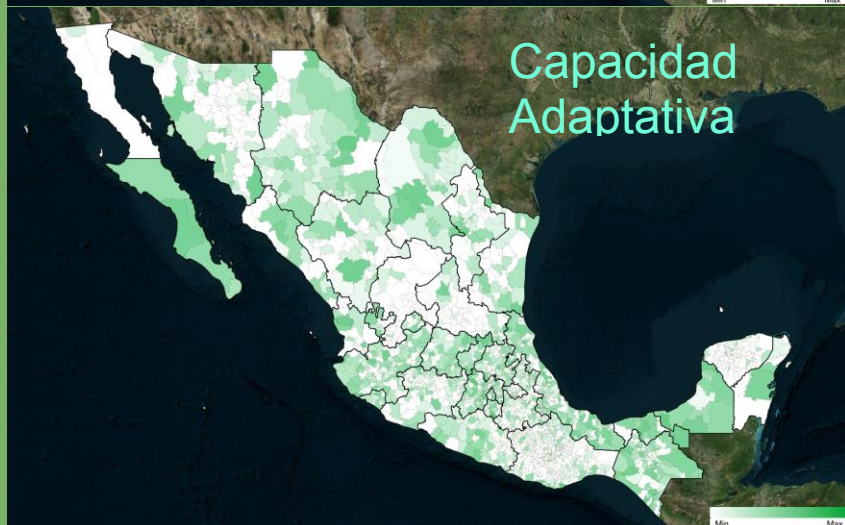


# ASESORÍA PARA EL SEGUIMIENTO TÉCNICO Y DISEÑO DE ÍNDICES DE SENSIBILIDAD Y CAPACIDAD ADAPTATIVA DEL ATLAS NACIONAL DE VULNERABILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO

## 2018

### ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO



Preparado por:  
M. I. Nidya Olivia Aponte Hernández

Elaborado para:  
Coordinación General de Adaptación  
al Cambio Climático

Boulevard Adolfo Ruiz Cortines 4209, 2° piso. Col.  
Jardines en la Montaña, Del. Tlalpan C.p. 4210  
Ciudad de México Tel. +52 (55) 54246400.

[www.inecc.gob.mx](http://www.inecc.gob.mx)

## Contenido

<b>1. Introducción</b> .....	2
<b>2. Objetivo</b> .....	3
<b>3. Metodología</b> .....	3
<b>4. Infraestructura: vulnerabilidad de las carreteras por deslaves</b> .....	4
<b>4.1 Sensibilidad para la vulnerabilidad de carreteras ante deslaves</b> .....	9
<b>4.1.1 Zonas de inestabilidad de laderas para la red carretera</b> .....	11
<b>4.1.2 Conectividad</b> .....	13
<b>4.1.3 Tiempo de viaje</b> .....	14
<b>4.2 Capacidad adaptativa</b> .....	15
<b>4.2.1 Instrumentos para la gestión del riesgo</b> .....	17
<b>4.2.2 Protección civil</b> .....	18
<b>4.2.3 Protección y restauración de ecosistemas</b> .....	19
<b>4.2.4 Conservación de carreteras</b> .....	20
<b>4.3 Recomendaciones generales</b> .....	21
<b>5. Actividades económicas: Vulnerabilidad de la agricultura de riego al estrés hídrico</b> .....	22
<b>5.1 Sensibilidad</b> .....	26
<b>5.1.1 Condiciones hídricas</b> .....	27
<b>5.1.2 Distritos de riego</b> .....	28
<b>5.2 Capacidad adaptativa</b> .....	29
<b>5.2.1 Seguro</b> .....	30
<b>5.2.2 Programas SAGARPA</b> .....	30
<b>5.3 Recomendaciones generales</b> .....	31
<b>6. Referencias</b> .....	32

## **1. Introducción**

El Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático (ANVCC) es una herramienta que da a conocer la vulnerabilidad territorial relacionada con el clima para contribuir en la toma de decisiones en materia de adaptación al cambio climático en el contexto de la planeación del desarrollo.

En la primera fase del proyecto, se definieron el marco teórico y la metodología para desarrollarlo, así como cuatro grupos de trabajo: población, capital natural, actividades económicas e infraestructura. Como resultado de esta primera fase y con la colaboración de más de 30 dependencias de gobierno, se detectaron como problemáticas principales, entre otras, las pérdidas o daños por eventos hidrometeorológicos, deslaves o inundaciones en carreteras para el rubro de infraestructura; y los cambios en la aptitud para el cultivo de maíz de temporal así como la disminución de la productividad agrícola por la degradación de suelos y por el aumento del estrés hídrico, para actividades económicas.

Por lo anterior y con base en la experiencia del equipo del INECC en el desarrollo de la primera fase del proyecto, así como en la disponibilidad de información, y en las características de los indicadores (medibles, relevantes, representativos, sensitivos a cambios, específicos, y claros en cuanto a causa-efecto (Rodríguez Gamiño y López Blanco, 2008); con representación nacional, y que sus datos de origen provengan de fuentes oficiales y sean actualizables (Vermonden, 2017)); en esta asesoría se integraron los criterios y variables para evaluar la vulnerabilidad de las carreteras por deslaves y la vulnerabilidad de la agricultura de riego al estrés hídrico. Se presentan los árboles jerárquicos con los criterios para evaluar los índices de sensibilidad y capacidad adaptativa de cada una de estas problemáticas; se describen las variables y se hacen recomendaciones generales.

## **2. Objetivo**

Diseñar y generar índices de sensibilidad y capacidad adaptativa al cambio climático en los temas de infraestructura y actividades económicas para apoyar la elaboración de la segunda fase del Atlas Nacional de Vulnerabilidad ante el Cambio Climático y dar el seguimiento técnico correspondiente.

## **3. Metodología**

Para llevar a cabo el objetivo de esta asesoría, primero y en conjunto con el equipo del INECC, se definieron las problemáticas con base en la experiencia obtenida en el desarrollo de la primera fase del ANVCC y las necesidades del proyecto. La primer problemática corresponde al grupo de trabajo de infraestructura y se denominó Vulnerabilidad de las carreteras por deslaves; la segunda concierne al grupo de trabajo de actividades económicas y tiene por nombre Vulnerabilidad de la agricultura de riego al estrés hídrico.

Posteriormente, y dado que el marco teórico del ANVCC hace referencia al análisis multi-criterio, se realizó una revisión bibliográfica de publicaciones recientes (años 2015-2018) con referencia a los temas de vulnerabilidad, sistemas de información geográfica y análisis multi-criterio, con el propósito de conocer cómo se han abordado estos temas y en qué contexto; así como una búsqueda específica de información en las páginas electrónicas de dependencias gubernamentales de los sectores correspondientes, de organizaciones de la sociedad civil y en publicaciones académicas para valorar la información disponible.

Con base en el marco teórico descrito en el Plan de trabajo, la revisión bibliográfica y la búsqueda de información de fuentes oficiales, así como en las reuniones de trabajo semanales sostenidas con el equipo del INECC, en las que se discutió y analizó la pertinencia de criterios y variables propuestos, de los cuales algunos fueron excluidos, se definieron los árboles jerárquicos, los índices de sensibilidad y capacidad adaptativa correspondientes y las variables que los integran. Una vez definidos, se integraron las

bases de datos correspondientes para poder generar el análisis multi-criterio y, por último, sugerir algunas recomendaciones generales.

#### **4. Infraestructura: vulnerabilidad de las carreteras por deslaves**

En la Estrategia Nacional de Cambio Climático Visión 10-20-40 se destacan los ciclones tropicales, inundaciones y deslaves como eventos catastróficos a los que está expuesta la infraestructura estratégica. Para Latinoamérica se estima que un 25% de las pérdidas por desastres naturales son asumidas por el sector transportes (De la Peña et al., 2018); con respecto a México, se advierte un alto peligro de inundaciones y deslaves para el 11% de los kilómetros totales de carreteras federales (Gobierno de la República, 2013). Aunado a lo anterior, en la literatura se ha enfatizado que como consecuencia del cambio climático, del incremento de la población y del desarrollo económico en diferentes países, la exposición de las redes de carreteras a las inestabilidades de laderas podría intensificarse (Bordoni et al., 2018), provocar pérdidas humanas, daños en la infraestructura, mayores niveles de mantenimiento, así como la restricción al tránsito y la obstrucción a ciertas áreas a las que no se pueda llegar por rutas alternativas (Bordoni et al., 2018; Mills y Andrey, 2003); y, en consecuencia, originar efectos en cascada que resultan de la dependencia de las economías, instituciones y sociedades en las redes de transporte, por lo que además del daño a las carreteras, que se traduce en esfuerzos de mantenimiento y reconstrucción, también deben considerarse aspectos secundarios, ya que los costos intangibles e indirectos causados por desvíos o retrasos, pueden incluso superar el mero daño a la infraestructura (Schlögl et al., 2018); por lo anterior, resulta fundamental identificar los sectores de la red carretera más susceptibles a deslizamientos (Bordoni et al., 2018).

Un deslizamiento de tierra se puede definir como el movimiento de una masa de rocas, escombros o tierra por una pendiente; puede tener varias causas (geológicas, morfológicas, físicas y humanas), pero solo un detonador; los factores desencadenantes más comunes son las lluvias intensas, el derretimiento rápido de la

nieve, el cambio en el nivel de agua, las erupciones volcánicas y los terremotos (Audisio Nigrelli, Pasculli, Sciarra, y Turconi, 2017). La susceptibilidad a los deslizamientos es la probabilidad espacial de que ocurran con base en las condiciones del terreno; no considera la probabilidad temporal de falla (frecuencia), ni la magnitud del deslizamiento esperado (qué tan grande o destructivo) (Mallick et al., 2018).

Por otro lado, no existe una definición generalizada de vulnerabilidad del sistema de transporte; sin embargo, la sugerida por Berdica (2002) es citada a menudo y representativa de parte de la literatura (Mattsson y Jenelius, 2015): “vulnerabilidad es una susceptibilidad a incidentes que pueden resultar en reducciones considerables de la capacidad de servicio de la red de caminos”; esto es, antes que en la red en sí, se enfoca en los usuarios (la gente, los negocios y los servicios) (Jenelius y Mattsson, 2015).

El análisis de vulnerabilidad del sistema de transporte modela la infraestructura física como una red de vínculos (tramos de camino) y nodos (intersecciones), e implica comparar e integrar los impactos de las interrupciones para los usuarios (Jenelius y Mattsson, 2015). Taylor, Somenahalli y D’Este (2006) relacionaron la vulnerabilidad con las interrupciones en la red, sin considerar la probabilidad de falla, y para su evaluación, consideraron tres índices: el índice integral de accesibilidad de Hansen (1959); el Índice Australiano de Accesibilidad/ Alejamiento (ARIA, por sus siglas en inglés) (DHAC, 2001) y el costo generalizado de viaje (medida de la ineficacia de los viajes, en función de la distancia, el tiempo, el dinero); sin embargo, determinaron que es necesario desarrollar algoritmos, métricas e indicadores más eficientes e integrales para los estudios de vulnerabilidad que cubran redes regionales y nacionales. Por su parte, An, Leng, Wang, Li y –He (2015) establecieron un modelo de vulnerabilidad con base en el tiempo generalizado de viaje, por medio de una ponderación de la relación entre el tiempo de viaje real, el tiempo de viaje a flujo libre y la falta de fiabilidad del tiempo de viaje.

En México, Gradilla-Hernández, De la Llata-Gómez y González-Gómez (2011) propusieron la integración de tres índices de vulnerabilidad de redes carreteras ( $I_a$ ) para identificar tramos críticos mediante una metodología de análisis multi-criterio que

podiera ser aplicada en nuestro país; los criterios que plantearon son la conectividad de pares origen-destino (O-D), la accesibilidad y el tiempo de viaje. El modelo toma la siguiente forma:

$$I_a = f_1 \left( \frac{R_a}{R_0} \right) + f_2 \left( \frac{A_a}{A_0} \right) + f_3 \left( \frac{c_a}{c_0} \right)$$

donde:

$R_a$  es el número de rutas que cruzan el arco  $a$  y conectan los pares de centroides (localidades) de la red analizada;

$R_0$  es el número de rutas totales que conectan la totalidad de los pares de centroides de la red analizada;

$A_a$  es la suma de los índices de accesibilidad de todos los centroides de la red para el escenario base;

$c_a$  es el costo del tiempo de viaje de todo el sistema cuando está totalmente obstruido el arco  $a$ ;

$c_0$  es el costo del tiempo de viaje de todo el sistema cuando están presentes todos los arcos de la red analizada; y,

$f_1, f_2$  y  $f_3$  son los factores de los criterios de conectividad, accesibilidad y tiempo de viaje, respectivamente.

La conectividad se refiere al número de rutas independientes entre cada par O-D de la red carretera bajo estudio (una ruta independiente difiere en todos sus tramos de otras rutas y, por lo tanto, provee redundancia); la accesibilidad se define como la facilidad con la que los individuos de ubicaciones específicas de una región pueden participar en actividades que tienen lugar en otras ubicaciones físicas en y alrededor de la región y mediante el uso de un sistema de transporte (Taylor y D'Este, 2004); es decir, la facilidad y comodidad de acceder a oportunidades espacialmente distribuidas con una opción de viaje (Chen, Claramunt y Ray, 2014) e históricamente se ha medido de muchas diferentes maneras (Chen, Lu, Peng y Ash, 2015); y, por último, el tiempo de viaje se enfoca en el desempeño del sistema de transporte, puede medir la afectación del funcionamiento de la red (Jin, Wang, Xie, Yu y Liu, 2017), y tiene sentido como indicador, dado que refleja la capacidad del sistema para responder a las perturbaciones externas (An et al., 2014).

La conectividad de la red y las opciones disponibles de viaje son medidas básicas de la accesibilidad, que consideran la consecuencia de una o más interrupciones en términos de tiempo de viaje (o costo generalizado del viaje) (Chen, Yang, Kongsomsaksakul y Lee, 2007), el cual, además de que ser medida razonable de la reducción de la accesibilidad, es un fuerte indicador del funcionamiento y la posibilidad de usar la red (Jenelius, Petersen y Mattsson, 2006); es decir, la accesibilidad está en función de la conectividad de la red y del tiempo de viaje, y por esta razón se excluye de los criterios a evaluar para este análisis.

Taylor y D'Este (2004) afirman que para el caso de redes de gran escala, como las regionales o nacionales, los índices relativamente simples son apropiados, por lo que en este análisis los criterios de sensibilidad se limitaron a las zonas de inestabilidad de laderas (CENAPRED, 2014), y a la conectividad, y el tiempo de viaje propuestos por Gradilla-Hernández et al. (2011) como índices de vulnerabilidad propios de las redes carreteras; y, respondiendo a dichos criterios de sensibilidad, como criterios de capacidad adaptativa, se plantearon los instrumentos para la gestión del riesgo, la protección civil, la protección y restauración de ecosistemas para prevenir deslaves y la conservación de carreteras (Figura 1).



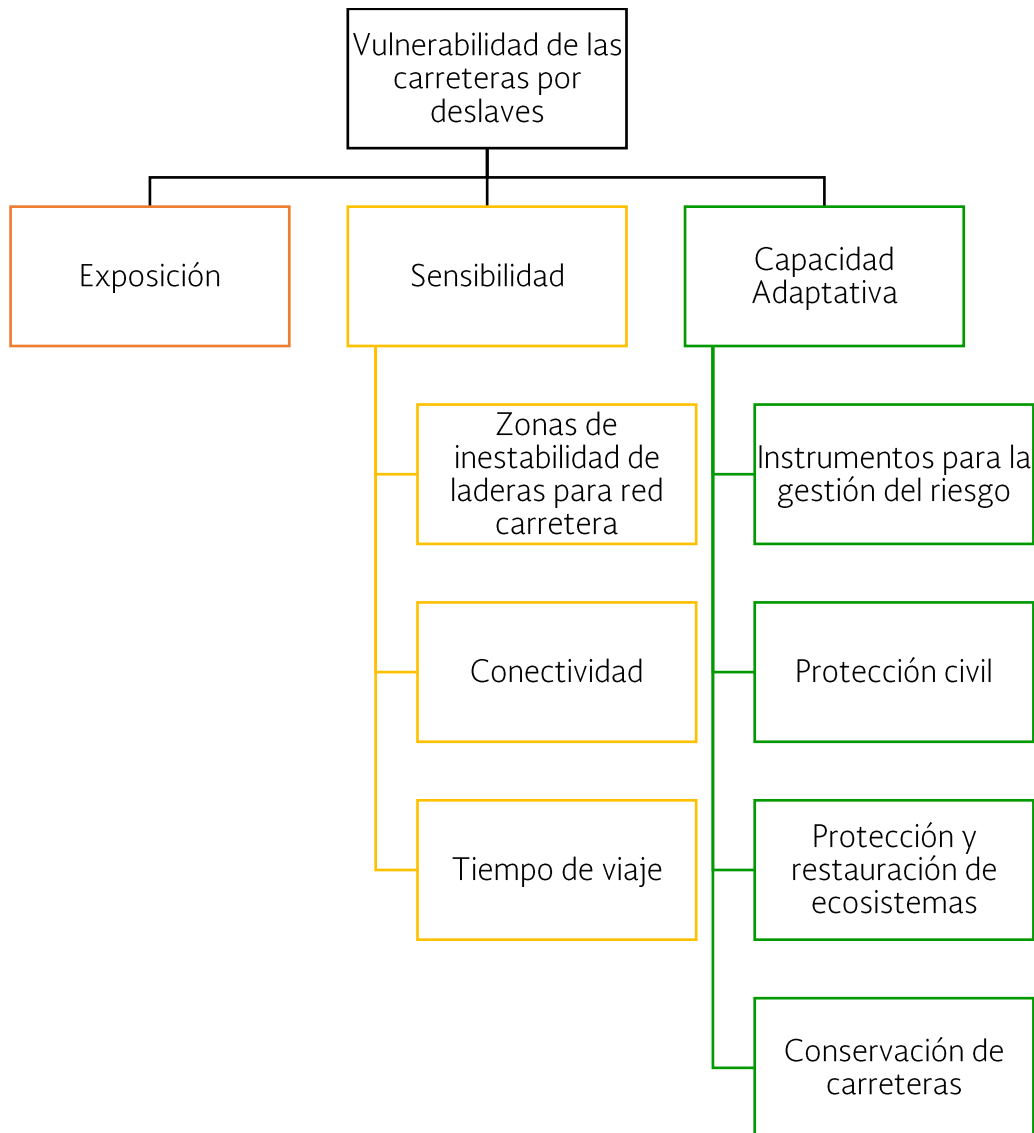


Figura 1. Árbol jerárquico de la Vulnerabilidad de las carreteras por deslaves  
Fuente: elaboración propia

La infraestructura carretera en México está constituida por 377,659 km de longitud, los cuales se dividen entre red federal (49,652 km), carreteras alimentadoras estatales (83,981 km), red rural (169,430 km) y brechas mejoradas (74,596 km) (DOF, 2013). Desde la perspectiva de eficiencia social, los caminos más utilizados son los más importantes, porque dan servicio a una mayor cantidad de personas y negocios y, en consecuencia, generan mayores efectos sociales y económicos indirectos (Jenelius et al., 2006); asimismo, en el Anuario Estadístico del Sector Comunicaciones y

Transportes 2016 (SCT, 2017a), se identifican 15 corredores troncales de la infraestructura carretera nacional, los cuales comunican a todas las capitales estatales, las principales concentraciones metropolitanas, las ciudades medias, los puertos marítimos de relevancia y los accesos a los puentes fronterizos de mayor movimiento (Gómez, Cruz, Dávalos y Arenas, 2017); Gradilla (2011) los consideró en su mayoría como tramos críticos y aquí se han determinado como los tramos a analizar para el estudio de su vulnerabilidad ante deslaves.

#### 4.1 Sensibilidad para la vulnerabilidad de carreteras ante deslaves

Los criterios de sensibilidad (Figura 2) se definieron en función de la definición de vulnerabilidad de Berdica (2002) así como de estudios previos de vulnerabilidad del sistema carretero y de deslaves.

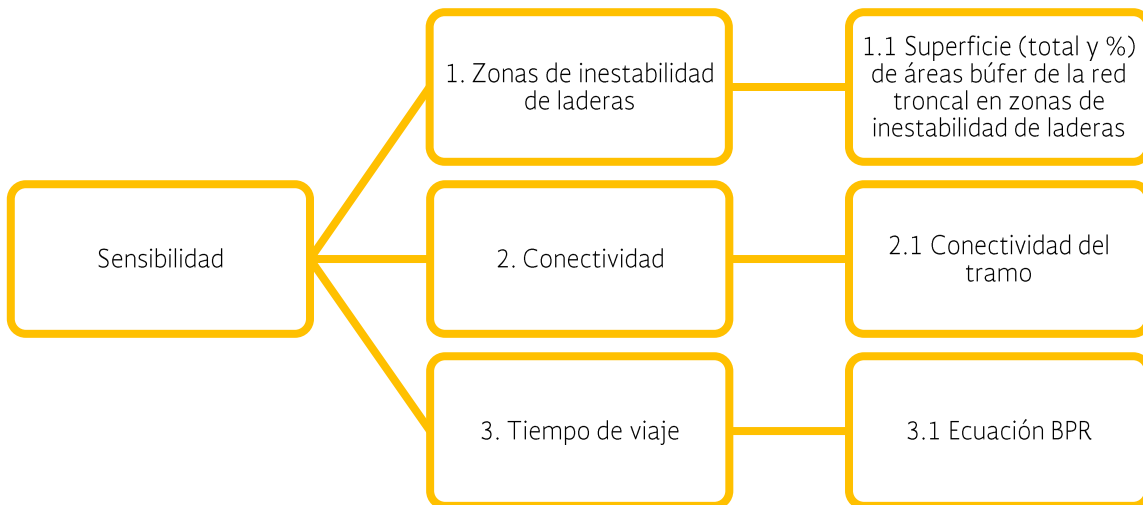


Figura 2. Índice de sensibilidad de la Vulnerabilidad de las carreteras por deslaves  
Fuente: elaboración propia

Dentro de la red federal y con base en la densidad del tráfico de mercancías y pasajeros que anualmente se registran, así como por la importancia de las zonas metropolitanas,

los nodos de producción, los de actividades logísticas y los de consumo que enlazan (Gómez et al., 2017), se han determinado como objeto vulnerable los 15 corredores carreteros principales, los cuales en conjunto suman casi 20 mil kilómetros a lo largo de diferentes ejes longitudinales norte-sur y transversales este-oeste. Para su análisis, se identificaron los tramos O-D que componen la Red troncal (Tabla 1).

Tabla 1. Tramos que conforman la Red troncal

<b>Corredores longitudinales</b>
Transpeninsular de Baja California
México-Nogales, con ramal a Tijuana
Querétaro-Ciudad Juárez
México-Nuevo Laredo, con ramal a Piedras Negras
Veracruz-Monterrey, con ramal a Matamoros
Puebla-Oaxaca-Ciudad Hidalgo
México-Puebla-Progreso
Peninsular de Yucatán
Corredor del Pacífico
<b>Corredores transversales</b>
Mazatlán-Matamoros
Manzanillo-Tampico, con ramal a Lázaro Cárdenas
Mesa del Centro
México-Tuxpan
Acapulco-Veracruz
Círculo Transístmico

Fuente: elaboración propia con información de SCT (2017a) y DGST (2018)

En estos se evaluarán los criterios de sensibilidad que se describen a continuación.

#### 4.1.1 Zonas de inestabilidad de laderas para la red carretera

Corominas et al. (2014) plantearon que la zonificación de la susceptibilidad a deslaves a escala nacional brinda un resumen general de áreas problemáticas para informar a los responsables de las políticas nacionales y al público en general y planificar sistemas de alerta; el trabajo a escala regional es adecuado para planificar proyectos de desarrollo regional o para evaluar posibles restricciones en el desarrollo de proyectos de gran tamaño, así como para planificar sistemas de alerta y planes de emergencia; y los mapas a escala local son muy sensibles a la resolución del modelo digital de elevación y a la calidad de los datos de entrada y tienen suficiente resolución para el para planificar e implementar desarrollos urbanos, sistemas de alerta y planes de emergencia más específicos. La selección de factores difiere según la escala de análisis, las características del área de estudio, el tipo de deslizamiento y el mecanismo de falla. En la siguiente tabla (Tabla 2) se presentan los principales factores que se consideran en la literatura reciente (2015-2018) relativa a deslizamientos, sistemas de información geográfica y análisis multi-criterio.

Tabla 2. Resumen de factores que controlan la ocurrencia de deslaves, su relevancia en la evaluación de susceptibilidad para diferentes mecanismos (R=desprendimientos de rocas, P=deslizamientos de tierra poco profundos y flujos de escombros, G=grandes deslizamientos, movimientos lentos)

Grupo	Parámetros	Relevancia	Tipo de factor		Mecanismo			Referencia
			C	D	R	P	G	
Topografía	Elevación	Las diferencias en la elevación dan como resultado la energía potencial en movimientos de pendientes	x		A	C	A	
	Gradiente de la pendiente	Factor predominante en deslizamientos	x	x	C	C	C	
	Dirección de la pendiente	Podría reflejar diferencias en la humedad del suelo y la vegetación, y juega un papel importante en relación a la discontinuidad	x		C	M	M	
	Longitud, forma, curvatura, rugosidad de la pendiente	Indicador de la hidrología, importante para la modelación de la trayectoria de la desviación	x		C	A	A	
	Dirección y acumulación del flujo	Utilizados en modelación hidrológica de la pendiente; p.ej. Índice de humedad	x		M	C	A	
Geología	Tipo de roca	Determina sus propiedades	x		C	A	C	
	Intemperismo	Tipos (físico/químico), profundidad, zonas y edad	x		C	A	A	
	Discontinuidad	Conjunto y características, relación con la dirección e inclinación de la pendiente	x		C	M	A	
	Aspectos estructurales	Estructura geológica en relación al ángulo y dirección de la pendiente	x		A	A	A	

## Asesoría para el seguimiento técnico y diseño de índices de sensibilidad y capacidad adaptativa del Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático

	Fallas	Distancia a fallas activas o a zonas de falla	x	A	A	A	
Suelos	Tipo de suelo	Propiedades y geometría	x	P	C	A	
	Profundidad del suelo	Determina el volumen potencial movable	x	P	C	A	
	Propiedades geotécnicas	Tamaño de grano, cohesión, ángulo de fricción, densidad aparente	x	P	C	A	
	Propiedades hidrológicas	Volumen de poro, conductividad saturada, curva FP	x	P	A	A	
Hidrología	Agua subterránea	Variaciones espaciales y temporales en la profundidad del nivel freático, presión de poros, succión del suelo	x	x	P	A	A
	Humedad del suelo	Variaciones espaciales y temporales en el contenido de humedad del suelo	x	x	P	A	A
	Componentes hidrológicos	Intercepción, evapotranspiración, caída, flujo superficial, infiltración, percolación	x	x	M	A	A
	Red hídrica y densidad de drenaje	Zonas búfer, densidad de drenaje	x	P	A	A	
Geomorfología	Ambiente geomorfológico	Alpina, glacial, periglacial, costera, tropical	x	A	A	A	
	Deslizamientos anteriores	Las características materiales y del terreno han cambiado, haciendo de estos lugares más propensos a reactivaciones	x	M	A	C	
	Actividad de deslaves pasada	Información histórica de actividad de deslaves	x	C	C	C	
Uso del suelo y factores antropogénicos	Uso del suelo actual	Uso y cobertura del suelo, tipo de vegetación, cobertura del dosel, profundidad y cohesión de las raíces, peso	x	A	A	A	
	Cambio de uso del suelo	Variaciones temporales en uso y cobertura del suelo	x	M	C	A	
	Infraestructura de transporte	Zona búfer a los caminos en áreas con pendiente	x	M	A	A	
	Edificios	Cortes a las pendientes para construir caminos	x	x	M	A	A
	Redes de drenaje e irrigación	Las fugas son causa importante de deslizamientos	x	P	A	A	
	Extracción y minería	Alteran la geometría de la pendiente y la distribución de los esfuerzos. Las vibraciones relacionadas pueden desencadenar deslaves	x	x	A	A	A
	Presas y embalses	Cambian las condiciones hidrológicas	x	x	P	A	A
Terremotos y volcanes	Sismicidad	Relaciones frecuencia/magnitud de los sismos, mapas de intensidad histórica en relación con inventarios de deslizamientos		x	C	C	C
	Mecanismos de falla	Localización y tipos de falla, longitud de la ruptura, enterrada o expuesta, distancia a la falla	x	x	A	A	A
	Tipo de volcán	Altura y composición, estabilidad de la cámara de magma	x	x	M	A	A
	Tipo de erupción volcánica	Explosiones laterales, colapso de las cámaras de magma, flujos piroclásticos, lahares	x	x	M	A	A
Tiempo y clima	Precipitación	Datos diarios o continuos, patrones del clima, relaciones frecuencia/magnitud, curvas IDF, umbrales de precipitación, lluvias antecedentes,		x	C	C	C
	Temperatura	Influencia importante en la hidrología y la condición de la vegetación. Los cambios rápidos en la temperatura, deshielo, permafrost	x	x	A	A	A

Relevancia C (crucial), A (alta importancia), M (importancia media), P (poca importancia). Tipo de factor C (condicionante) y D (desencadenante).

Fuente: Adaptado de Corominas et al. (2014)

Para el caso del ANVCC se consideró como insumo el Mapa Nacional de Susceptibilidad por Inestabilidad de Laderas (CENAPRED, 2014), en el cual se determinaron como factores de susceptibilidad de deslaves a la pendiente de la ladera, las características geológicas (litología) y la cobertura vegetal y uso del suelo; además, utilizaron un inventario de procesos de inestabilidad de laderas para fundamentar el proceso de

ponderación, y ajustar y validar la categorización de los valores de susceptibilidad resultantes (González, Domínguez y Castañeda, 2015). Enseguida se describe la variable para evaluar el criterio de Zonas de inestabilidad de laderas para la red carretera.

- 4.1.1.1** Superficie (total y %) de las áreas búfer de la red troncal en zonas susceptibles a deslaves. Para esta variable se determina una zona búfer a la Red troncal analizada, en la que se precisa si algún pixel se sobrepone a una zona susceptible a deslaves y se promedia el valor de los pixeles por tramo.

#### **4.1.2 Conectividad**

En el sector de transporte es de vital importancia promover la redundancia del sistema, por medio de la construcción de nuevas vías y modos complementarios que permitan minimizar los efectos sobre la operación, de tal manera que si algún elemento en la infraestructura de transporte se ve afectado, por ejemplo, por deslizamientos o bloqueos, el sistema tenga varias alternativas para continuar prestando el servicio (CAF, 2018).

La conectividad es el grado de conexión que tienen las localidades (centroides) de la red carretera, dadas sus características topológicas (Viswanath y Peeta, 2003), es medida por la suma de rutas independientes entre cada par origen-destino, que pretende calcular el grado de vulnerabilidad de toda la red bajo estudio y no especifica estimación alguna de qué tan crítico sea cada tramo (Gradilla, 2011). En la investigación en transporte se han sugerido varios índices para evaluar la conectividad total de una red con base en la teoría de grafos (Chen et al., 2014); sin embargo, para este análisis no se evalúa la conectividad de toda la red, sino de cada tramo en estudio.

- 4.1.2.1** Conectividad del tramo. Para evaluar la conectividad del tramo de análisis se contabilizan los arcos que conectan a cada nodo del par O-D y se

selecciona el mínimo, el cual define la menor conectividad del tramo. A menor conectividad, mayor vulnerabilidad del tramo O-D.

### 4.1.3 Tiempo de viaje

El costo generalizado de viaje es, sin duda, un indicador sólido de la función y la posibilidad de utilizar la red y una medida aceptable de la reducción de la capacidad de servicio es su aumento (Jenelius et al., 2006); sin embargo, dada la dificultad para calcularlo, ya que varía en función del usuario, el propósito y las condiciones de cada trayecto, el tiempo de viaje puede ser utilizado como una medida de cambio del costo generalizado de viaje (Taylor et al., 2006).

**4.1.3.1** La función de la Oficina de la Vía Pública (BPR, por sus siglas en inglés) se utiliza para medir el tiempo de viaje de un tramo de camino, es uno de los logros más importantes en la modelación del tiempo de viaje, y es ampliamente utilizada en el campo de la planeación (Yu-qin, Jun-qiang, Zhong-Yu, Gui-e y Yi, 2013). Su expresión matemática es:

$$T_a = t_a \left[ 1 + \beta \left( \frac{x_a}{C_a} \right)^n \right]$$

donde,

$T_a$  es el tiempo de viaje para el tramo  $a$ ;

$t_a$  es el tiempo de viaje en flujo libre del tramo  $a$ ;

$x_a$  es el flujo de tráfico para el tramo  $a$  (pcu/h);  $C_a$  es la capacidad de tráfico para el tramo  $a$  (pcu/h);

$\beta$  y  $n$  son los parámetros del modelo, cuyos valores recomendados para la red carretera son  $\beta=0.15$ ,  $n=4$  para carreteras de uno a cuatro carriles por sentido y con una velocidad promedio de 91 km/h; pcu es la Unidad de vehículos de pasajeros (Tabla 3), una unidad equivalente asignada mediante un factor (Smith y Blewitt, 2010).

Tabla 3. PCU por tipo de vehículo

Tipo de vehículo	pcu
Motocicleta	0.4
Automóvil	1.0
Vehículo ligero	1.0
Vehículo mediano	1.5
Autobuses	2.0
Vehículos pesados	2.3
Articulados	3.2

Fuente: Smith y Blewitt (2010)

En respuesta a los criterios de sensibilidad descritos anteriormente, y con base en el marco conceptual del ANVCC y la información oficial disponible se definieron los criterios de capacidad adaptativa.

#### **4.2 Capacidad adaptativa**

Dentro de índice de capacidad adaptativa y dado que, como se mencionó anteriormente, antes que en la red en sí, la vulnerabilidad de la red carretera se enfoca en los usuarios (la gente, los negocios y los servicios) (Jenelius y Mattsson, 2015), los criterios de capacidad adaptativa incluyen los instrumentos para la gestión del riesgo y la protección civil, la protección y restauración de ecosistemas así como la conservación de carreteras (Figura 3).



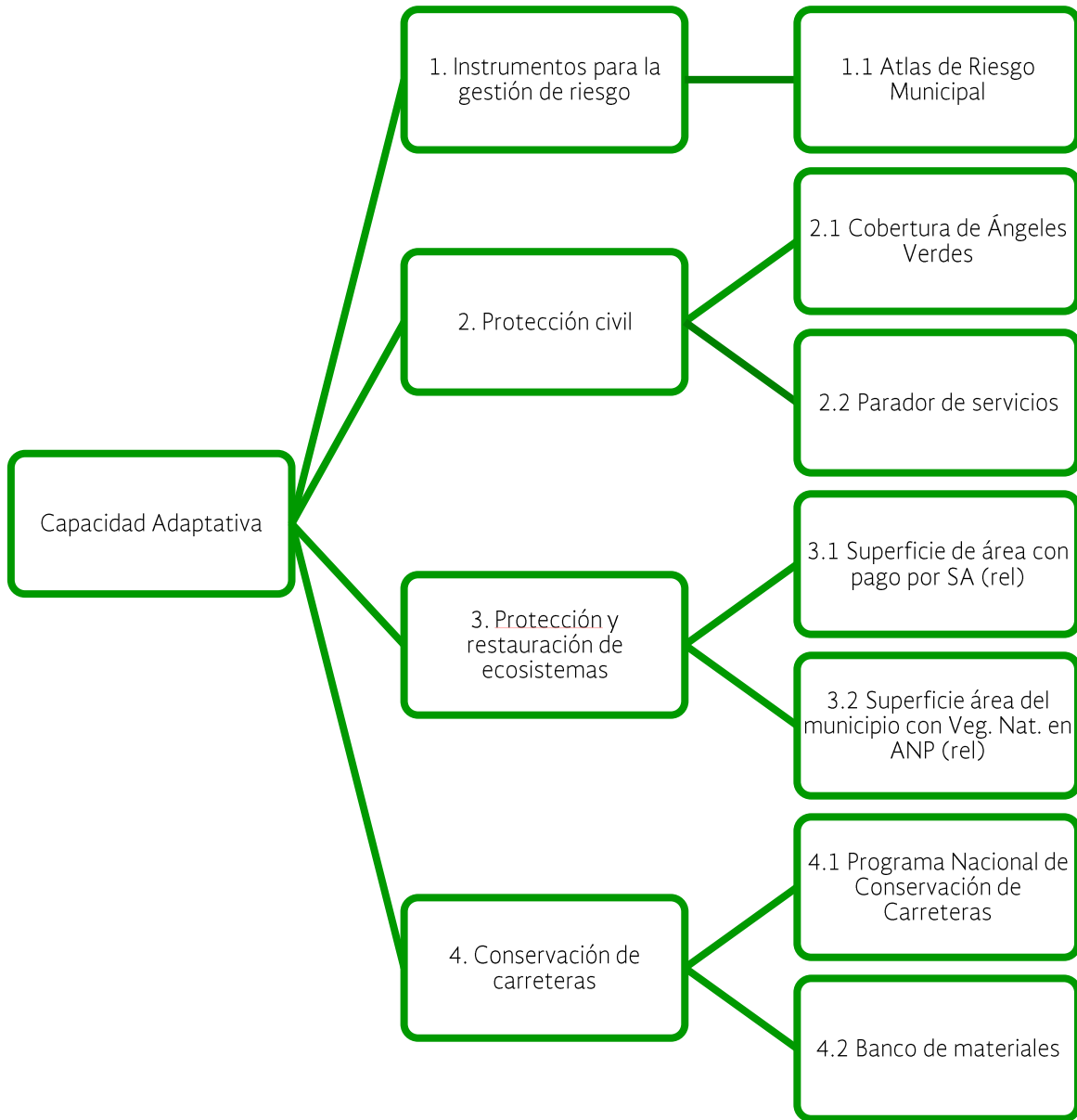


Figura 3. Índice de capacidad adaptativa para la vulnerabilidad de las carreteras a deslaves

Fuente: elaboración propia

A continuación se describen los criterios correspondientes a este índice.

### **4.2.1 Instrumentos para la gestión del riesgo**

El Programa Nacional de Protección Civil (PNPC) 2014-2018 retoma la definición que la Ley General de Protección Civil (LGPC) hace de la Gestión Integral de Riesgos como el conjunto de acciones encaminadas a la identificación, análisis, evaluación, control y reducción de los riesgos, considerándolos por su origen multifactorial y en un proceso permanente de construcción, que involucra a los tres niveles de gobierno, así como a los sectores de la sociedad, lo que facilita la realización de acciones dirigidas a la creación e implementación de políticas públicas, estrategias y procedimientos integrados al logro de pautas de desarrollo sostenible, que combatan las causas estructurales de los desastres y fortalezcan las capacidades de resiliencia o resistencia de la sociedad. La Gestión Integral de Riesgos considera, entre otras, las siguientes fases anticipadas a la ocurrencia de un agente perturbador (LGPC, Art. 10): el conocimiento del origen y naturaleza de los riesgos, además de los procesos de construcción social de los mismos; la identificación de peligros, vulnerabilidades y riesgos, así como sus escenarios; el análisis y evaluación de los posibles efectos; la revisión de controles para la mitigación del impacto; las acciones y mecanismos para la prevención y mitigación de riesgos; el desarrollo de una mayor comprensión y concientización de los riesgos, y el fortalecimiento de la resiliencia de la sociedad (SEMARNAT, 2018). En este sentido, uno de los instrumentos de la gestión del riesgo en fase anticipada es el Atlas de riesgo.

- 4.2.1.1** Atlas de riesgo. El Atlas de riesgo es una herramienta que ayuda a identificar, entre otros aspectos, las zonas susceptibles a deslaves, así como a realizar análisis territoriales, permitiendo desarrollar medidas de prevención para la seguridad de la población y la infraestructura.

## **4.2.2 Protección civil**

La atención a emergencias que se da en primera instancia en la red carretera puede provenir de la Corporación de Servicios al Turista Ángeles Verdes, la cual ofrece orientación, asesoría, asistencia telefónica y mecánica, apoyo a quien lo requiera, así como auxilio a la población en caso de contingencia o desastres naturales (SECTUR, 2018). Asimismo, en los paradores de servicios se pueden brindar los servicios de primeros auxilios y se cuenta con medios de comunicación para solicitar servicios de emergencia (DGST, 2018).

**4.2.2.1** Cobertura de Ángeles Verdes. Los Ángeles Verdes patrullan un promedio de 60,000 kilómetros diarios y brindan apoyo a los viajeros que transitan por las rutas carreteras del país; dan auxilio a la población en general en casos de desastres, entre otros servicios, y disponen de un moderno equipo de radiocomunicación, que permite atender emergencias con mayor eficacia (SECTUR, 2014). Cuentan con un Plan de contingencia para el apoyo en desastres naturales (SECTUR, 2017) en el cual se describen las acciones a realizar en la fases posteriores a huracanes o tormentas, realizan recorridos en la red carretera y verifican aspectos como derrumbes o deslaves, autopistas en su cobertura que se encuentren en riesgo o dañadas, instalan puntos de asistencia e incrementa los servicios de auxilio precautorio y brinda apoyo a los usuarios. Para esta variable se indicará si el tramo en análisis se encuentra dentro de la cobertura de los Ángeles Verdes.

**4.2.2.2** Parador de servicios. Son instalaciones para abastecimiento de combustible, servicios sanitarios, refrigerios, áreas de descanso y estacionamiento, las cuales están equipadas con lo necesario para dar atención de primeros auxilios, con personal médico capacitado, medicamentos, material de curación para brindar un nivel primario de

atención, en el área de estacionamiento es factible recibir un helicóptero con servicio de ambulancia y cuenta con medios de comunicación para solicitar los servicios de emergencia (DGST, 2018). Para esta variable se determinará si existe un Parador de servicios dentro del tramo en análisis.

### **4.2.3 Protección y restauración de ecosistemas**

La cubierta vegetal influye en la cantidad e intensidad de la lluvia que llega al suelo, ya que intercepta la precipitación antes de que alcance la superficie del suelo; además, la evapotranspiración reduce significativamente el grado de saturación resultante y las raíces refuerzan los suelos siendo una de las principales fuerzas que generan resistencia a los mecanismos de deslizamiento (Swanston y Howes, 1994).

En la literatura reciente, el uso del suelo toma un papel destacado como factor para determinar la presencia de deslizamientos (Althuwaynee y Pradhan, 2017; Audisio, et al., 2017; Djerbal, Khoudi, Alimrina, Melbouci y Bahar, 2017; Hung et al., 2016; Murillo-García, Rossi, Ardizzone, Fiorucci, Alcántara-Ayala, 2017; Rahman, Ahmed y Di, 2017; Razavizadeh, Solaimani, Massironi y Kaviani, 2017; Rostami, Al-modaresi, Fathizad y Faramarzi, 2016; ştefan, Sanda, y Ioan, 2018; Thennavan, Ganapathy y Chandra Sekaran, 2016); así mismo, Corominas et al. (2014) señalan al uso del suelo de la zona búfer a los caminos en áreas con pendiente, como un factor de alta importancia y al cambio de uso del suelo como un factor crucial en el análisis de mecanismos de deslizamiento. Asimismo, los mecanismos que provocan deslaves y que se relacionan con factores geológicos, geomorfológicos, e hidrológicos de las pendientes (naturales o no) río arriba son los eventos más extendidos en términos de rutas afectadas (Bordoni et al., 2018); por lo que las barreras naturales en estas zonas son un importante aspecto a considerar. Por lo anterior, se considera de sumo interés la protección y restauración de ecosistemas en áreas búfer de la red carretera. A continuación se describen las dos variables que se toman en cuenta para evaluar este criterio.

**4.2.3.1** Superficie de área con pago por Servicios Ambientales (relativa). Para esta variable se calcula la superficie relativa con Pago por Servicios Ambientales en el área búfer del tramo en análisis para no sobreestimar o subestimar valores.

**4.2.3.2** Superficie de área con vegetación natural en Áreas Naturales Protegidas relativa. Para esta variable se calcula la superficie relativa con Áreas Naturales Protegidas en el área búfer del tramo en análisis para no sobreestimar o subestimar valores.

Así como las barreras naturales en áreas búfer a la red carretera son relevantes para la capacidad adaptativa, la conservación periódica de los caminos es también un importante aspecto a considerar.

#### **4.2.4 Conservación de carreteras**

Como se mencionó anteriormente, los mecanismos que provocan deslaves se relacionan con factores geológicos, geomorfológicos, e hidrológicos de las pendientes (naturales o no) río arriba (Bordoni et al., 2018). En el Programa Nacional de Conservación de Carreteras se da, entre otros aspectos, atención a fallas geológicas; asimismo, la SCT (2017b) ha integrado el Inventario Nacional de Bancos de Materiales, el cual tiene por objeto proporcionar información sobre la existencia y disponibilidad de materiales para la construcción y conservación de las obras en que interviene la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

**4.2.4.1** Programa Nacional de Conservación de Carreteras. Este programa cuenta con obras de reconstrucción, conservación periódica, atención a fallas geológicas, conservación rutinaria de tramos, señalamientos, barreras de protección, conservación rutinaria de puentes, entre otros.

Para esta variable se hace la relación entre el monto de la conservación periódica o rutinaria de tramos sobre la longitud del tramo en análisis.

- 4.2.4.2** Banco de materiales. En el Inventario Nacional de Bancos de Materiales se presenta el tipo de material, el uso probable, su factibilidad de explotación así como si existen restricciones ecológicas para su explotación, además de su localización. Para esta variable se analiza si existe un Banco de materiales en el tramo de análisis.

### **4.3 Recomendaciones generales**

A modo de reflexión, entre los criterios de sensibilidad considerados para la vulnerabilidad de las carreteras a deslaves destaca, para su evaluación, el Mapa Nacional de Susceptibilidad por Inestabilidad de Laderas (CENAPRED, 2014) el cual representa un insumo de gran importancia que puede ser perfeccionado con el Inventario Nacional de Inestabilidad de Laderas (proyecto en desarrollo) (González et al., 2015), ya que los deslizamientos históricos son un factor crucial (Corominas, 2014) en el análisis de susceptibilidad de inestabilidad de laderas y cuya importancia ya ha sido reconocida en un trabajo relativo a los impactos del cambio climático en la red carretera, a saber, la Aproximación Geoespacial para la Adaptación al Cambio Climático de la Infraestructura Carretera en México (Gradilla, Mendoza, Orantes y Marcos, 2018).

Por otra parte, dentro de los criterios correspondientes a la capacidad adaptativa, es necesario que se desarrollen e implementen instrumentos específicos para la gestión del riesgo y la Adaptación al cambio climático de la red carretera; Gradilla et al. (2018) mencionan que la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), realizó acciones entre 2015 y 2016 para implementar el Marco Internacional para la Adaptación de la Infraestructura de Carreteras ante el Cambio Climático (figura 4) en carreteras federales de dos estados

de la república mexicana. Este marco es la base para identificar y priorizar riesgos en el sector carretero así como para desarrollar respuestas de adaptación eficaces.

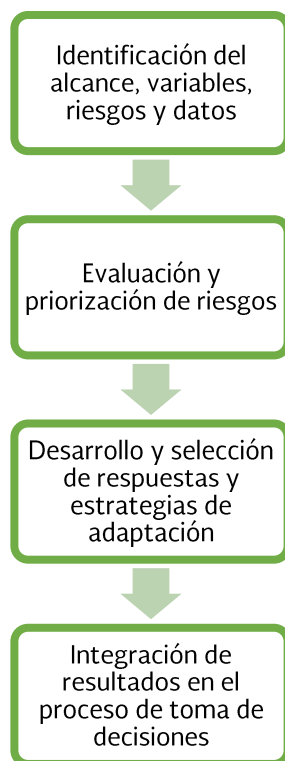


Figura 4. Marco Internacional para la Adaptación de la Infraestructura de Carreteras ante el Cambio Climático  
Fuente: AMC (2015)

Por último, cabe señalar la importancia de la colaboración interinstitucional en la identificación de las problemáticas, en la definición de los criterios y variables a analizar para cada una de ellas, así como en el acceso a la información relativa.

## **5. Actividades económicas: Vulnerabilidad de la agricultura de riego al estrés hídrico**

Desde hace más de una década ha sido de gran interés el estudio de los impactos (Gay, Estrada, Conde, Eakin y Villers, 2006; Ojeda-Bustamante, Sifuentes-Ibarra, Íñiguez-

Covarrubias y Montero-Martínez, 2011) y de la vulnerabilidad (Monterroso-Rivas et al., 2018) al cambio climático de la agricultura en nuestro país.

En la Encuesta Nacional Agropecuaria 2017 se reportó que la superficie de riego fue de 6.8 millones de hectáreas (21%), contra 25.6 millones de hectáreas de temporal (79%) (INEGI, 2018); sin embargo, aunque la superficie cosechada bajo riego es menor que la de temporal, la productividad bajo riego (expresada en \$/ha) es 300% mayor; por lo cual, las zonas de riego contribuyen con 53% y las zonas de temporal con 47% del valor total de la producción cosechada (Ojeda-Bustamante, Flores-Velázquez, Ontiveros-Capurata e Íñiguez Covarrubias, 2015). Los principales tipos de irrigación son por gravedad (70.8%) y por goteo (15.6%) el resto son por aspersion, microaspersion, riego en tiempo real y otros (INEGI, 2018).

De acuerdo con las Estadísticas del Agua en México (CONAGUA, 2017), en el año 2016 se registraron en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) 42.21 miles de hm<sup>3</sup> de origen superficial y 23.84 miles de hm<sup>3</sup> de origen subterráneo para el uso agrícola agrupado (incluye uso pecuario, acuicultura y otros, pero es principalmente para riego), el mayor uso de agua en México.

Dada la importancia de la irrigación en el sector agrícola, se han analizado los impactos en la demanda y disponibilidad de agua para riego (Gondim, Silveira, de Souza, Vasconcelos y Cid, 2018); el cambio climático podría afectar profundamente el balance de agua y, más específicamente, la demanda de agua para agricultura de riego (Chaturvedi et al. 2015; Moratíel et al. 2010; Sun et al. 2012; Yano et al. 2007; en Ojeda-Bustamante, Ontiveros-Capurata, Flores-Velázquez e Íñiguez-Covarrubias, 2017).

En un estudio previo de vulnerabilidad de la agricultura al cambio climático, Ojeda-Bustamante et al. (2015) consideraron para el índice de exposición las anomalías de temperatura y precipitación así como eventos extremos como sequías y ciclones; para sensibilidad aspectos de población, tamaño de parcela, uso de fertilizantes, registro de eventos catastróficos, evapotranspiración de referencia, degradación de suelos y acuíferos, cultivos perennes, diversidad de cultivos, variabilidad en la precipitación, siniestralidad, rendimiento, precipitación acumulada y ondas de calor (Tabla 4).



Tabla 4. Variables y fuentes para estimar la vulnerabilidad como componente de la vulnerabilidad al cambio climático en el Atlas de Vulnerabilidad Hídrica

Indicador	Unidad	Relación del indicador con la vulnerabilidad	Fuente
Población rural	% población con menos de 5,000 habitantes	Rural ↑ => Vul ↓	CONAPO (2010)
Tamaño parcela	Superficie de la parcela media de riego	Sup ↑ => Vul ↓	Censo agropecuario 2007 (INEGI, 2009)
Uso de fertilizantes	Uso de fertilizantes	Fertiliza ↑ => Vul ↓	Censo agropecuario 2007 (INEGI, 2009)
Eventos catastróficos	Eventos catastróficos hidrometeorológicos en ámbito municipal, registrados por Fonden y Sagarpa	Catastróficos ↑ => Vul ↑	Base de datos de eventos catastróficos (CENAPRED, 2013)
Evapotranspiración	Evapotranspiración anual de referencia acumulada	ETo ↑ => Vul ↑	Trabucco y Zomer, (2009)
Degradación de suelos y acuíferos	Suelos con problemas de sales solubles y/o sodio intercambiable y acuíferos con problemas de salinización intrusión salina o sobreexplotación,	Degrada ↑ => Vul ↑	INEGI (1998); CONAGUA (2009)
Cultivos perennes	% de cultivos perennes con respecto a cultivos anuales (OI+PV); promedio para los años agrícolas 2002-2011	Perennes ↑ => Vul ↑	SIAP (2013)
Diversidad de cultivos	Índice adimensional estimado con la ecuación 5.2, que relaciona la suma de cuadrados de las superficies por cultivo con respecto al cuadrado de la suma total de la superficie cosechada por ciclo agrícola. Promedio para los años agrícolas 2002-2011	Id ↑ => Vul ↓	SIAP (2013)
Variabilidad en la precipitación	Desviación estándar de la precipitación anual acumulada en periodo base (1971-2000)	Desv ↑ => Vul ↑	Base de datos histórica de CRU (Harris et al., 2014)
Siniestralidad	Siniestralidad promedio, superficie siniestrada con respecto a la sembrada por ciclo agrícola, para los años agrícolas 2002-2011	Siniestros ↑ => Vul ↑	SIAP (2013)
Rendimiento	Rendimiento máximo del maíz de riego en ámbito municipal para los años agrícolas 2002-2011	Rend ↑ => Vul ↓	SIAP (2013)
Precipitación acumulada	Precipitación acumulada promedio en el ciclo agrícola para el periodo base (1971-2000)	Precip ↑ => Vul ↓	Base de datos histórica de CRU (Harris et al., 2014)
Ondas de calor	Ondas de calor promedio en el ciclo agrícola, asumidas cuando Tmax diaria en el mes es mayor de 30 °C para el periodo base (1971-2000)	Calor ↑ => Vul ↑	Base de datos histórica de CRU (Harris et al., 2014)

Fuente: Ojeda-Bustamante et al. (2015)

Para esta asesoría, se determinó como problemática la vulnerabilidad de la agricultura de riego ante estrés hídrico, por lo que se descarta el aumento en la precipitación y los eventos extremos relacionados.

Un distrito de riego (DR) es una zona geográfica con un conjunto de canales de riego, una o más fuentes comunes de abastecimiento de agua y áreas de cultivo. Los DR cuentan con decreto de creación por parte del poder ejecutivo federal, con un título de concesión otorgado a los usuarios organizados en asociaciones civiles para uso de las aguas y la administración, operación y conservación de la infraestructura hidroagrícola federal. Al año 2012, la Gerencia de Distritos de Riego de la Comisión Nacional del Agua (Conagua) reportó la operación de 88 DR en el país, con alrededor de 3.4 millones de

ha y 560000 usuarios, agrupados en 469 asociaciones civiles de usuarios (ACU) y 15 Sociedades de Responsabilidad Limitada (SRL) (Pedroza e Hinojosa, 2014). Existen otras áreas de riego fuera de los distritos, las Unidades de Riego (UR), o bien Unidades de Riego Para el Desarrollo Rural (Urderal). La comparación entre sus características se hace en la siguiente tabla (Tabla 5), dadas sus características, el análisis de la vulnerabilidad de la agricultura de riego se hace exclusivamente para los distritos de riego.

Tabla 5. Comparación entre los distritos de riego y las unidades de riego

<b>Característica</b>	<b>Distrito de riego</b>	<b>Unidad de riego</b>
Superficie (ha)	Mayor a 2000	Menor a 500
Propiedad infraestructura	Federal	Particular y/o ejidal
Particular y/o ejidal	Particular y/o ejidal	Particular y/o ejidal
Cantidad	88	39000, aproximadamente
Organización de usuarios	Asociación civil de Usuarios	Sociedades no formales, organizadas para la concesión
Título de concesión	Agua, infraestructura y maquinaria	Agua
Supervisión de la operación	Permanente por CONAGUA	Eventual
Planificación del riego	Plande Riego autorizado por la CONAGUA	Indefinido
Entorno económico	Influencia regional, estatal	Influencia local
Cuotas de riego	Se enteran parcialmente la SHCP, y para uso de la ACU	Son de uso particular
Régimen legal asociación	Código civil del estado	Usos y costumbres

Fuente: Pedroza e Hinojosa (2014)

La variabilidad de la precipitación y el riesgo de sequías tienen una alta correlación con las zonas áridas del México, al corresponder la mayor variabilidad o riesgo con aquellas catalogadas como áridas o semiáridas (Florescano, Sancho y Gavilán, 1980) y, dado que no hay una definición consensuada de sequía o un indicador que pueda aplicarse a todos los tipos de sequías y regímenes climáticos, aquí se presentan indicadores para evaluar la vulnerabilidad de la agricultura de riego al estrés hídrico.

Con base en la revisión bibliográfica, en la representatividad espacial y temporal, y en la información oficial disponible, se definió el siguiente árbol jerárquico (Figura 6) para evaluar esta problemática.

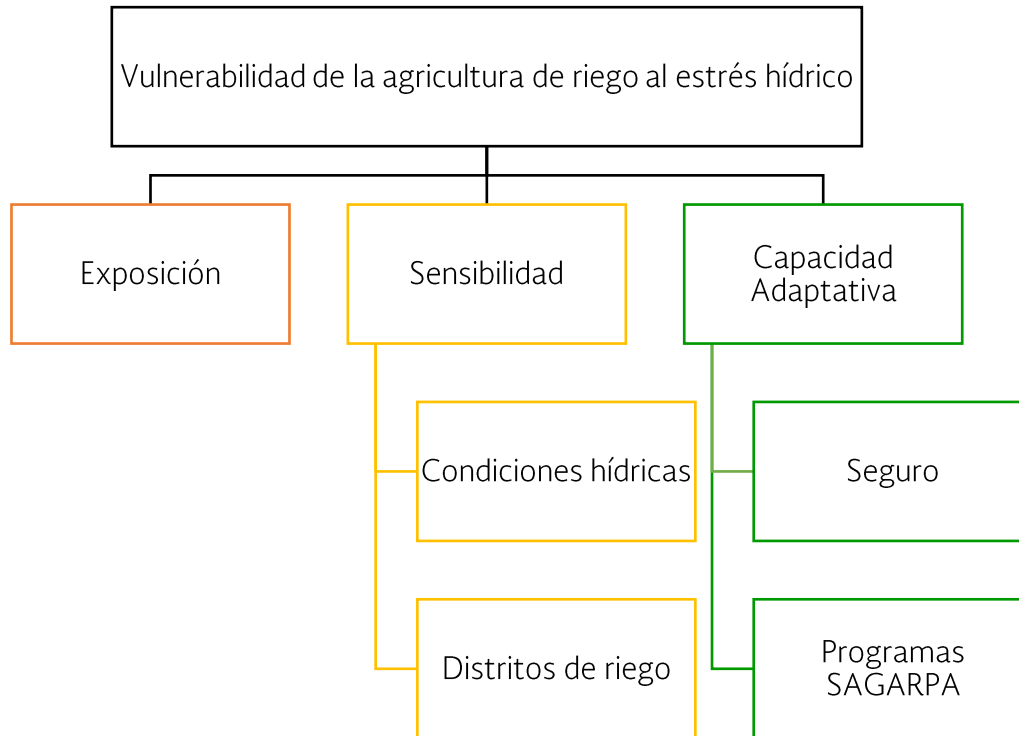


Figura 5. Árbol jerárquico de la vulnerabilidad de la agricultura de riego al estrés hídrico

Fuente: elaboración propia

Enseguida se describen los criterios de sensibilidad y capacidad adaptativa de esta problemática, así como las variables que los conforman.

### 5.1 Sensibilidad

Los criterios que se definieron para evaluar la sensibilidad son las condiciones hídricas, que corresponden a indicadores de desempeño ambiental; y los indicadores relacionados con la operación de los distritos de riego, relativos al desempeño del

suministro de agua, según la clasificación de Bos, Murray-Rust, Merrey, Johnson y Snellen (1994); dichos criterios se evaluarán para cada DR.

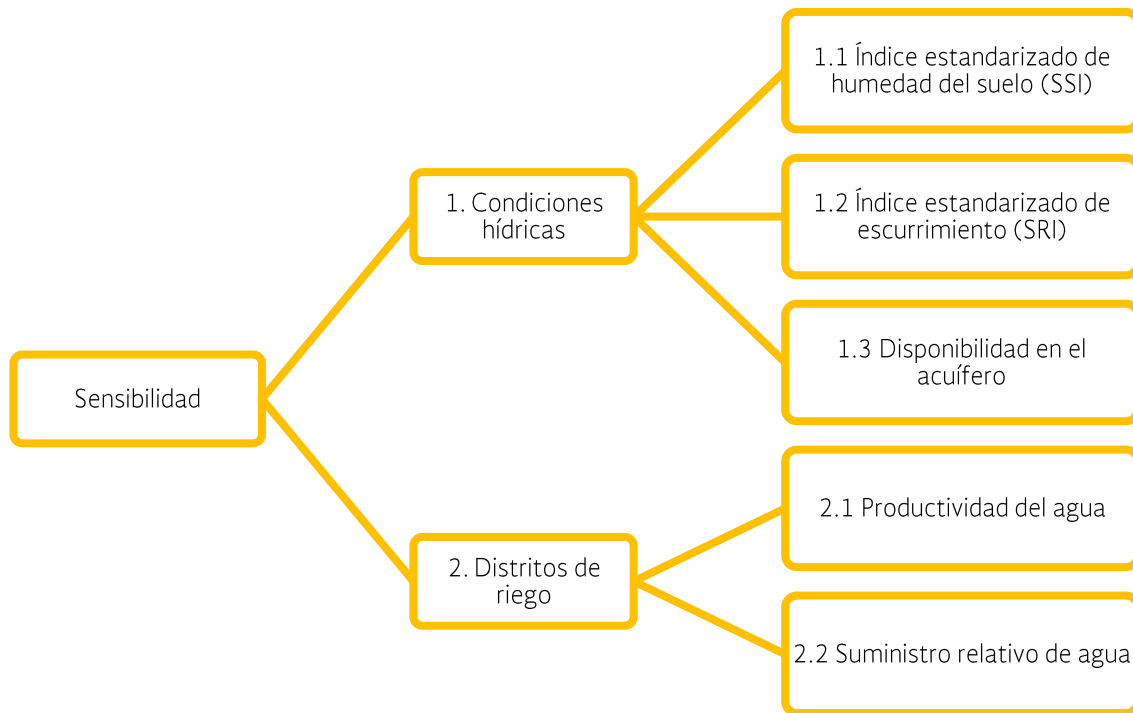


Figura 7: Índice de sensibilidad de la vulnerabilidad de la agricultura de riego al estrés hídrico

Fuente: elaboración propia

### 5.1.1 Condiciones hídricas

Las condiciones hídricas se evalúan mediante los índices estandarizados de humedad del suelo y de escurrimiento, producto del Monitor de Sequía Multivariado en México (MoSeMM) (CONAGUA, 2018) y parte del esfuerzo que ha realizado la CONAGUA en conjunto con el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, así como con la disponibilidad en el acuífero.

**5.1.1.1** Índice estandarizado de humedad del suelo (SSI). Evett, Schwartz, Casanova y Heng (2012) destacan la importancia de la humedad del suelo para el cálculo del balance hídrico, de la evapotranspiración y de la

eficiencia en el uso del agua; así como de la dificultad de obtener este tipo de datos. Con base en la propuesta original de McKee, Doesken y Kleist (1993), ajustando una distribución gamma a datos mensuales de humedad del suelo y que dio lugar al Índice estandarizado de precipitación, Hao y AghaKouchak (2013) propusieron un Índice de humedad del suelo utilizando un enfoque no paramétrico, y que se retoma en el MoSeMM.

**5.1.1.2** Índice estandarizado de escurrimiento. Propuesto por Shukla y Wood (2008), con base en McKee et al. (1993) y utilizando otras distribuciones de probabilidad que se ajusten mejor y que en el caso del MoSeMM son también no paramétricas.

**5.1.1.3** Disponibilidad del acuífero. La recarga total de un acuífero en un intervalo de tiempo dado se determina por medio de un balance de aguas del subsuelo; es decir, la suma de las entradas es igual al cambio de almacenamiento del acuífero más la descarga (descarga natural comprometida, el volumen concesionado y el volumen de extracción) (DOF, 2015).

## **5.1.2 Distritos de riego**

Tradicionalmente, la operación de distritos de riego involucra actividades de planeación, programación y distribución del agua de riego a los productores en forma eficiente y oportuna (Pedroza e Hinojosa, 2014); para evaluarla, se eligieron los índices de productividad del agua y de suministro relativo de agua, que se describen a continuación.

**5.1.2.1** Productividad del agua. Pereira, Cordery e Iacovides (2012) utilizaron como uno de los indicadores del desempeño del uso del agua para el uso

sustentable del agua la Productividad del agua (WP, por sus siglas en inglés); la cual se define como:

$$WP = \frac{Y}{TWU}$$

donde Y es el rendimiento del cultivo en kilogramos y TWU corresponde al total de agua de riego suministrada (TWS, por sus siglas en inglés), en metros cúbicos (Paredes, Pereira, Rodrigues, Botelho y Torres, 2017).

**5.1.2.2** Suministro relativo de agua. Se define como:

$$RWS = \frac{TWS}{CWR}$$

donde TWS es el total de agua suministrada (en metros cúbicos) y CWR se refiere a los requerimientos de agua del cultivo, cálculo dado por la siguiente ecuación:

$$CWR = \sum_i^N ET_{ci} \cdot \text{área cultivada}$$

$ET_{ci}$  es la evapotranspiración de los diferentes cultivos (Paredes-Tavares et al., 2018).

## 5.2 Capacidad adaptativa

En respuesta a las condiciones tanto físicas como del desempeño de la administración del agua, se eligió por un lado el criterio de Seguro y por otro los programas de apoyo de SAGARPA.

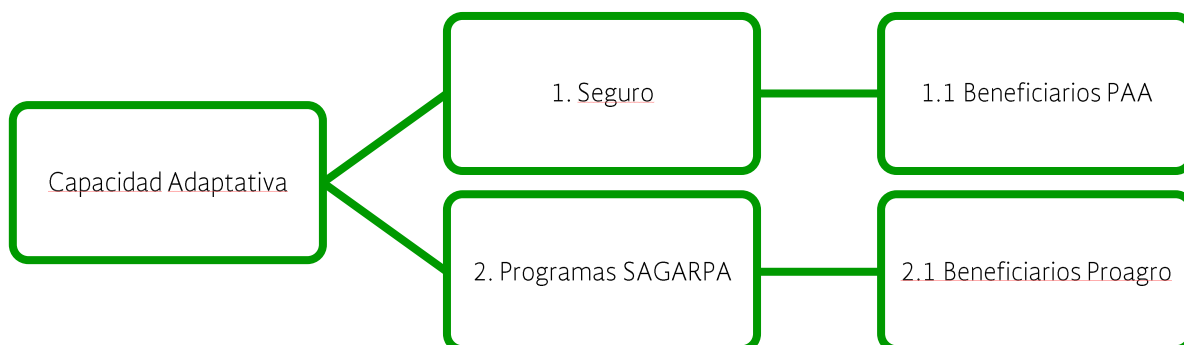


Figura 8. Índice de capacidad adaptativa para la Vulnerabilidad de la agricultura de riego al estrés hídrico.

Fuente: elaboración propia

### 5.2.1 Seguro

El Programa de Aseguramiento Agropecuario (PAA) surgió en el 2016 y tiene como objetivo contribuir al desarrollo del seguro y administración integral de riesgos del sector agropecuario a través de la reducción del costo de las primas o cuotas que pagan los productores agropecuarios y los gobiernos de los estados (Agroasemex, 2018).

**5.2.1.1** Beneficiarios PAA. Para esta variable se hace la relación del monto del apoyo otorgado al municipio entre la superficie de los DR que pertenecen a dicho municipio.

### 5.2.2 Programas SAGARPA

**5.2.2.1** Proagro. Es un programa de Fomento a la Agricultura cuyo fin es Incrementar la productividad de las Unidades Económicas Rurales Agrícolas (UERA) mediante incentivos económicos focalizados

preferentemente en zonas con potencial productivo medio y alto, en cultivos prioritarios y con potencial de mercado.

### **5.3 Recomendaciones generales**

Entre los criterios de sensibilidad considerados para la vulnerabilidad de la agricultura de riego ante un estrés hídrico destaca, para su evaluación, que la operación de los distritos de riego en México se ha basado en una serie de normas empíricas y uso de fórmulas hidrométricas, donde la experiencia de los responsables se ha transmitido verbalmente entre los operadores de la infraestructura; desafortunadamente, esta condición ha facilitado que dicha experiencia se pierda y sea necesario volver a adquirirla empíricamente, por lo que es recomendable que los conocimientos desarrollados por las instituciones de educación, investigación y desarrollo lleguen al personal de campo para su mejor desempeño (Pedroza e Hinojosa, 2014). Asimismo, es fundamental contar con información de buena calidad referente a la gestión del agua en los DR.

En cuanto a los criterios de capacidad adaptativa, para el Presupuesto de Egresos de la Federación 2018, existen 70 programas y componentes enfocados en mejorar la productividad agrícola y rural, los cuales representan el 32.2% Programa Especial Concurrente para el Desarrollo Rural Sustentable; para mejorar su eficiencia y eficacia se requiere que se identifiquen mejor las necesidades productivas del sector rural (Ramírez-Abarca, 2018). Es necesario también que exista un acceso a información e indicadores claros y apropiados para el seguimiento y la evaluación de todos estos programas.

Por otro lado, Li, Li, Li y Fu (2018) indican que el aumento en el rendimiento en tierras secas debe considerar tanto un adecuado plan de riego como estrategias de gestión de nutrientes, por lo que la investigación y desarrollo en técnicas de irrigación (por ejemplo, déficit de irrigación) y manejo de nutrientes puede contribuir al incremento de la capacidad adaptativa.



Las problemáticas presentadas en los árboles jerárquicos, así como las variables e insumos para conformarlas se sintetizaron en las fichas técnicas correspondientes, las cuales fueron elaboradas de acuerdo al formato provisto por el equipo del INECC.

## 6. Referencias

- Agroasemex (2018). Agroasemex. Disponible en: <https://www.gob.mx/agroasemex>
- Althuwaynee O.F. y Pradhan, B. (2017). Semi-quantitative landslide risk assessment using GIS-based exposure analysis in Kuala Lumpur City, Geomatics, *Natural Hazards and Risk*, 8:2, 706-732, DOI: 10.1080/19475705.2016.1255670
- AMC (2015). *Marco Internacional para la Adaptación de la Infraestructura de Carreteras ante el Cambio Climático*. Paris: Asociación Mundial de la Carretera. ISBN 978-2-84060-373-3
- An, S., Leng, J.Q., Wang, J., Li, W., He, Y. (2015). Vulnerability of road network based on generalised travel time. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*. 168. 425-433. 10.1680/jtran.12.00086.
- Audisio, C., Nigrelli, G., Pasculli, A., Sciarra, N., Turconi, L. (2017). A GIS spatial analysis model for landslide hazard mapping application in alpine area. *Int. J. Sus. Dev. Plann.* 12(5): 883-893. DOI: 10.2495/SDP-V12-N5-883-893
- Berdica, K. (2002). An Introduction to road Vulnerability: What Has Been Done, Is done and Should Be Done. *Transport Policy*, 9 (2): 117-127
- Bordoni, M., Persichillo, M.G., Meisina, C., Crema, S., Cavalli, M., Bartelletti, C., Galanti, Y., Barsanti, M., Giannecchini, R., D'Amato Avanzi, G. (2018). Estimation of the susceptibility of a road network to shallow landslides with the integration of the sediment connectivity. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 18, 1735-1758. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1735-2018>
- Bos, M.G., Murray-Rust, D.H., Merrey, D.J., Johnson, H.G., Snellen, W.B. (1994). *Irrigation and Drainage systems* 7:231-261.
- CAF (2018). IDEAL 2017. Infraestructura para el desarrollo de América Latina (folleto). Caracas: CAF. Recuperado de: <http://scioteca.caf.com/handle/123456789/1182>
- CENAPRED (2014). Mapa Nacional de Susceptibilidad por Inestabilidad de Laderas. Recuperado de: <http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/inestabilidad-laderas.html>
- Chen, A., Yang, C., Kongsomsaksakul, S., Lee, M. (2007). Network-based Accessibility Measures for Vulnerability Analysis of Degradable Transportation Networks. *Network Spatial Economics*. 7:241-256. DOI 10.1007/s11067-006-9012-5
- Chen, S., Claramunt, C., Ray, C. (2014). A spatio-temporal modelling approach for the study of the connectivity and accessibility of the Guangzhou metropolitan network. *Journal of Transport Geography* 36:12-23. 10.1016/j.jtrangeo.2014.02.006
- Chen, X.Z., Lu, Q.C., Peng, Z.R., Ash, J.E. (2015). Analysis of Transportation Network Vulnerability Under Flooding Disasters. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2532: 37-44. DOI: 10.3141/2532-05
- CONAGUA (2017). Estadísticas del Agua en México, Edición 2017. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de: [http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM\\_2017.pdf](http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2017.pdf)
- CONAGUA (2018). Monitor de Sequía Multivariado en México (MoSeMM). Disponible en: <http://mosemm.conagua.gob.mx/index.html>
- Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J.P., Fotopoulou, s., Catani, F., Van Den Eeckhaut, M., Mavrouli, O., Agliardi, F., Pitiakakis, K., Winter, M.G., Pastor, M., Ferlisi, S., Tofani, V., Hervás, J., & Smith, J.T. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bull Eng Geol Environ* 73:209-263. DOI 10.1007/s10064-013-0538-8
- De la Peña, E., Díaz, J., Rodrigo, M., Miralles, E., Díaz, L., Valdés, S., & Canalda, L. (2018). *Guía de Buenas Prácticas para la Adaptación de las Carreteras al Clima*. Caracas: CAF. Disponible en: <http://scioteca.caf.com/handle/123456789/1221>

Asesoría para el seguimiento técnico y diseño de índices de sensibilidad y capacidad adaptativa del Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático

- DGST (2018). *Manual de diseño de accesos a instalaciones de servicios e integración de paradores en carreteras* 2018. Ciudad de México, México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Disponible en: [http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Manual\\_de\\_Paradores/PARADORES.pdf](http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Manual_de_Paradores/PARADORES.pdf)
- DHAC (2001). *Measuring remoteness: Accessibility/remoteness index of Australia (ARIA) (Revised edition)*. Occasional paper, New Series No.14 Department of Health and Aged Care, Canberra.
- Djeral, L., Khoudi, I., Alimrina, N., Melbouci, B., Bahar, R. (2017). Assessment and mapping of earthquake-induced landslides in Tizirt City, Algeria. *Nat Hazards* 87:1859–1879. DOI 10.1007/s11069-017-2831-5
- DOF (2013). Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes 2013-2018. Recuperado de: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle\\_popup.php?codigo=5326590](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5326590)
- DOF (2015). Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. Recuperado de: [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5387027&fecha=27/03/2015](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5387027&fecha=27/03/2015)
- Evet, S.R., Schwartz, R.C., Casanova, J.J., Heng, L.K. (2012). Soil water sensing for water balance, ET and WUE. *Agricultural Water Management* 104: 1– 9. doi:10.1016/j.agwat.2011.12.002
- Florescano Mayet, E., Sancho y Cervera, J., Pérez Gavilán Arias, D. (1980). Las sequías en México: historia, características y efectos. *Comercio exterior*, 39 (7): 747-757.
- Gay, C., Estrada, F., Conde, C., Eakin, H., Villers, L. (2006). Potential impacts of climate change on agriculture: a case of study of coffee production in Veracruz, Mexico. *Climatic Change* 79: 259–288. DOI: 10.1007/s10584-006-9066-x
- Gobierno de la República (2013). *Estrategia Nacional de Cambio Climático, Visión 10-20-40*. Recuperado de: [http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/informacionambiental/Documents/06\\_otros/ENCC.pdf](http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/informacionambiental/Documents/06_otros/ENCC.pdf)
- Gómez Martínez, R., Cruz Vargas, J.G., Dávalos Arriaga, D., Arenas García, L.M. (2017). Recopilación de información de carreteras, puentes y estaciones meteorológicas, para el desarrollo del proyecto de Vulnerabilidad de estructuras de puentes en zonas de gran influencia de ciclones tropicales. Instituto de Ingeniería, UNAM, Centro Nacional de Prevención de Desastres. Recuperado de: <http://www1.cenapred.unam.mx/SUBCUENTA/15a%20SESI%C3%93N%20ORDINARIA/Vulnerabilidad%20de%20estructuras%20puentes/00%20ACTIVIDAD%201/Actividad%201.%20Recopilacion1.pdf>
- Gondim, R., Silveira, C., de Souza Filho, F., Vasconcelos Jr., F., Cid, D. (2018). Climate change impacts on water demand and availability using CMIP5 models in the Jaguaribe basin, semi-arid Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 77:550. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7723-9>
- González Huesca, A.E., Domínguez Morales, L., Castañeda Martínez, A. (2015). Proyecto Generación de Insumos para el Atlas Nacional de Riesgos, Mapa Nacional de Susceptibilidad por Inestabilidad de Laderas. Sistema Nacional de Protección Civil, Coordinación Nacional de Protección Civil, Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- Gradilla Hernández, L.A. (2011). Planeación de infraestructura del transporte: identificación de tramos críticos para el funcionamiento de redes carreteras. Publicación Técnica No. 354. IMT-SCT. Recuperado de: <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt354.pdf>
- Gradilla-Hernández, L.A., De la Lata-Gómez, R., González-Gómez, O. (2011). Índices de vulnerabilidad de redes carreteras. Enfoques recientes y propuesta de aplicación en México. *Ingeniería Investigación y Tecnología*. 7 (3):257-267
- Gradilla Hernández, L.A., Mendoza Sánchez, J.F., Orantes Olvera, H., Marcos Palomares, O.A. (2018). Aproximación Geoespacial para la Adaptación al Cambio Climático de la Infraestructura Carretera en México. Publicación Técnica No. 523. Sanfandila, Qro.
- Hansen, W.G., (1959). How accessibility shapes land use. *J. Am. Inst. Planners* 25:73-76.
- Hao, Z., AghaKouchak, A. (2013). Multivariate Standardized Drought Index: A parametric multi-index model. *Advances in Water Resources* 57: 12–18, <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2013.03.009>

Asesoría para el seguimiento técnico y diseño de índices de sensibilidad y capacidad adaptativa del Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático

- Hung, L.Q., Van, N.T.H., Duc, D.M., Ha, L.T.C., Son, P.V., Khanh, N.H., Binh, L.T. (2016). Landslide susceptibility mapping by combining the analytical hierarchy process and weighted linear combination methods: a case study in the upper Lo River catchment (Vietnam). *Landslides* 13 (5) 1285-1301. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0657-3>
- INEGI (2018). Encuesta Nacional Agropecuaria 2017. Conociendo el campo de México. Resultados. Conferencia de prensa. Recuperado de: [http://www.beta.inegi.org.mx/contenidos/proyectos/encagro/ena/2017/doc/ena2017\\_press.pdf](http://www.beta.inegi.org.mx/contenidos/proyectos/encagro/ena/2017/doc/ena2017_press.pdf)
- Jenelius, E., Mattsson, L. (2015). Road Network Vulnerability analysis: Conceptualization, Implementation and Application. *Computers, Environment & Urban systems*. 49:136-147.
- Jenelius, E., Petersen, T. & Mattsson, L. (2006) Importance and exposure in road network vulnerability analysis. *Transportation Research Part A*. 40(7): 537-560
- Jin, L., Wang, H., Xie, B., Yu, L., Liu, L. (2017). A user exposure based approach for non-structural road network vulnerability analysis. *PLoS ONE* 12 (11): e0188790. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0188790>
- Li, C., Li, Y., Li, Y., Fu, G. (2018). Cultivation techniques and nutrient management strategies to improve productivity of rain-fed maize in semi-arid regions. *Agricultural Water Management* 210: 149–157. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.08.014>
- Mallick, J., Singh, R.K., AlAwadh, M.A., Islam, S., Khan, R.A., Qureshi, M.N. (2018). GIS-based landslide susceptibility evaluation using fuzzy-AHP multi-criteria decision-making techniques in the Abha Watershed, Saudi Arabia. *Environmental Earth Sciences* 77:276. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7451-1>
- Mattsson, L., Jenelius, E. (2015). Vulnerability and resilience of transport systems – A discussion of recent research. *Transportation Research Part A*. 81:16-34.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. Eighth Conference on Applied Climatology, 17-22 January 1993, Anaheim, California.
- Mills, B. & Andrey, J. (2003). Climate Change and Transportation: Potential Interactions and Impacts. En: *The Potential Impacts of Climate Change on Transportation*. Federal Research Partnership Workshop October 1-2, 2002. Washington, D.C.: DOT Center for Climate Change and Environmental Forecasting. Recuperado de: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.536.4756&rep=rep1&type=pdf>
- Monterroso-Rivas, A.I., Conde-Álvarez, A.C., Pérez-Damián, J.L., López-Blanco, J., Gaytan-Dimas, M., Gómez-Díaz, J.D. (2018). Multi-temporal assessment of vulnerability to climate change: insights from the agricultural sector in Mexico. *Climatic Change*, 147:457–473. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2157-7>
- Murillo-García, F.G., Rossi, M., Ardizzone, F., Fiorucci, F., Alcántara-Ayala, I. (2017). Hazard and population vulnerability analysis: a step towards landslide risk assessment. *Journal of Mountain Science* 14(7). DOI: 10.1007/s11629-016-4179-9
- Ojeda-Bustamante, W., Flores Velázquez, J., Ontiveros Capurata, R.E., Íñiguez Covarrubias, M. (2015). Vulnerabilidad de la agricultura de riego mexicana al cambio climático: actualización 2014. En: Arreguín Cortés, F.I., López Pérez, M., Rodríguez López, O., Montero Martínez, M.J. (coords.). Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 148pp. ISBN: 978-607-9368-09-8 (versión digital), Recuperado de: [https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros\\_html/atlas-2016/files/assets/common/downloads/publication.pdf](https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/atlas-2016/files/assets/common/downloads/publication.pdf)
- Ojeda-Bustamante, W., Ontiveros-Capurata, R.E., Flores-Velázquez, J., Íñiguez-Covarrubias, M. (2017). Changes in water demands under adaptation actions to climate change in an irrigation district. *Journal of Water and Climate Change*, 8 (2): 191–202. doi: <https://doi.org/10.2166/wcc.2016.028>
- Ojeda-Bustamante, W; Sifuentes-Ibarra, E; Íñiguez-Covarrubias, M; Montero-Martínez, M.J. (2011). Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencia*, 45: 1-11.
- Paredes, P., Pereira, L.S., Rodrigues, G.C., Botelho, N., Torres, M.O. (2017). Using the FAO dual crop coefficient approach to model water use and productivity of processing pea (*Pisum sativum* L.) as influenced by irrigation strategies. *Agricultural Water Management* 189: 5–18

Asesoría para el seguimiento técnico y diseño de índices de sensibilidad y capacidad adaptativa del Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático

- Paredes-Tavares, J., Gómez-albores, M.A., Mastachi-Loza, C.A., Díaz-Delgado, C., Becerril-Piña, R., Martínez-Valdés, H., Khalidou, M.B. (2018). Impacts of Climate Change on the Irrigation Districts of the Rio Bravo Basin. *Water*. 10, 258; doi:10.3390/w10030258
- Pedroza González, E e Hinojosa Cuéllar, G.A. (2014). *Manejo y distribución del agua en distritos de riego: breve introducción didáctica*. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Pereira, L.S., Cordery, I., Iacovides, I. (2012). Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. *Agricultural Water Management* 108: 39– 51. doi:10.1016/j.agwat.2011.08.022
- Rahman MS, Ahmed B, Di L (2017) Landslide initiation and runout susceptibility modeling in the context of hill cutting and rapid urbanization: a combined approach of weights of evidence and spatial multi-criteria. *Journal of Mountain Science* 14(10). <https://doi.org/10.1007/s11629-016-4220-z>
- Ramírez-Abarca, G. (2018). Gasto público para el Desarrollo rural de México: Revisión de programas y propuestas para mejorar su impacto. Documento de trabajo No. 233. Rimisp México. Recuperado de: [https://rimisp.org/wp-content/files\\_mf/1535820211DT233GA.pdf](https://rimisp.org/wp-content/files_mf/1535820211DT233GA.pdf)
- Razavizadeh, S., Solaimani, K., Massironi, M., Kavian, A. (2017). Mapping landslide susceptibility with frequency ratio, statistical index, and weights of evidence models: a case study in northern Iran. *Environ Earth Sci* 76:499. DOI 10.1007/s12665-017-6839-7
- Rodríguez Gamiño, M. de L. y López Blanco, J. (2008). Determinación de indicadores ambientales a escala detallada para la evaluación biofísica y la planeación del territorio: el caso de Milpa Alta, Distrito Federal. En: López Blanco, J. y Rodríguez Gamiño, M. de L. (coords.) *Desarrollo de indicadores ambientales y de sustentabilidad en México* (pp 165-196). México, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rostami, Z.A., Al-modaresi, S.A., Fathizad, H., Faramarzi, M. (2016). Landslide susceptibility mapping by using fuzzy logic: a case study of Cham-gardalan catchment, Ilam, Iran. *Arab J Geosci*, 9: 685. DOI 10.1007/s12517-016-2720-3
- Schlögl, M., Avian, M., Richter, G., Thaler, T., Heiss, G., Fuchs, S., Lenz, G. (2018). On the nexus between landslide susceptibility and transport infrastructure – agent-based vulnerability assessment of rural road networks in the Eastern European Alps. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/nhess-2018-93>
- SCT (2017a). *Anuario Estadístico, Sector Comunicaciones y Transportes, 2016*. Ciudad de México, México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Recuperado de: [http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGP/estadistica/Anuarios/Anuario\\_2016.pdf](http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGP/estadistica/Anuarios/Anuario_2016.pdf)
- SCT (2017b). *Inventario Nacional de Banco de Materiales*. Recuperado de: [http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Banco\\_de\\_Materiales\\_2017/INTRODUCCION\\_2017.pdf](http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Banco_de_Materiales_2017/INTRODUCCION_2017.pdf)
- SECTUR (2014). *Ángeles Verdes*. Disponible en: <http://www.sectur.gob.mx/programas/angeles-verdes/>
- SECTUR (2017). *Manual de procedimientos de la Corporación de Servicios al Turista Ángeles Verdes*. Disponible en: <http://desarrollo.sectur.gob.mx/GestionNormateca/Documentos/ManualAngeles.pdf?CFID=200398&CFTOKEN=63863835>
- SECTUR (2018). *Corporación de Servicios al Turista Ángeles Verdes*. Recuperado de: <https://www.gob.mx/sectur/angelesverdes>
- SEMARNAT (2018). *Gestión integral de riesgos y atención a emergencias y desastres por eventos naturales extremos*. Dirección General de Estadística e Información Ambiental, Agosto, 2018. Disponible en: [http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi\\_apps/WFServlet?IBIF\\_ex=D1\\_R\\_DESASTRE00\\_00&IBIC\\_user=dgeia\\_mce&IBIC\\_pass=dgeia\\_mce](http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D1_R_DESASTRE00_00&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce)
- Shukla, S., Wood, A.W. (2008). Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysical Research Letters*, 35, L02405, doi:10.1029/2007GL032487
- Smith, J., Blewitt, R. (2010). *Traffic Modeling Guidelines. TfL Traffic Manager and Network Performance Best Practice Version 3.0*. London, UK Transport for London. Recuperado de: <http://content.tfl.gov.uk/traffic-modelling-guidelines.pdf>

Asesoría para el seguimiento técnico y diseño de índices de sensibilidad y capacidad adaptativa del Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático

- Ştefan, B., Sanda, R., Ioan, F. (2018). Quantitative evaluation of the risk induced by dominant geomorphological processes on different land uses, based on GIS spatial analysis models. *Front. Earth Sci.* 12: 311. <https://doi.org/10.1007/s11707-017-0679-3>
- Swanston, D.N. y Howes, D.E. (1994) Slope movement processes and characteristics. En: Chatwin, S.C., Howes, D. E., Schwab, J. W., and Swanston, D. N (eds.) *A Guide for Management of Landslide Prone Terrain in the Pacific Northwest*, British Columbia Ministry of Forests, Land Management Handbook 18, Victoria BC, 1–17.
- Taylor, M.A.P., D'Este, G.M. (2004) Critical infrastructure and transport network vulnerability: developing a method for diagnosis and assessment. *Proceedings of the Second International Symposium on transportation Network Reliability (INSTR04)*. Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, pp 96-102
- Taylor, M.A.P., Somenahalli, V.C.S., D'Este, G.M. (2006). Application of Accessibility Based Methods for Vulnerability Analysis of strategic Road Networks. *Network Spatial Economics* 6:267-291. DOI 10.1007/s11067-006-9284-9
- Thennavan, E., Ganapathy, G.P., Chandra Sekaran, S.S. et al. (2016). Use of GIS in assessing building vulnerability for landslide hazard in The Nilgiris, Western Ghats, India. *Nat Hazards*, 82: 1031. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2232-1>
- Vermonden Thibodeau, A. (5 de octubre de 2017). El Atlas Nacional de Vulnerabilidad ante el Cambio Climático. En PINCC (Programa de Investigación en Cambio Climático). 7º Congreso Nacional de Investigación en Cambio Climático. Presentación llevada a cabo en el Auditorio Nabor Carrillo de la Coordinación de la Investigación Científica, Ciudad Universitaria, UNAM, CDMX.
- Viswanath, K., y Peeta, S. (2003). Multi-commodity maximal covering network design problem for planning critical routes for earthquake response. *Transportation Research Board*, 1857(1): 1–10. <https://doi.org/10.3141/1857-01>
- Yu-qin, F., Jun-qiang, L., Zhong-Yu, X., Gui-e, Z., Yi, H. (2013). Route Choice Model Considering Generalized Travel cost Based on Game Theory. *Mathematical Problems in Engineering*. Article ID 464038. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/464038>