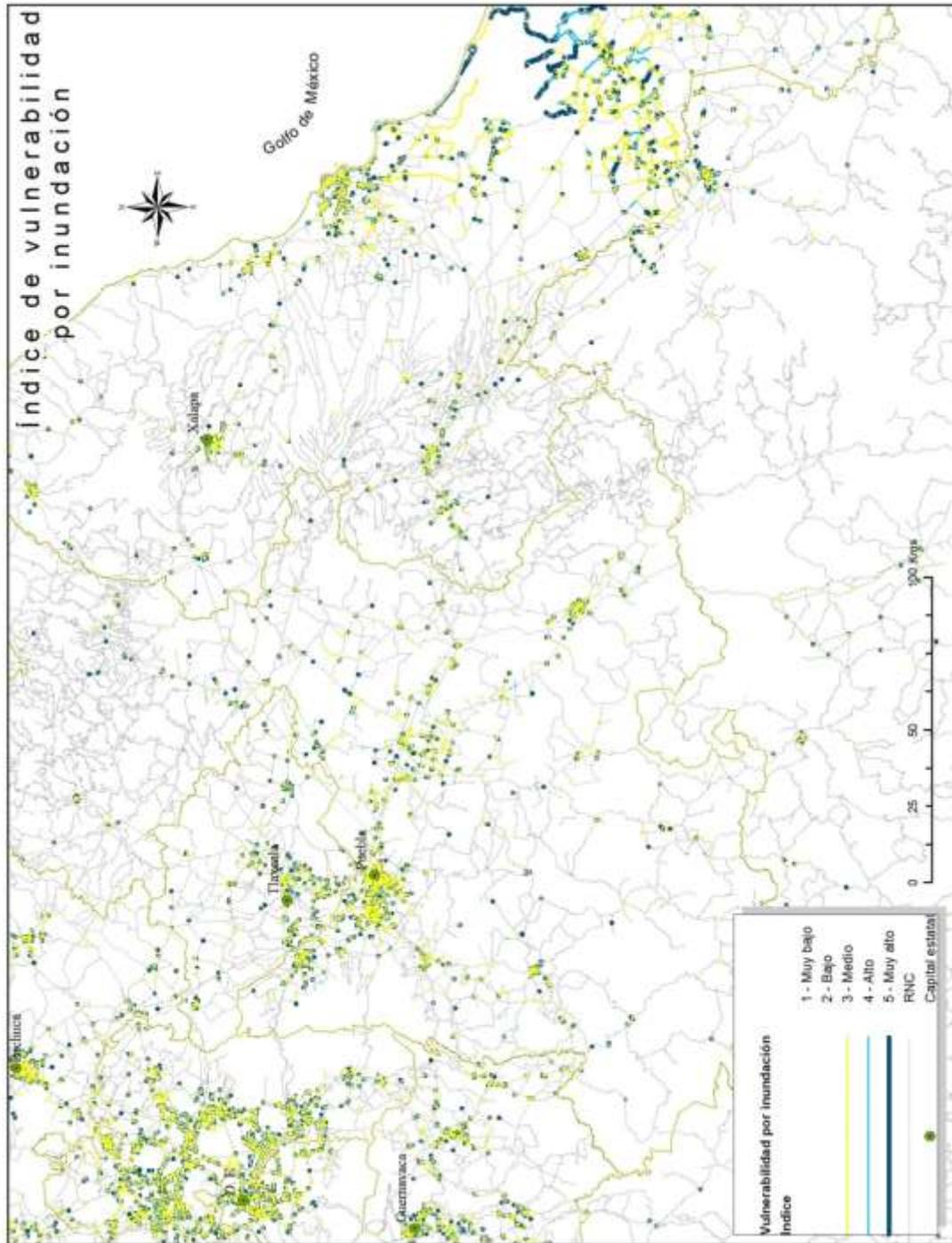
Mapa 17. Índice de vulnerabilidad por inundación. Acercamiento zona Pacífico Norte. Con peligro de inundación. Elaboración propia.



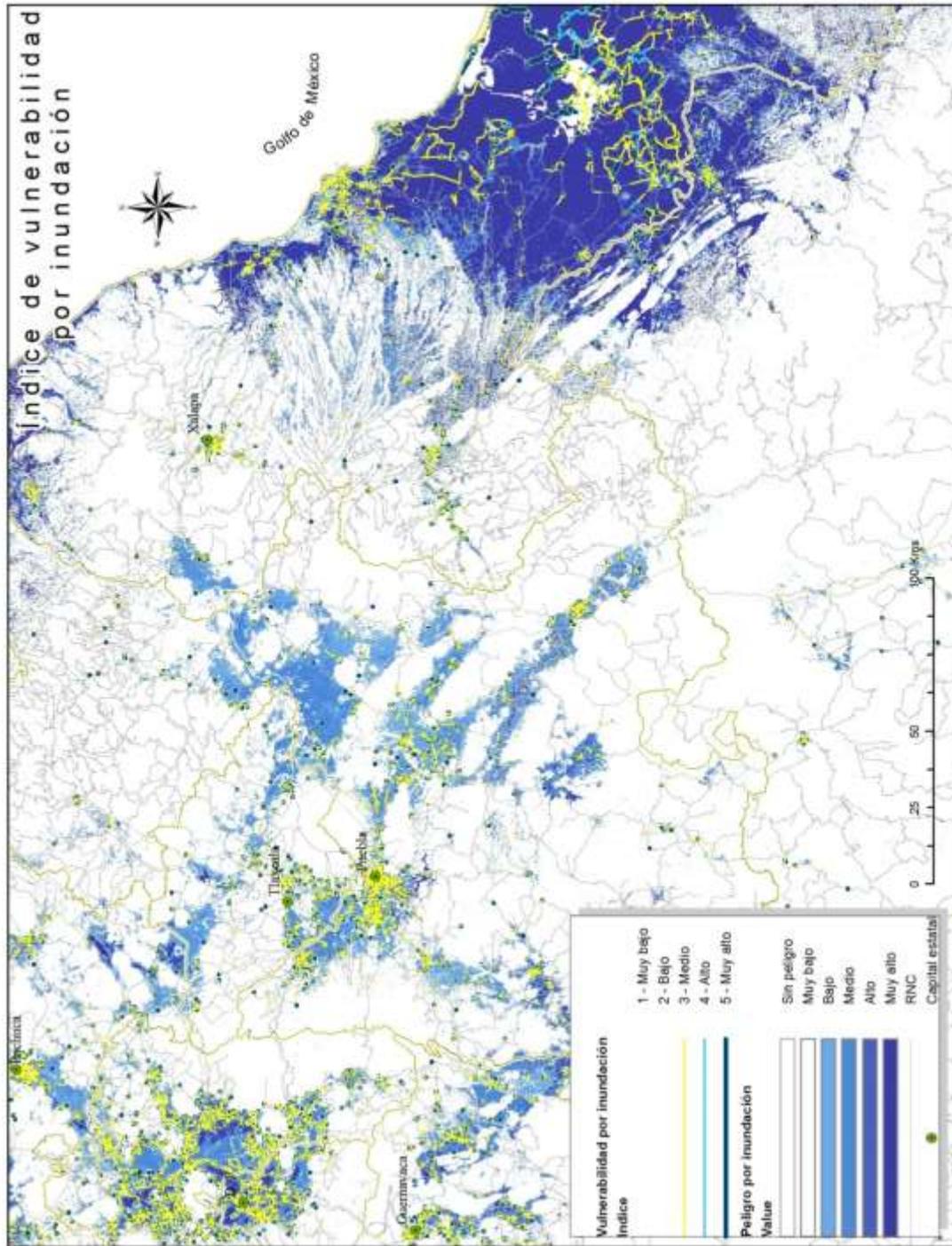
Mapa 18. Índice de vulnerabilidad por inundación. Acercamiento zona Centro – Bajío. Elaboración propia.



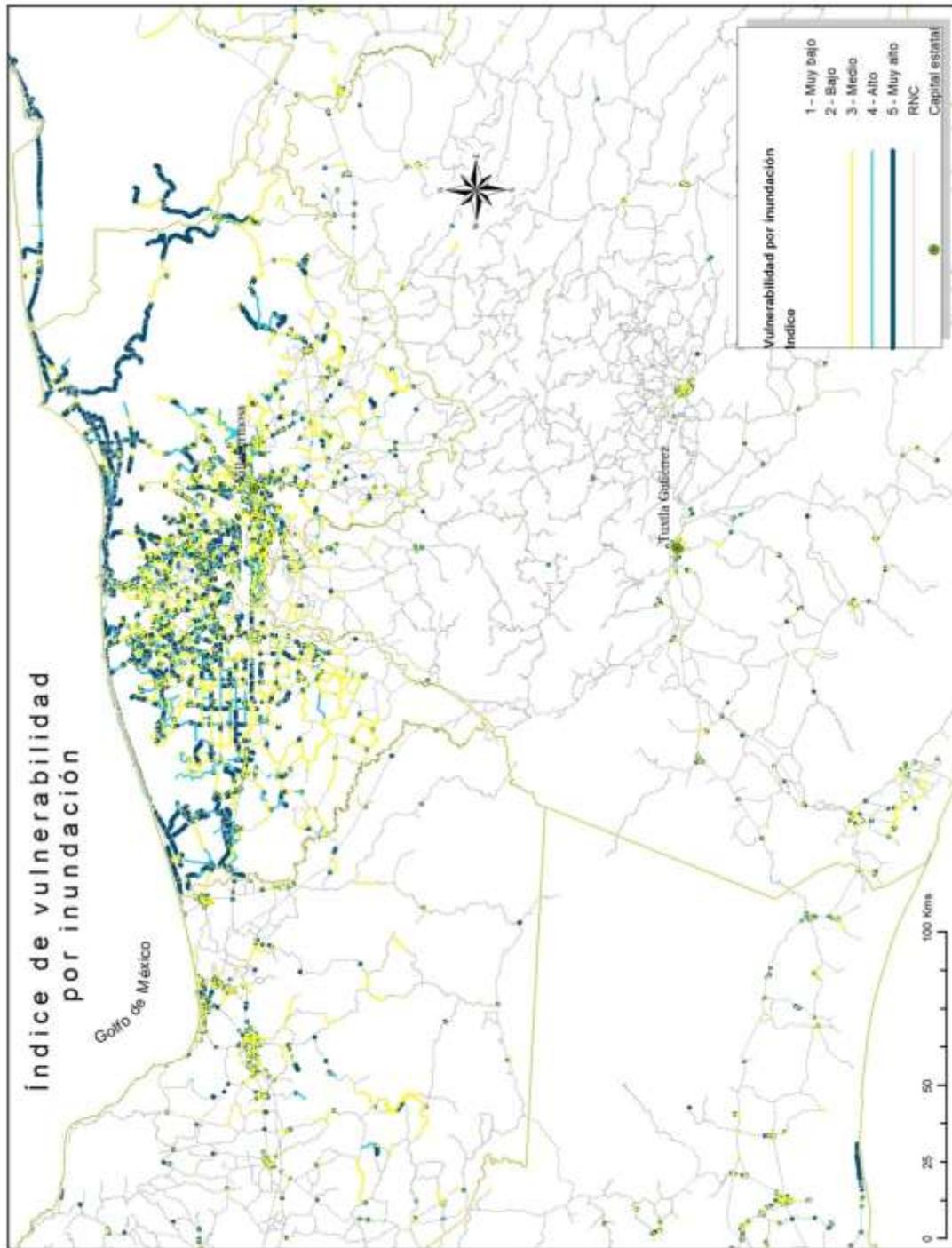
Mapa 19. Índice de vulnerabilidad por inundación. Acercamiento zona Centro – Bajío. Con peligro de inundación. Elaboración propia.



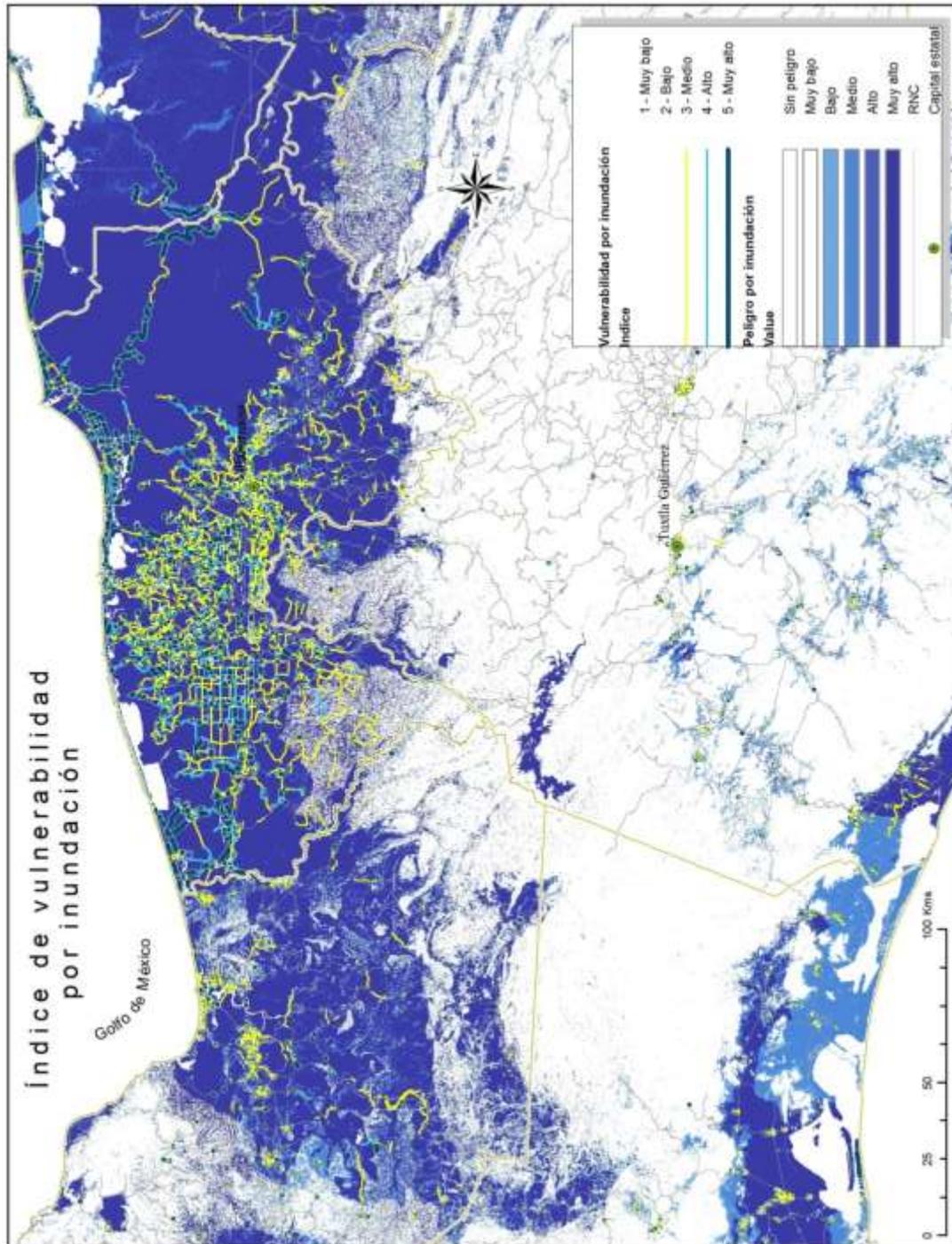
Mapa 20. Índice de vulnerabilidad por inundación. Acercamiento zona Centro – Este. Elaboración propia.



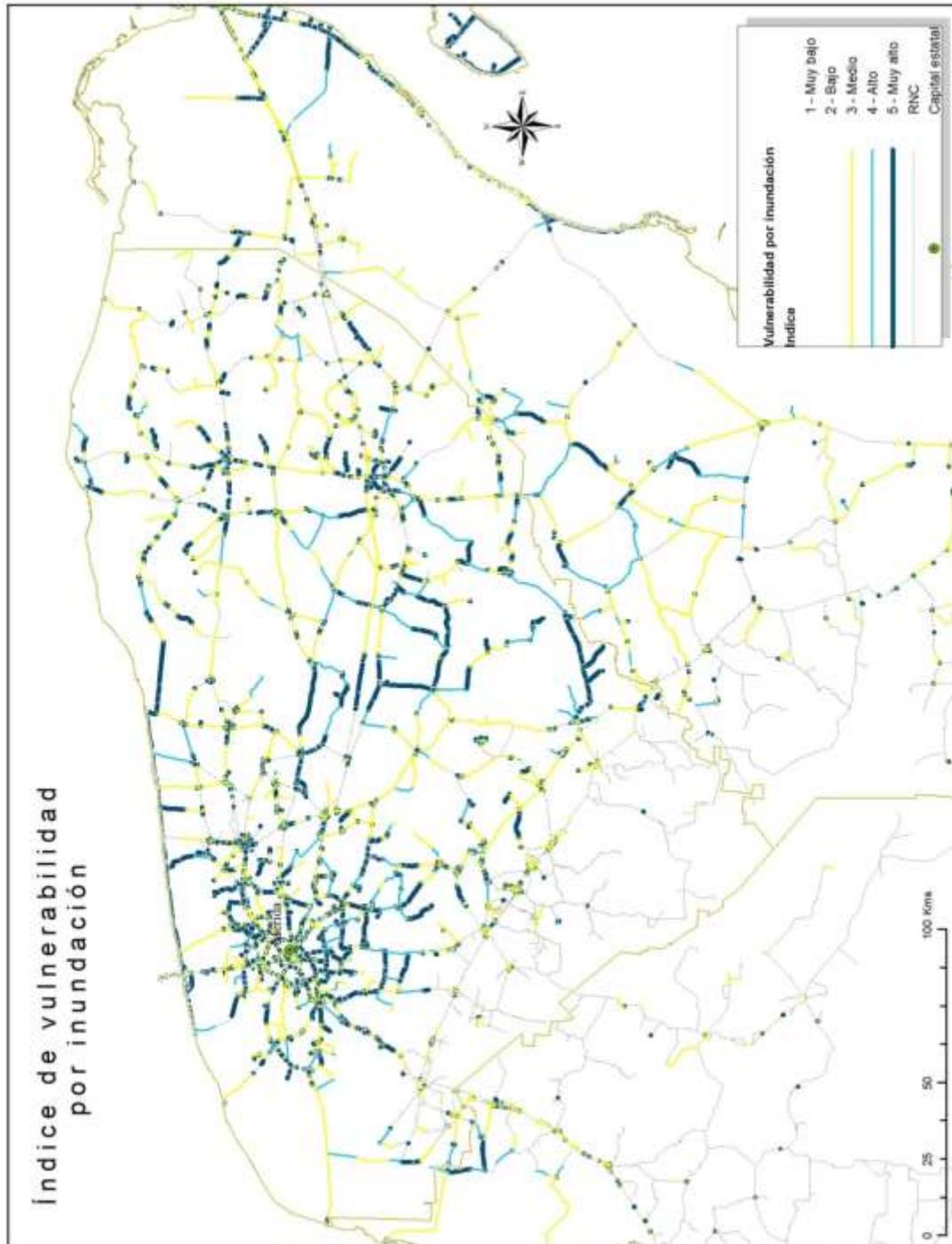
Mapa 21. Índice de vulnerabilidad por inundación. Acercamiento zona Centro – Este. Con peligro de inundación. Elaboración propia.



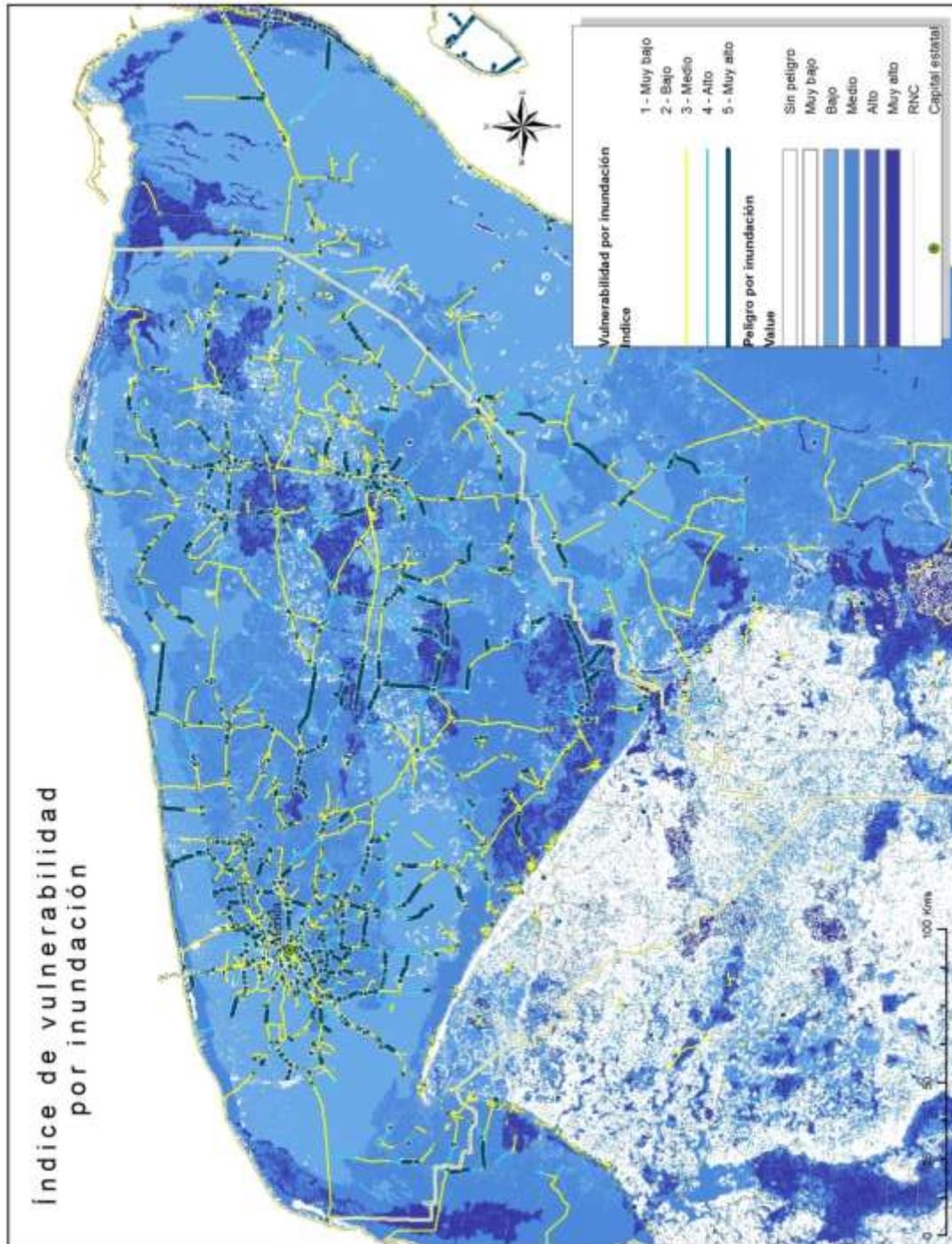
Mapa 22. Índice de vulnerabilidad por inundación. Acercamiento zona Sur – Este. Elaboración propia.



Mapa 23. Índice de vulnerabilidad por inundación. Acercamiento zona Sur – Este. Con peligro de inundación. Elaboración propia.



Mapa 24. Índice de vulnerabilidad por inundación. Acercamiento zona Yucatán. Elaboración propia.



Mapa 25. Índice de vulnerabilidad por inundación. Acercamiento zona Yucatán. Con peligro de inundación. Elaboración propia.

3 Conclusiones

Derivado de las actividades del proyecto así como de la generación de un método indirecto para el cálculo de la vulnerabilidad de carreteras a deslizamientos e inundaciones, ya contamos con la primera versión de la base de datos geoespacial de la Red Nacional de Caminos que lleva integrado tal índice. Esto es de sumo interés para la SCT así como para las dependencias que utilizan dicha información, debido a que podrán identificar las carreteras y los tramos con mayor tendencia a presentar problemas derivados por la ocurrencia de deslizamientos o de inundaciones; de este modo será posible definir acciones enfocadas a minimizar la exposición así como disminuir los posibles daños que se generaran al presentarse el evento.

Este es el primer acercamiento al cálculo de la vulnerabilidad, a través de las características técnicas de las carreteras; por lo que es posible analizar los criterios, redefinirlos y volver a ejecutar el modelo para afinar los resultados; los cuales serían ligados en cualquier momento con la infraestructura adyacente a las carreteras. Así mismo, se podría aplicar el método a la infraestructura de algún otro modo de transporte.

Durante el desarrollo del método y al aplicar las técnicas de análisis espacial, observamos que la sobreposición de las capas que representan la amenaza y la vulnerabilidad va más allá del procedimiento técnico, ya que también hay que entender los conceptos para poder interpretar correctamente los resultados, y en el caso de las carreteras -para el cálculo del riesgo- la vulnerabilidad tiene más peso que el peligro en sí mismo. Esto significa que las características técnicas de la carretera tienen más importancia que la amenaza propia, ya que es este componente el que permitirá hacerle frente a los embates de la naturaleza de una manera eficaz.

En la parte de la socavación de puentes, el proyecto realizado con los estudios de caso presentados confirman que la socavación es un fenómeno muy complejo de analizar, incluso teniendo información detallada de los sitios de interés.

La metodología propuesta hace énfasis en la intensidad de los escurrimientos y en los factores estructurales que pudieren potenciar el peligro por socavación. Consideramos que dicha metodología puede ser de fácil aplicación mediante el uso de técnicas de análisis espacial.

La ponderación diferenciada por región hidrológica brinda una importante herramienta para identificar a los puentes prioritarios en México, expuestos a peligro por socavación. Aunque en esta etapa del trabajo solos abordamos dos zonas a manera de estudios tipo, la manera en que fue planteado el proceso de análisis permite su aplicación en la totalidad del territorio nacional, debido además a que la información base está disponible para todo el país.

Las ponderaciones propuestas fueron hechas con base en el conocimiento y criterio de un especialista y en la magnitud y características de las variables analizadas. Es de notar que al haber evaluado estas regiones; buscamos -en primera instancia- que representaran casos diferentes, para con esto mostrar su aplicabilidad en cualquier región hidrológica de México.

El presente estudio corresponde a un análisis de peligro; resta fortalecer esa etapa con el análisis de vulnerabilidad de los puentes, que permita la obtención del riesgo y en consecuencia entrar a su gestión, a través de la instauración de programas de atención correspondientes y de la identificación de medidas de adaptación apropiadas, que reduzcan el riesgo de los puentes en caso del impacto de algún fenómeno hidrometeorológico extremo.

Algunos de los resultados son:

- Información geoespacial disponible y lista para administración y soporte, análisis de información, generación de mapas digitales, cálculo de rutas, etc.
- Será posible diseñar políticas sectoriales e intersectoriales enfocadas al proceso de gestión de dicha información así como la toma de decisiones a partir del análisis geográfico.
- Toda la información descrita en imágenes cartográficas en este documento se encuentra disponible para ser utilizada en proyectos donde sea requerida; así como los procedimientos de transformación, normalización y estandarización de la información geoespacial.
- Existen mapas digitales que se pueden adaptar o modificar de acuerdo con las necesidades específicas de información o análisis geoespacial.
- Información geoespacial de la Red Nacional de Caminos, con el cálculo del índice de vulnerabilidad.
- Disponibilidad del método propuesto por el Centro Mario Molina A.C.

Bibliografía

- ◆ Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente A.C. *Evaluación del peligro por socavación en Puentes carreteros de México. Estudio de caso*. Documento inédito. Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente A.C. México (2015).
- ◆ Dirección General de Ordenamiento Territorial y Atención a Zonas de Riesgo (Ed.). *Bases para la estandarización en la elaboración de Atlas de Riesgos y Catalogo de Datos Geográficos para representar el riesgo 2013*. Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU). México (2013).
- ◆ Gradilla Hernández, Luz A. *Planeación de infraestructura del transporte: Identificación de tramos críticos para el funcionamiento de redes carreteras*. Publicación Técnica No. 354, Instituto Mexicano del Transporte. Querétaro, México (2011).
- ◆ INEGI, SCT, IMT. *Red Nacional de Caminos*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), Instituto Mexicano del Transporte (IMT). México (2014). Liga de donde se descargó la información geoespacial correspondiente a la Red Nacional de Caminos: <http://imt.mx/micrositios/sistemas-de-informacion-geoespacial/servicios-tecnologicos/red-nacional-de-caminos/acerca-de.html>
- ◆ Magaña, Victor (Resp.). *Guía Metodológica para la Evaluación de la Vulnerabilidad ante el Cambio Climático*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). México (2012).
- ◆ Poggioli, Andrea. Maragnon, Flavio. Valfré, Giulio. *Evaluación del riesgo sísmico de las infraestructuras de carreteras*. Proyecto SIMURAI. Ministerio Italiano de Educación, Universidades e Investigación. Italia (2012).

- ◆ Rodríguez Núñez, Eduardo. Gutiérrez Puebla, Javier. *Análisis de vulnerabilidad de las redes de carreteras mediante indicadores de accesibilidad y SIG: Intensidad y polarización de los efectos del cierre de tramos en la red de Mallorca*. Departamento de geografía humana. Universidad Complutense de Madrid (2012).
- ◆ Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Estrategia Nacional de Cambio Climático Visión 10-20-40*. Primera edición. SEMARNAT. México (2013).
- ◆ Van Westen, C.J. *Análisis de peligro, vulnerabilidad y riesgo*. Department of Earth Systems Analysis. International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation (ITC). Holanda.
- ◆ Vargas, Jorge Enrique. *Políticas públicas para la reducción de la vulnerabilidad frente a los desastres naturales y socio-naturales*. División de Medio Ambiente y Asentamientos Humanos. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Chile (2002).
- ◆ Zepeda Ramos, Oscar. Gonzalez Martinez, Susana (Ed.). *Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México*. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). Secretaría de Gobernación (SEGOB). México (2001).



Carretera Querétaro-Galindo km 12+000
CP 76700, Sanfandila
Pedro Escobedo, Querétaro, México
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610
Fax +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>