



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Modelo de evaluación de la resiliencia de puentes

Adriana Guadalupe Porres López
Francisco Javier Carrión Viramontes

Publicación Técnica No. 858
Querétaro, México
2024

ISSN 0188-7297

Esta investigación fue realizada en la Coordinación Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural (CIVIE) del Instituto Mexicano del Transporte (IMT), por la M. en C. Adriana Guadalupe Porres López y coautor el Dr. Francisco Javier Carrión Viramontes.

El presente estudio es el producto final del proyecto de investigación interna EI 04/24 Definición de un modelo de evaluación de la resiliencia de puentes.

Se agradece la colaboración del C. Angel Garibay Murguía, pasante de Ingeniería Industrial y de Sistemas de la Universidad Tec Milenio campus Querétaro.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores (as) y no necesariamente reflejan los puntos de vista del Instituto Mexicano del Transporte.

Tabla de Contenido

	Página
Sinopsis.....	v
Abstract.....	vii
Introducción	1
1. Marco de referencia.....	3
2. Dimensionamiento del riesgo	13
2.1 Identificación de amenazas de riesgo.....	15
2.2. Identificación de exposición al riesgo.....	17
2.3. Identificación de vulnerabilidades.....	22
3. Determinación de indicadores de riesgo y resiliencia.....	33
3.1 Identificación de riesgos potenciales.....	35
3.2 Evaluación de probabilidad de impacto.....	38
3.3 Cálculo del nivel de riesgo.....	41
3.4 Definición de indicadores de riesgo y resiliencia.....	46
3.5 Determinación, monitoreo y seguimiento.....	47
4. Evaluación del impacto	53
5. Definición del modelo de evaluación de la resiliencia de puentes.....	59
5.1 Consideraciones de aplicación	67
5.2 Análisis de resultados	69
Conclusiones y recomendaciones.....	71
Bibliografía	75

Terminología.....	81
-------------------	----

Sinopsis

Actualmente en México la evaluación de la resiliencia de los puentes se realiza mediante un enfoque integral de análisis de riesgos, evaluación de la vulnerabilidad, monitoreo continuo, simulaciones y modelos que permitan la planificación de respuesta y recuperación para contribuir a que los puentes sean capaces de resistir y recuperarse de eventos adversos, garantizando la seguridad y funcionalidad a corto, mediano y largo plazo en beneficio de la sociedad y procura de la economía.

El presente trabajo de investigación pretende contribuir a la planeación de la infraestructura del transporte y al bienestar social mediante la gestión de infraestructura accesible, segura, eficiente y sostenible, que conecte a las personas de cualquier condición, con visión de desarrollo regional e intermodal. Así también al mejoramiento de la planeación y prospectiva de los puentes que permitan detectar oportunamente las necesidades presentes y futuras.

Con la definición de un modelo de evaluación de la resiliencia de puentes, se presenta una metodología aplicable a la planeación, operación, evaluación y conservación de la infraestructura del transporte; mediante la propuesta de estrategias para incrementar la resiliencia y sustentabilidad de los puentes en beneficio del transporte regional, multimodal y, consecuentemente, de toda la población.

Abstract

Currently in Mexico, the evaluation of the resilience of bridges is carried out through a comprehensive approach of risk analysis, vulnerability assessment, continuous monitoring, simulations and models that allow response and recovery planning to contribute to bridges being able to resist and recover from adverse events, guaranteeing safety and functionality in the short, medium and long terms for the benefit of society and the pursuit of the economy.

This research work aims to contribute to the planning of transport infrastructure and social welfare through the management of accessible, safe, efficient and sustainable infrastructure, which connects people from all walks of life, with a vision of regional and intermodal development. As well as the improvement of the planning and foresight of the bridges that allow the timely detection of present and future needs.

With the definition of a bridge resilience assessment model, a methodology applicable to the planning, operation, evaluation and conservation of transport infrastructure is presented; through the proposal of strategies to increase the resilience and sustainability of bridges for the benefit of regional and multimodal transport and, consequently, of the entire population.

Introducción

Partiendo de los resultados del *Estudio exploratorio de la evaluación de los indicadores de resiliencia para reducción de riesgos de desastres en las estructuras* (Porres et al., 2023), con esta investigación se desarrolla un modelo de evaluación de la resiliencia de puentes, considerando que es factible aplicar de estrategias que permitan atender de forma más eficiente y eficaz los potenciales riesgos a los que están expuestos los puentes, desde la etapa de proyecto hasta su operación y conservación, considerando todas las etapas intermedias desde la perspectiva la sostenibilidad y para la promoción de las estructuras resilientes.

Los puentes son una de las vías de comunicación que permite el acceso y traslado de personas e insumos de bienes de consumo primario, así como de mercancías que influyen en la economía del país, y bajo este precepto es necesario contar con una evaluación sistemática de los puentes que han sido impactados por algún evento de desastre en nuestro país, sus características y su estado, antes y después del evento extremo al que estuvieron expuestos.

Si consideramos que la falla del sistema carretero ocasiona impactos directos a la infraestructura, a la economía y a la sociedad, es importante tener en cuenta que el colapso total o parcial de un puente tiene un impacto mayor, ya que implica una pérdida económica y social directa; a la movilidad y a la seguridad e integridad de la ciudadanía. Por lo que, al evaluar el riesgo y el impacto que puede causar un desastre natural o antrópico, es posible reducir las consecuencias; más aún si se anticipa desde las etapas iniciales del proyecto, es posible incrementar la capacidad del puente para resistir y/o recuperarse ante condiciones extremas.

Evaluar la resiliencia del puente implica identificar las condiciones desfavorables, cualitativas y cuantitativas del puente, dependiendo de la información con que se cuente; física, estructural, de socavación, corrosión, etc. A partir del desarrollo del estudio exploratorio, se detectó que los mapas de riesgo que actualmente se manejan a nivel nacional, cuentan con escasa información (CENAPRED, 2014), particularmente de los puentes que han sido dañados a consecuencia de desastres.

Actualmente la evaluación de la resiliencia de los puentes en México se realiza mediante una combinación de métodos analíticos y prácticos que incluyen el análisis de vulnerabilidad, inspecciones regulares, elaboración de curvas de fragilidad, simulaciones y otros métodos que permitan a los ingenieros y autoridades tomar decisiones informadas sobre el mantenimiento, rehabilitación y, en algunos casos, la sustitución de puentes para asegurar su funcionalidad y seguridad a largo plazo.

1. Marco de referencia

Los puentes son elementos indispensables de los caminos, fundamentales para garantizar la continuidad del servicio de los usuarios, por lo que el compromiso es mantener todas las estructuras en óptimas condiciones, garantizando que las familias se trasladen en forma segura. (SCT, ahora SICT, 2022)

Es importante destacar que los puentes están compuestos por varios elementos estructurales clave que trabajan juntos para proporcionar estabilidad y soporte, y cada uno de estos elementos es crucial para la integridad y funcionalidad del puente.

- a) Cimentación: es la base del puente que transfiere las cargas al suelo y está compuesta por pilotes y zapatas.
 - Pilotes: Elementos profundos que distribuyen las cargas a estratos inferiores del suelo.
 - Zapatas: Elementos superficiales que transmiten las cargas directamente al suelo.

- b) Subestructura: es la parte inferior del puente que soporta la superestructura y está compuesta por pilas y estribos.
 - Pilas: Columnas verticales que sostienen el tablero.
 - Estribos: Estructuras en los extremos del puente que soportan el tablero y evitan que la tierra de los accesos ejerza presión contra el puente.

- c) Superestructura: es la parte superior del puente que soporta el tráfico y está compuesta de tablero, vigas, apoyos y cables.
 - Tablero: Superficie por donde pasan vehículos y peatones.
 - Vigas: Elementos horizontales que soportan el tablero.
 - Cables: En puentes colgantes o atirantados, son los tirantes que sostienen el tablero.
 - Apoyos: Permiten que el tablero se expanda o contraiga con los cambios de temperatura sin dañar la estructura.

En la Figura 1.1. podemos visualizar el esquema de la composición de un puente.

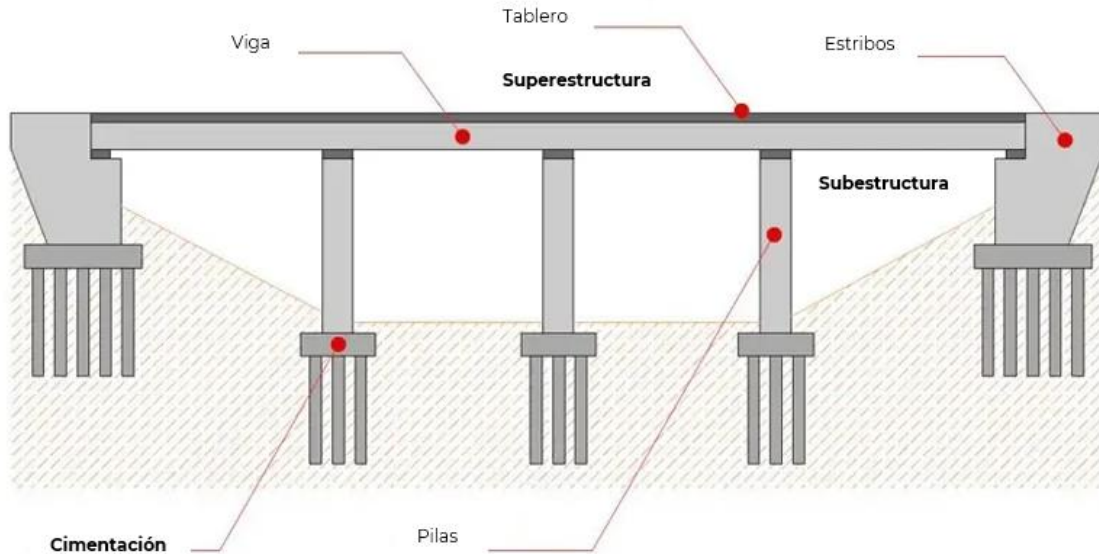


Figura 1.1 Componentes estructurales de un puente

Fuente: Biblus (2024).

Existen varios tipos de puentes, cada uno diseñado para cumplir con diferentes necesidades estructurales y funcionales, entre los cuales destacan:

- Puente atirantado: se caracteriza por transmitir la carga de la cubierta directamente a las torres a través de cables.
- Puente en arco: se caracteriza porque a través de su forma arqueada transfiere el peso hacia los soportes en los extremos y consigue mayor distancia entre pilas.
- Puente colgante: se caracteriza por estar compuesto por un tablero, suspendido bajo un arco invertido, y de cables de acero usualmente sostenidos con dos vigas en los extremos para soportar el puente.
- Puente viga: se caracteriza por estar compuesto por vigas horizontales que soportan el peso.
- Puente de arco sobre tablero, se caracteriza en que el arco cubre gran parte del puente y el tablero se ubica en la parte baja como soporte.
- Puente de arco bajo tablero, se caracteriza en que el arco se observa en la parte inferior, apoyado por una serie de elementos y materiales como soporte.
- Puente voladizo, se caracteriza por estar construido con métodos de volados sucesivos, soportado por grandes pilas y una infraestructura sólida.

De acuerdo con información de la Dirección General de Conservación de Carreteras (DGCC), existen 9,798 puentes en el territorio nacional pertenecientes a la Red Federal de Carreteras, ver Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Número de Puentes por Tipo de Red

Estado	No. de Puentes	Corredor	Red Básica	Red Secundaria
Aguascalientes	106	63	31	12
Baja California	248	82	44	122
Baja California Sur	241	177	57	7
Campeche	167	129	16	22
Coahuila	350	163	134	53
Colima	113	22	62	29
Chiapas	434	214	181	39
Chihuahua	396	131	106	159
Durango	346	32	139	175
Guanajuato	370	109	159	102
Guerrero	465	0	322	143
Hidalgo	319	31	188	100
Jalisco	395	50	218	127
México	446	66	241	139
Michoacán	568	141	278	149
Morelos	151	44	67	40
Nayarit	153	28	46	79
Nuevo León	465	201	210	54
Oaxaca	561	108	191	262
Puebla	208	20	133	55
Querétaro	162	26	73	63
Quintana Roo	60	48	9	3
San Luis Potosí	460	241	59	160
Sinaloa	323	106	193	24
Sonora	380	147	135	98
Tabasco	264	165	59	40
Tamaulipas	402	195	91	116
Tlaxcala	313	107	104	102
Veracruz	546	215	165	166
Yucatán	68	60	3	5
Zacatecas	318	99	110	109
Total	9,798	3,220	3,824	2,754

Fuente: DGCC (2024).

La Dirección General de Conservación de Carreteras denota que el 39% de los puentes (3,824) pertenecen a la red básica, el 33% (3,220) pertenecen al corredor y el 28% restante de los puentes (2,754) pertenece a la red secundaria. (DGCC, 2024)

Para ello es importante destacar los puentes que se encuentran catalogados como los más importantes por sus características estructurales, en nuestro país. (Córdova, 2022)

Puente Baluarte o Bicentenario, está ubicado en la autopista Durango-Mazatlán en El Palmito, Sinaloa en México, compuesto por 2 planos atirantados acompañado de 152 tirantes reforzados en hierro y con una altura total de 402.57 metros, por lo que es el más alto de América del Norte y el tercero en el mundo, por un tiempo formó parte del libro de Récord Guinness como el principal en el mundo en la categoría de puentes atirantados. (Figura 1.2.)



Figura 1.2 Puente Baluarte

Fuente: Córdova (2022).



Figura 1.3 Puente Mezcala

Fuente: Córdova (2022).



Figura 1.4 Puente Dovalí Jaime

Fuente: Córdova (2022).



Figura 1.5 Puente El Carrizo

Fuente: Córdova (2022).



Figura 1.6 Mature Remus

Fuente: Bricio (2011).

Puente Ing. Antonio Dovalí Jaime, está ubicado entre los municipios de Minatitlán e Ixhuatlán del Sureste de Veracruz, su estructura es de concreto armado en conjunto con acero, suponiendo una longitud de 1,170 metros y conecta al estado de Veracruz con Tabasco. (Figura 1.4.)

Puente El Carrizo, está ubicado en El Palmito, Sinaloa y forma parte de la lista de mega construcciones de México, tiene 217 metros de largo y 198 metros de altura, comunica al Golfo de México con la Costa del Pacífico. Es el segundo puente atirantado más grande de México y fue rediseñado con una sola torre. (Figura 1.5.)

Puente Matute Remus, está ubicado en Guadalajara, tiene una longitud de 930 metros y se caracteriza por su estilo minimalista y por su juego de luces. (Figura 1.6.)

Puente colgante Tibetano Nuboso, ubicado en Tlatlauquitepec, Puebla, mide 60 metros de altura y 150 metros de largo y está instalado a una altitud de 2,300 metros sobre el nivel del mar, aproximadamente. (Figura 1.7.)



Figura 1.7 Puente Tibetano Nuboso

Fuente: Pixabay.com (2023).

Puente Ojuela, ubicado en Durango en el Pueblo de Mapimí, mide 315 metros de largo y una altura de 100 metros, es uno de los más antiguos del país, construido en 1898 y restaurado en 1990 para centrarse en el turismo. (Figura 1.8.)



Figura 1.8 Puente Ojuela

Fuente: Córdova (2022).

Puente de La Unidad, ubicado en Monterrey, mide 320 metros de longitud, y 155 metros de alto hasta su mástil, está compuesto por cables de acero capaz de sostenerlos, conecta a la ciudad de Monterrey con San Pedro Garza García en Nuevo León, México. (Figura 1.9.)



Figura 1.9 Puente de la Unidad

Fuente: Córdova (2022).

Puente San Marcos o Ingeniero Gilberto Borja Navarrete, ubicado en la localidad de Puebla, mide 225 metros de alto y está sostenido por cuatro pilares. (Figura 1.10.)



Figura 1.10 Puente San Marcos

Fuente: Córdova (2022).

Puente Santa Lucía, ubicado entre Sinaloa y Durango, cuenta con 8 claros; uno de 37.5, 6 de 50 y uno de 37.5 metros, para un total de 375 metros de longitud y 95 metros de altura. Nació con el objetivo de fomentar la actividad turística y económica entre ambas regiones. (Figura 1.11.)



Figura 1.11 Puente Santa Lucia

Fuente: Sakowski, HighestBridges (2013).

fue inaugurado en el año 2005, está conformado por dos grandes vigas. (figura 1.12.)

Puente de Chiapas, mide 1.208 metros en su primer tramo y 631 metros en el segundo, se caracteriza por ser un “viga cajón”, hecha de acero. Fue inaugurado en el año 2003, conecta a Las Choapas, Raudales Malpaso con Ocozocoautla de Espinosa. (Figura 1.13.)

Puente Fernando Espinosa, ubicado en Guadalajara, mide 300 metros de longitud y 125 metros de altura, fue construido en los años 60, sin embargo, en el 2014, el gobierno estatal lo remodeló. (Figura 1.14.)

Puente Tuxpan, ubicado en Veracruz, mide 300 metros de largo y conecta a esta localidad con otra que se llama Santiago de la Peña. (Figura 1.15.)

Puente del Papa, ubicado en Monterrey, cruza el Río Santa Catarina, anteriormente era conocido como Puente San Luisito y fue construido en 1976. (Figura 1.16.)

Puente Boca del Cerro, ubicado en Tenosique, Tabasco, mide 189 metros de largo y el claro del arco es de 150 metros. Fue inaugurado en 1950 y está encima de la desembocadura del Río Usumacinta. Fue diseñado y construido por Ferrocarriles Nacionales de México (Ferroviales). (Figura 1.17)

Puente del Pulpito, ubicado en la CDMX, en la colonia de Chimalistac, se caracteriza por ser de construcción a base de piedra realizada durante la época colonial.



Figura 1.12 Puente Texcapa

Fuente: Sakowski, HighestBridges (2013).



Figura 1.13 Puente Chiapas

Fuente: SCT, ahora SICT (2021).



Figura 1.14 Puente Fernando Espinosa

Fuente: Nmas.com.mx (2023).



Figura 1.15 Puente Tuxpan

Fuente: Córdova (2022).



Figura 1.16 Puente del Papa

Fuente: Córdova (2022).

Puente Papagayo, ubicado en la autopista Cuernavaca-Acapulco, mide 315 metros de longitud y tiene cuatro carriles, está compuesto por dos dovelas, construidas con cimbra corrediza. (Figura 1.18.)

Entre los puentes icónicos y antiguos de arco, se encuentran el Puente de Piedra de San Juan del Río, ubicado en Querétaro, es un símbolo histórico, construido a principios del siglo XVIII. (Figura 1.19.)

Puente Lomas Country o Viaducto de Las Lomas, ubicado en la Ciudad de México, mide 160 metros de longitud y 60 metros de altura sobre el fondo, es un puente de doble voladizo con cimbras de concreto. (Figura 1.20.)

Puente de Fierro, construido en época de Porfirio Díaz, se refiere que fue una obra de Gustave Eiffel y está localizado en Ecatepec de Morelos, Estado de México. (Figura 1.21.)

Considerando lo anterior, la resiliencia de los puentes es un tema crucial para garantizar su seguridad y capacidad de recuperación después de eventos disruptivos, por lo que la evaluación de la resiliencia de los puentes permite identificar su potencial de recuperación después de eventos naturales extraordinarios, como terremotos, lluvias extraordinarias, vientos extremos, hundimientos u otro tipo de desastre natural o antrópico. También contribuye en la administración de los puentes de un inventario, a planificar acciones de mantenimiento y rehabilitación y a reducir los impactos de fallas e interrupciones en el servicio.



Figura 1.17 Puente Boca del Cerro

Fuente: Córdova (2022).



Figura 1.18 Puente Papagayo

Fuente: Grupo Mexicano de Desarrollo (2020).



Figura 1.19 Puente de Piedra

Fuente: Córdova (2022).



Figura 1.20 Puente Lomas Country

Fuente: Carlos Fernández Casado S. L. (2017).



Figura 1.21 Puente de Fierro

Fuente: Córdova (2022).

En México, la construcción y mantenimiento de puentes están regulados por diversas normas y estándares que aseguran la seguridad y durabilidad de estas estructuras, algunas de estas son:

- Manual de Inspección de Puentes 2018: Proporciona directrices para la inspección y evaluación de puentes, asegurando que se mantengan en buen estado.
- Manual de Conservación de Puentes 2018: Detalla los procedimientos para el mantenimiento y conservación de puentes, garantizando su funcionalidad y seguridad a largo plazo.
- Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017: Esta norma establece los requisitos para el diseño y construcción de puentes y otras estructuras en carreteras federales.
- Norma Oficial Mexicana NOM-068-SCT-2-2000: Regula las condiciones físico-mecánicas y de seguridad para la operación de puentes en caminos de jurisdicción federal.

El Manual de Inspección de Puentes (MIP) 2018 es una guía, elaborada por la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) y publicada por la ahora Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT), proporciona directrices detalladas para establecer los procedimientos y criterios para la inspección de puentes, con el fin de identificar y evaluar su estado estructural y funcional.

Este manual clasifica en tres tipos de inspección de puentes;

- Inspección de rutina, se realiza periódicamente para evaluar el estado general del puente.
- Inspección detallada, se realiza cuando se detectan problemas durante la inspección de rutina o después de eventos extraordinarios como sismos o inundaciones u otros.
- Inspección especial, se realiza para evaluar aspectos específicos del puente, como la corrosión de elementos metálicos o el desgaste de componentes de concreto.

Así también define los métodos de inspección para los puentes, como se describe a continuación;

- Visual, se realiza a simple vista, evaluando los componentes del puente.
- Instrumental, se realiza mediante el uso de herramientas y equipos especializados para medir deformaciones, vibraciones, u otros parámetros técnicos.

El MIP establece formatos y procedimientos para documentar los hallazgos de las inspecciones, incluyendo fotografías, diagramas y descripciones detalladas de cualquier daño o deterioro y basado en los resultados de las inspecciones emite recomendaciones mediante un plan de mantenimiento preventivo para prolongar la vida útil del puente y evitar fallos estructurales.

El Manual de Conservación de Puentes (MCP) 2018 es una guía técnica que proporciona directrices y procedimientos para el mantenimiento y conservación de puentes, entre los cuales se encuentran la inspección, el mantenimiento preventivo, la reparación y rehabilitación, la gestión de recursos, así como la documentación y el registro detallado de todas las inspecciones y trabajos de mantenimiento preventivo o correctivo, para mantener un registro de inventario actualizado de los puentes. De acuerdo con la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST), tanto este manual como el Manual de Conservación de puentes 2018, están basados en la normatividad de la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (AASHTO, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos de Norteamérica, específicamente en sus textos; Manual for Bridge Maintenance (1976) y Manual for Maintenance Inspection of Bridges and Optimizing Maintenance Activities-Bridge Painting (1998).

La Dirección General de Conservación de Carreteras (DGCC) a través de la ahora SICT, desarrolló el Sistema Integral de Puentes de México (SIPUMEX) para la administración de los puentes de la red federal libre de peaje que tiene a su cargo. SIPUMEX es un sistema que integra un a base de datos con las características generales, estructurales y de constitución de los puentes, así como del estado actual en que se encuentran, y califica a los puentes en una escala desde 0 hasta 5, priorizando las acciones de acuerdo con la criticidad, desde la calificación 5 a estructuras en estado crítico que requieren atención inmediata a la calificación 0 a estructuras en excelente estado y que no requieren atención. (Crespo, Carrión et al., 2013)

El Instituto Mexicano del Transporte (IMT) desarrolló el Sistema de Administración de Puentes (SIAP), que se ha aplicado en algunas autopistas concesionadas de cuota y también en la red a cargo del organismo descentralizado, Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos (Barousse y Galindo, 1994).

Visualmente se puede ubicar a los puentes y obtener información básica de los mismos, a través de la Red Nacional de Caminos, desarrollada por el IMT, en colaboración con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) a través del vínculo <http://rnc.imt.mx/#>, ver Figura 1.22.



Figura 1.22 Plataforma Red Nacional de Caminos 2023

Fuente: IMT (2024).

En 2024, la red federal de carreteras de México incluye varios proyectos importantes de infraestructura, especialmente en la conservación y mejora de puentes. La Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT) mantiene un programa de infraestructura para el año en curso que se enfoca en la conservación rutinaria, periódica y la reconstrucción de carreteras y puentes, por lo que, para el presente proyecto, se recopiló principalmente información de ésta fuentes.

2. Dimensionamiento del riesgo

El dimensionamiento del riesgo de un puente es un proceso que consiste en identificar, evaluar y cuantificar los riesgos a los que se encuentra expuesto el puente con objeto de obtener una base sólida de información que permita la toma de decisiones de manera preventiva y anticipada a los problemas que los riesgos puedan generar y de esta manera minimizar su impacto y planificar estrategias de mitigación efectivas.

Para tomar decisiones informadas sobre las necesidades de mantenimiento, reparación o reemplazo de un puente, asegurando su seguridad y funcionalidad a largo plazo se deben reconocer todos los posibles eventos adversos que podrían afectar al puente, analizar la probabilidad de ocurrencia de estos eventos y su impacto potencial, así como medir y asignar valores numéricos a los riesgos para priorizar las acciones necesarias para mitigarlos.

Considerando la metodología definida en el “Estudio exploratorio de los indicadores de resiliencia para la reducción de riesgos en las estructuras” (Porres et al., 2023), en el que se describe que los componentes base para dimensionar los riesgos son la identificación de amenazas, la exposición y la vulnerabilidad de los puentes.

La amenaza se refiere a cualquier factor o evento que pueda comprometer la integridad estructural y funcionalidad del puente, poniendo en peligro su seguridad y durabilidad. Estas amenazas pueden ser externas, cuando se deriven de eventos ajenos al puente en sí, e internas, cuando estén directamente relacionadas con el puente. También puede ser amenazas derivadas de eventos naturales o antrópicos (generados por intervención de seres humanos). Cualquier amenaza requiere una gestión adecuada y la generación de medidas preventivas para asegurar la seguridad y funcionalidad de los puentes a lo largo del tiempo. Entre los factores de amenaza se encuentran:

- Eventos naturales: Terremotos, lluvias excesivas, vientos extremos, hundimientos y/o huracanes que pueden causar daños significativos a los puentes.
- Condiciones climáticas extremas: Temperaturas extremas, contaminación ambiental por sales, sulfatos u otros elementos que

puedan inducir daño como la corrosión y que afectan los materiales que constituyen al puente.

- Cambio climático: El aumento de la frecuencia e intensidad de fenómenos meteorológicos extremos, como lluvias torrenciales y tormentas, puede incrementar el riesgo de daños en los puentes debido a la erosión y la socavación.
- Deslizamientos de tierra: Las actividades humanas, como la construcción y la deforestación, pueden desestabilizar el terreno, aumentando el riesgo de deslizamientos de tierra, así como deslaves por lluvias excesivas u otros factores que pueden afectar la estabilidad del suelo y consecuentemente de los puentes.
- Mantenimiento inadecuado: Con el tiempo, los materiales de construcción se deterioran y la falta de un mantenimiento impide prevenir y tomar acciones concretas propiciando fallas estructurales.
- Diseño sin sobrecarga: El tráfico pesado y el uso excesivo pueden sobrecargar los puentes, especialmente si no fueron diseñados para soportar tales cargas que pueden causar grietas y daños estructurales.
- Amenazas humanas: Actos de vandalismo y terrorismo que pueden causar daños directos a la estructura y poner en peligro la seguridad pública.
- Accidentes y/o incendios: los puentes pueden verse afectados por impactos de vehículos, impactos de embarcaciones o incendios provocados por causa de algún accidente o antrópica.

La exposición a la amenaza de riesgo de los puentes se refiere a la probabilidad de que estos se vean afectados por los riesgos, y depende de la ubicación geográfica, las condiciones estructurales, las condiciones ambientales, las condiciones socio políticas en la región y el tráfico y uso del puente. La exposición depende de factores como;

- Ubicación geográfica: Este factor define la exposición de los puentes situados en zonas sísmicas, cerca de las costas expuestas a huracanes o de cauces propensos a inundaciones u otra amenaza.
- Tráfico y uso: Este factor se identifica en los puentes con alto volumen de tráfico, en el que los vehículos pesados, están más expuestos a sobrecargas que pueden acelerar el desgaste y aumentar el riesgo de fallas estructurales.
- Condiciones ambientales: La exposición a condiciones ambientales extraordinarias, afectan la durabilidad y funcionalidad de los puentes.
- Condiciones socio políticas de la región que dañan o restringen la funcionalidad adecuada del puente.

- Condiciones estructurales: En este aspecto el factor preponderante son las condiciones la antigüedad del puente, los materiales utilizados en su construcción y el diseño estructural, mismos que también influyen en la vulnerabilidad del puente.

La vulnerabilidad al riesgo que enfrentan los puentes se refiere a las condiciones que lo hacen susceptible a sufrir daños cuando están expuestos a amenazas que puede ocasionar consecuencias sociales y/o económicas negativas, daños estructurales o ambientales, de impacto potencialmente alto. Los puentes más antiguos o con mantenimiento inadecuado son los más susceptibles a sufrir daños.

2.1 Identificación de amenazas de riesgo

La identificación de amenazas es un proceso crucial en la gestión de riesgos y consiste en identificar y evaluar las amenazas que podrían afectar la seguridad y durabilidad de un puente, entre estas amenazas se encuentran el estado de mantenimiento, estructural, ambiental y social en el que se encuentra inmerso el puente.

En el caso del estado estructural, la identificación de las amenazas se define a través de datos de fatiga, desgaste de materiales, la corrosión y el deterioro de los materiales que componen el puente. Existen estudios estadísticos que fueron analizados por Estrada (2013), de los cuales destaca el estudio de Smith (1976) por ser el más completo de su tiempo y detallado en 143 puentes muestra a nivel internacional, de este se destaca que la socavación consecuente del tránsito de avenidas es la principal causa de falla en los puentes.

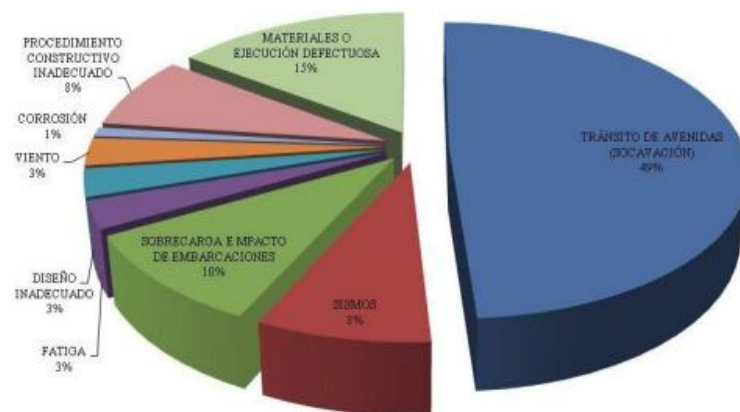


Figura 2.1 Estadística de amenazas por fallas de puentes

Fuente: Estrada (2013), basado en Smith (1976).

El estado ambiental se determina mediante la identificación de desastres naturales que hayan impactado al puente en sus componentes y que

hayan sido causantes de desencadenar procesos de afectación o daños físicos en el mismo. En este aspecto, se cuenta con un estudio de recopilación de fallas de puentes a nivel internacional realizado por Imhof (2004), el cual analizó 348 eventos de riesgo que amenazan a los puentes, destacando que los riesgos naturales son la principal falla de los puentes.

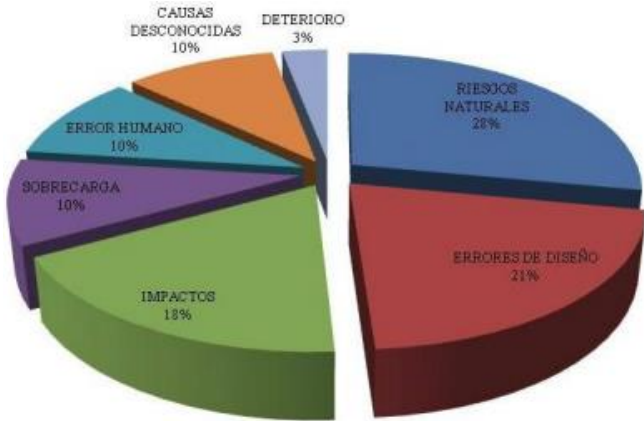
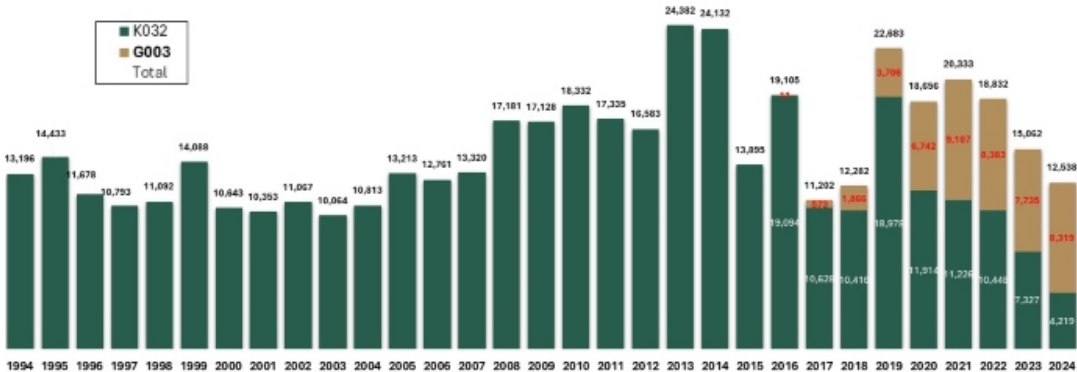


Figura 2.2 Causas comunes de amenazas por riesgos en puentes

Fuente: Estrada (2013), basado en Imhof (2004).

- El estado de mantenimiento de los puentes se puede determinar identificando los riesgos vinculados a la asignación de recurso o medios para que el puente reciba mantenimiento regular, de tal manera que se procura la conservación y protección contra el deterioro de este. En este sentido se cuenta con información de la Dirección General de Servicios Técnicos, la cual reporta que, con referencia al mantenimiento al mes de mayo de 2024, el monto de inversión en la conservación de infraestructura disminuyó considerablemente, en un 77.39% respecto al 2016, y 59.36% respecto a 2017, que es el periodo a partir del cual empezó a disminuir el presupuesto, como se muestra en la Gráfica 2.1.



Gráfica 2.1 Inversiones en conservación 1994-2024 (MDP constantes 2024)

Fuente: DGCC (2024).

La Dirección General de Conservación de Carreteras (DGCC) reporta que la inversión en el rubro hacendario K032, que se refiere al programa presupuestario de “Reconstrucción y Conservación de Carreteras en México, la cual define el recurso financiero destinado a la mejora y mantenimiento de la infraestructura vial” del país, hoy en día presenta la menor inversión realizada en los último 30 años. Sin embargo, el programa presupuestario G003, “Vigilancia del cumplimiento de la normatividad aplicable y fortalecimiento de la certeza jurídica en las relaciones entre proveedores y consumidores”, destinado para asegurar el cumplimiento de las leyes y normas aplicables, se ha incrementado, como se observa en la Gráfica 2.1. El rubro K032, es gestionado por la SICT y es el de nuestro mayor interés, ya que se aplica en el mantenimiento y la seguridad de la infraestructura de puentes y se enfoca en la reconstrucción, conservación y señalización de la red federal de carreteras libres de peaje, incluyendo los puentes.

La amenaza, de manera particular, radica en que dicha reducción de presupuesto impacta en las actividades que cubre dicho rubro:

- Reconstrucción y conservación, que implica que se puedan llevar a cabo trabajos de reparación y mantenimiento para asegurar que los puentes se encuentren en condiciones óptimas y seguras.
- Señalización, que implica que se implementen y mantengan señales de tráfico y seguridad en los puentes para guiar a los conductores y prevenir accidentes.
- Inspecciones periódicas y auditorías para evaluar el estado de los puentes y garantizar que cumplan con las normas de seguridad y calidad. (SICT, 2024)

Estas acciones son esenciales para mantener una infraestructura de puentes segura y eficiente, contribuyendo al desarrollo económico y social del país.

2.2. Identificación de exposición al riesgo

La identificación de la exposición al riesgo de los puentes en México es un proceso crucial para garantizar la seguridad y la durabilidad de estas estructuras, pero particularmente para identificar de manera básica la resiliencia de estos elementos. Para ello es importante destacar las fuentes de identificación de la exposición de los puentes, entre los cuales se encuentran:

- a) Atlas Nacional de Riesgos, en este sistema se pueden consultar los datos sobre fenómenos naturales y antropogénicos que pueden afectar a los puentes, como sismos, inundaciones y deslizamientos

de tierra, y a través de mapas y herramientas nos permite evaluar la vulnerabilidad, que desglosaremos en la siguiente sección y el definir el riesgo de los elementos expuestos.

- b) Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), es un organismo que publica informes de estudios sobre la identificación y evaluación de riesgos, incluyendo los relacionados con puentes.
- c) Metodologías de análisis geoespacial, existen diferentes plataformas que permiten ubicar espacialmente los puentes y sus características técnicas para identificar las áreas de mayor riesgo en diferentes sentidos, tal es el caso de la Red Nacional de Carreteras (RENAC), Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC), entre otros proyectos, principalmente gubernamentales, dedicados a desarrollar nuevas metodologías para evaluar los riesgos de zonas afectadas por desastre naturales, principalmente de socavación en puentes.

Las fuentes de información que llevan a cabo el monitoreo de los fenómenos hidrometeorológicos son el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Estas agencias gubernamentales son las encargadas de detectar posibles anomalías, así como prever y tomar las decisiones sobre las amenazas que representan este tipo de eventos para la infraestructura nacional.

De acuerdo con la CONAGUA, el porcentaje de impactos de ciclones tropicales por estado en el período de 1964 a 2023, se muestra en la Figura 2.3, en la que se indica que los estados de Baja California Sur con el 13.9%, Sinaloa y Quintana Roo con el 10.3% y Veracruz con el 8.9% han sido las entidades federativas mayormente afectadas por este tipo de fenómenos.



Figura 2.3 Porcentaje de Impactos de ciclones tropicales por estado en el período de 1964 a 2023

Fuente: SI-DGCC (2024), basada en datos de CONAGUA.

Para definir el estado estructural de los puentes, la SICT establece el estado físico de la red considerando la información del Catálogo de Carreteras y Puentes Federales Libres de Peaje, catálogo en el que se enlistan los puentes registrados en el Sistema de Puentes de México (SIPUMEX) mediante el cual la SICT y la DGCC administran la atención de los puentes de la red carretera federal de libre peaje y, con base en la inspección de los puentes, obtienen sus características y estado físico, lo que se traduce en una calificación que permite jerarquizar las necesidades de conservación de la infraestructura (SICT, 2020)

De la revisión del catálogo de SIPUMEX, publicado en el Programa de Reconstrucción y Conservación de Carreteras del Programa Nacional de Conservación de Carreteras (SICT, 2020), se destaca que la información que se describe es el número de identificación del puente, su nombre y longitud, el año de su construcción y su ubicación en la carretera y la ahora SICT clasificó, por entidad federativa, el estado físico de las carreteras como: “bueno”, “malo” y “regular”, como se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Estado físico de la red federal de carreteras libre de peaje, por entidad

Entidad Federativa		Longitud (km)	(%)		
			Malo	Regular	Bueno
Total nacional		40,583.28	14.00	25.00	61.00
1	Aguascalientes	343.89	10.00	23.00	67.00
2	Baja California	1636.58	7.00	19.00	74.00
3	Baja California Sur	1199.60	2.00	12.00	86.00
4	Campeche	1244.13	7.00	25.00	68.00
5	Chiapas	1483.67	15.00	30.00	55.00
6	Chihuahua	285.21	5.00	26.00	69.00
7	Coahuila	2027.55	22.00	36.00	42.00
8	Colima	2142.42	12.00	24.00	64.00
9	Durango	1937.23	17.00	24.00	59.00
10	Guanajuato	934.78	16.00	19.00	65.00
11	Guerrero	1911.49	0.00	0.00	0.00
12	Hidalgo	729.59	29.00	32.00	39.00
13	Jalisco	1904.17	21.00	33.00	46.00
14	Estado de México	776.60	24.00	37.00	39.00
15	Michoacán	2163.82	15.00	31.00	54.00
16	Morelos	325.09	12.00	27.00	61.00
17	Nayarit	765.68	14.00	31.00	55.00
18	Nuevo León	1132.10	8.00	21.00	71.00
19	Oaxaca	2847.40	35.00	37.00	28.00
20	Puebla	1003.96	18.00	33.00	49.00
21	Querétaro	504.03	16.00	37.00	47.00
22	Quintana Roo	767.48	1.00	5.00	94.00
23	San Luis Potosí	1657.52	11.00	28.00	61.00
24	Sinaloa	820.17	5.00	17.00	78.00
25	Sonora	1495.35	11.00	24.00	65.00
26	Tabasco	665.99	5.00	18.00	77.00
27	Tamaulipas	2141.20	7.00	18.00	75.00
28	Tlaxcala	557.37	39.00	29.00	32.00
29	Veracruz	2367.45	28.00	33.00	39.00
30	Yucatán	1328.98	9.00	14.00	77.00
31	Zacatecas	1482.80	7.00	15.00	78.00

Fuente: SCT, ahora SICT (2020).

De acuerdo con la estadística de la DGCC presentada en la Tabla 2.1 podemos observar que la Oaxaca es la entidad federativa con la mayor extensión de carreteras (2,847.40 km) y tan bien es la segunda con mayor porcentaje de infraestructura en mal estado, 35%, mientras que Baja California Sur con una longitud dentro de la media (1,199.60 km, es la que tiene menor porcentaje de infraestructura carretera en mal estado, tan solo el 2%.

Sin embargo, pese a que Tlaxcala tiene una longitud de carreteras de libre peaje de solo 557.37 km, la estadística indica que es la de mayor porcentaje de infraestructura en mal estado, 39%, por lo que es importante resaltar que es prioritaria, no debemos omitir que esta estadística, contiene datos registrados hasta el 2019, por lo que en la revisión de vulnerabilidad se solicitará información actual a la DGCC, para identificar el avance.

Cabe señalar que es el caso de Veracruz es similar al de Oaxaca, y aunque no se cuentan con datos para el Guerrero, es altamente probable que los datos se encuentren dentro de los mismos parámetros, y esto es debido a la alta exposición de estas zonas a los fenómenos hidrometeorológicos.

Asociado a estos fenómenos tenemos la exposición económica, ya que el presupuesto asignado respecto al costo asociado al impacto de estos fenómenos no permite la atención adecuada o mitigación de los riesgos. En la Figura 2.4, se muestran los costos anuales de los daños a fenómenos hidrometeorológicos acontecidos entre el 2018 y el 2023, de acuerdo con datos de la DGCC, mismo que muestra que para el 2023 los daños representaron un costo de 591 millones de pesos, una cifra por debajo de la media de los registros con que se cuenta.

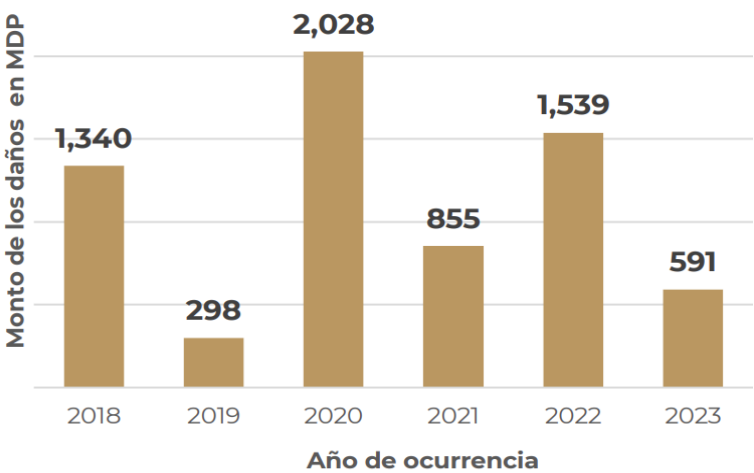


Figura 2.4 Costos anuales de los daños asociados a fenómenos hidrometeorológicos de los años 2018 al 2023

Fuente: DGCC (2024).

Derivado del análisis del diagnóstico del estado que presenta la infraestructura carretera libre de peaje, en la Tabla 2.1 se observa que la SICT para el periodo 2019 al 2024, identificó tramos de la red federal libre de peaje con necesidad prioritaria de reconstrucción y conservación para dicho periodo, de acuerdo con ello, en la Tabla 2.2, se muestra la planeación emitida por la DGCC de la longitud de tramos de la red federal libre de peaje de acuerdo con necesidad prioritaria de reconstrucción y conservación que identificaron de las inspecciones realizadas en esos periodos.

Tabla 2.2 Longitud de tramos de la red federal libre de peaje con necesidad prioritaria de reconstrucción y conservación 2019-2024 (kilómetros)

Año	Reconstrucción	Conservación periódica	Conservación rutinaria
Total	7,130.10	37,475.50	243,540.00
2019	2,302.90	3,090.30	40,590.00
2020	2,233.50	2,581.70	40,590.00
2021	1,454.70	5,520.40	40,590.00
2022	831.20	6,170.10	40,590.00
2023	277.00	10,135.40	40,590.00
2024	30.80	9,977.60	40,590.00

Fuente: SCT, ahora SICT (2020).

Conforme a la Tabla 2.2, para el ejercicio fiscal 2024, la SICT determinó realizar la conservación rutinaria de 40,590 kilómetros de la red carretera federal libre de peaje, lo que representa el 100.0% de la red federal del país; integrando la información del listado preliminar de obras y de puentes a reconstruir durante el ejercicio de acuerdo con la información mostrada en la Tabla 2.3a y 2.3b, respectivamente.

Tabla 2.3a Programa de asignación de recurso 2024. Subsecretaría de Infraestructura

PROGRAMA 2024		ASIGNACIÓN	META	
I	MEJORAR EL ESTADO FÍSICO DE LA RED	2,580,000,000.00		
a)	CONSERVACIÓN PERIÓDICA DE TRAMOS	2,500,000,000.00	1,205.14	km
b)	PROGRAMA DE PREVENCIÓN DE RIEGO DE PROTECCIÓN	80,000,000.00	306	km
II	MANTENER EL ESTADO FÍSICO DE LA RED	3,859,200,000.00		
a)	CONSERVACIÓN RUTINARIA DE TRAMOS	3,517,000,000.00	38,794.73	km
b)	CONSERVACIÓN RUTINARIA DE TRAMOS CPCC	50,200,000.00		
c)	GASTOS DE OPERACIÓN	152,000,000.00		
d)	CONSERVACIÓN RUTINARIA DE PUENTES	140,000,000.00	8,685.00	puentes
III	INCREMENTAR LA SEGURIDAD	1,560,000,000.00		
a)	RECONSTRUCCIÓN DE PUENTES	670,000,000.00	30	puentes
b)	CONSERVACIÓN PERIÓDICA DE PUENTES	90,000,000.00	106	puentes

Fuente: DGCC (2024).

Tabla 2.3b Programa de asignación de recurso 2024. Subsecretaría de Infraestructura.

PROGRAMA 2024		ASIGNACIÓN	META	
III	INCREMENTAR LA SEGURIDAD	1,560,000,000.00		
c)	ATENCIÓN A PUNTOS DE CONFLICTO Y SEGURIDAD VIAL	200,000,000.00	37	puntos
d)	SEÑALAMIENTO	600,000,000.00		
	SEÑALAMIENTO HORIZONTAL	500,000,000.00	33,335.33	km
	SEÑALAMIENTO VERTICAL	100,000,000.00	22,140.00	pza
IV	IV.- EST, PROJ, ING Y SUP	260,037,408.88		
a)	ESTUDIOS Y/O PROYECTOS	130,037,408.88		
b)	SEGUIMIENTO	130,000,000.00		
V	ADEUDOS	2,740,762,591.12		
	TOTAL	11,000,000,000.00		

Fuente: DGCC (2024).

De acuerdo con la redacción de la DGCC, las metas a definidas en el Programa Nacional de Conservación de Carreteras (PNCC) de los tramos carreteros y puentes con necesidad de reconstrucción y conservación realizados por los Centros SICT de las entidades federativas, están sujetas al cierre del ejercicio fiscal en curso.

2.3. Identificación de vulnerabilidades

Siendo que, como se describió en el estudio que antecede al presente (Porres et al., 2023), la vulnerabilidad está representada por las características que hacen a los puentes susceptibles a los efectos de daño o perjuicio de una amenaza, así también su análisis nos permite identificar los componentes que afectan a la infraestructura del país de manera directa o indirecta;

- La población está expuesta a riesgos que se han incrementado debido al propio crecimiento acelerado de la población y a la rápida urbanización, se presenta migración hacia las costas y la expansión de las ciudades sobre planicies inundables,
- La normatividad existente es insuficiente para regular los desastres naturales y/o antrópicos que impactan a la infraestructura.
- La amenaza del cambio climático y sus efectos expone a las sociedades, sectores económicos y ecosistemas a riesgos que surgen de la interacción entre un fenómeno relacionado con el cambio climático y la susceptibilidad a sufrir daños.

Entre los efectos físicos del cambio climático se identifican los siguientes:

- Aumenta el riesgo de desastres y cambia la magnitud y frecuencia de los eventos extremos.

- Aumenta la incidencia en las condiciones de variabilidad climática.
- Aumenta los factores de riesgo subyacentes y genera nuevas amenazas.
- Vulnere a la población ante la poca o nula respuesta.

De acuerdo con el Fondo Nacional de Desastres Naturales (FONDEN), México es estadísticamente vulnerable ante desastres geológicos, ya que, en promedio, México experimenta más de 90 sismos al año con magnitudes promedio de 4 grados en la escala de Richter (FONDEN, 2011), razón por la cual, los puentes están sumamente expuestos a sufrir daños por eventos sísmicos.

La Dirección General de Conservación de Carreteras (DGCC, 2024), proporcionó al IMT, una base de datos del Sistema de Gestión de Conservación de Carreteras, módulo de Puentes, con la estadística de puentes ubicados dentro de la Red Carretera Federal Libre de Peaje con daño a consecuencia de sismo. Esta relación se desglosa en la Tabla 2.4a y 2.4b.

Tabla 2.4a Puentes dañados por sismo en la Red Federal Libre Peaje

ESTADO	NOMBRE DE PUENTE	AÑO DE AFECTACIÓN	MAGNITUD DEL SISMO	TIPO DE DAÑO
Colima	Coahuayana	2003	7.6	Asentamientos de pilas, fractura de topes antisísmicos, desplazamiento de superestructura
Colima	Dren San Miguel	2022	7.7	Desplazamiento transversal y fractura de topes antisismo.
Guerrero	El Cuajilote	2013	6	Colapso total del puente.
Michoacán	Lázaro Cárdenas Derecho	1997	7.2	Daño en topes sísmicos
Michoacán	Lázaro Cárdenas Izquierdo	1997	7.2	Daño en topes sísmicos
Michoacán	El Cayaco	1997	7.2	Desplazamiento de superestructura
Michoacán	Chucutitán	1997	7.2	Desplazamiento de superestructura
Michoacán	La Chuta	1997	7.2	Desplazamiento de superestructura
Michoacán	Chuquiapan	1997	7.2	Desplazamiento de superestructura
Michoacán	La Manzanilla I	1997	7.2	Desplazamiento de superestructura
Michoacán	Teolan	1997	7.2	Desplazamiento de superestructura
Michoacán	Boca de Campos	1997	7.2	Desplazamiento de superestructura
Michoacán	Los Hornos	1997	7.2	Desplazamiento de superestructura
Michoacán	Nexpa	1997	7.2	Desplazamiento de superestructura
Michoacán	El Mexiquillo	1997	7.2	Desplazamiento de superestructura

Fuente: DGCC (2024).

Tabla 2.4b Puentes dañados por sismo en la Red Federal Libre Peaje

ESTADO	NOMBRE DE PUENTE	AÑO DE AFECTACIÓN	MAGNITUD DEL SISMO	TIPO DE DAÑO
Michoacán	El Chico	1997	7.2	Desplazamiento de superestructura
Michoacán	La Manzanilla II	1997	7.2	Desplazamiento de superestructura
Michoacán	Huahua	1997	7.2	Desplazamiento de superestructura
Michoacán	Boca de San Luis	1997	7.2	Desplazamiento de superestructura
Michoacán	Arenas Blancas	1997	7.2	Desplazamiento de superestructura
Michoacán	Chocola	1997	7.2	Desplazamiento de superestructura
Michoacán	Paso de la Noria	1997	7.2	Desplazamiento de superestructura
Michoacán	Maruata II	2022	7.7	Asentamiento en accesos
Michoacán	Colola	2022	7.7	Desplazamiento superestructura
Michoacán	Escobillero I	2022	7.7	Asentamiento en accesos
Michoacán	Motin del Oro I	2022	7.7	Desplazamiento superestructura
Michoacán	Motin del Oro II	2022	7.7	Asentamiento en accesos
Michoacán	La Placita	2022	7.7	Desfasamiento superestructura
Michoacán	Ticuiz II	2022	7.7	Asentamiento en accesos
Michoacán	Cointzio Der	2022	7.7	Grietas en elementos de la subestructura
Michoacán	Jocolones Der	2022	7.7	Grietas en elementos de la subestructura
Michoacán	La Pastoría	2022	7.7	Grietas en elementos de la subestructura
Oaxaca	Chila	1999	7.5	Asentamiento de la pila 2
Oaxaca	Ixtaltepec	2017	8.2	Colapso de un tramo, desplazamiento transversal entre tramos.
Oaxaca	La Ventosa	2017	8.2	Desplazamiento transversal y fractura de topes antisismo (septiembre 2017)
Oaxaca	Los Perros Cpo. Der	2017	8.2	Fractura horizontal de estribo 1, fractura de rejilla metálica del sistema de piso y agrietamiento de carpeta en accesos
Oaxaca	Los Perros Cpo. Izq.	2017	8.2	Fractura horizontal de estribo 1, fractura de rejilla del sistema de piso y agrietamiento de carpeta en accesos
Oaxaca	Malatengo II	2017	8.2	Desplazamiento transversal y fractura de topes antisismo (septiembre 2017)
Tabasco	La Pigua I	2000	4.1	Asentamiento de la pila 5 (colapso) y los tramos 4-5 y 5-6.

Fuente: DGCC (2024).

El segundo fenómeno de mayor vulnerabilidad de los puentes son los que ocasionan daños a consecuencia de eventos hidrometeorológicos, debido a la formación de ciclones que ponen en riesgo a la población y provocan deslaves, inundaciones e inestabilidad de los suelos que a su vez ocasionan daños físicos y materiales a los puentes.

Para poder dar cuenta de esto y otros fenómenos que impactan en los puentes, con la base de datos del Sistema de Gestión de Conservación de Carreteras, módulo de Puentes recibida de la Dirección General de Conservación de Carreteras (DGCC) (2024), se realizó una estadística de puentes ubicados dentro de la Red Carretera Federal Libre de Peaje con daño por socavación, estas debidas a diferentes escenarios de riesgo que se describen en las Tablas 2.5a, 2.5b, 2.5c, y 2.5d y 2.5, respectivamente.

Tabla 2.5a Puentes dañados por socavación en la Red Federal Libre Peaje

ESTADO	NOMBRE DE PUENTE	AÑO DE AFECTACIÓN	TIPO DE DAÑO
Baja California	San Vicente	2010	Corte de terraplén de acceso de la margen izq.
Baja California	Santo Domingo I	2010	Asentamiento por socavación de la pila 3 y 4. El terraplén intermedio entre este puente y el Santo Domingo II sufrió un corte de 80 m de su totalidad de 160m.
Baja California	Rosario I y II	2010	Corte del terraplén de acceso al puente el Rosario I sufrió o de la margen derecha en una longitud de 60 metros. También se tuvo un corte de 80 metros de longitud en el terraplén intermedio entre el puente Rosario I y el puente el Rosario II
Campeche	Lechugal I	2000	Colapso de puente
Coahuila	Río Sabinas Der.	2010	Asentamiento de la pila 2
Coahuila	Río Sabinas Izq.	2010	Asentamiento y desplome de la pila 2
Chiapas	Despoblado derecho	1998	Colapso de puente
Chiapas	Vado Ancho Der.Cpo.A	1998	Colapso de puente
Chiapas	Cintalapa I	1998	Colapso de puente
Chiapas	Bonanza I	1998	Erosión socavación
Chiapas	San Nicolás	1998	Colapso de puente
Chiapas	Novillero	1998	Colapso de puente
Chiapas	Las Arenas I	1998	Erosión socavación
Chiapas	Margaritas I Der. (cpo.A)	1998	Colapso de puente
Chiapas	Echegaray I	1998	Colapso de puente
Chiapas	Pijijiapan I	1998	Colapso de puente
Chiapas	Urbina I Der. (cpo.A)	1998	Colapso de puente
Chiapas	San Diego I	1998	Colapso de puente

Fuente: DGCC (2024).

Tabla 2.5b Puentes dañados por socavación en la Red Federal Libre Peaje

ESTADO	NOMBRE DE PUENTE	AÑO DE AFECTACIÓN	TIPO DE DAÑO
Chiapas	San Isidro I	1998	Erosión socavación
Chiapas	De Jesús I	1998	Erosión socavación
Chiapas	Las Hermanas	1998	Erosión socavación
Chiapas	Campeche	1998	Erosión socavación
Chiapas	Mazapa de Madero	1998	Erosión socavación
Chiapas	Bobo I	1998	Colapso de puente
Chiapas	Huehuetán Derecho	1998	Colapso de puente
Chiapas	Coatán	2005	Colapso de puente
Chiapas	Huehuetán Derecho	2005	Colapso de puente
Chiapas	Tepuzapa Derecho	2005	Colapso de puente
Chiapas	Despoblado derecho	2005	Colapso de puente
Chiapas	Despoblado izq.	2005	Colapso de puente
Chiapas	Vado Ancho Der.Cpo.A	2005	Colapso de puente
Chiapas	Vado Ancho	2005	Colapso de puente
Chiapas	Cintalapa I	2005	Colapso de puente
Chiapas	Cintalapa II (paralelo)cpo.B	2005	Colapso de puente
Chiapas	San Nicolás	2005	Colapso de puente
Chiapas	Saltillo I	2005	Erosión socavación
Chiapas	Urbina I Der. (cpo.A)	2005	Erosión socavación
Chiapas	Urbina	2005	Erosión socavación
Chiapas	San Isidro I	2005	Erosión socavación
Chiapas	Los Patos I Der.(cpo.A)	2005	Erosión socavación
Chiapas	Los Patos Izq.	2005	Erosión socavación
Chiapas	Ocuilapa I	2005	Erosión socavación
Chiapas	Ocuilapa II	2005	Erosión socavación
Chiapas	Ocuilapa III	2005	Erosión socavación
Chiapas	El Rosario I	2005	Erosión socavación
Chiapas	El Capulín	2005	Erosión socavación
Chiapas	Talismán	2005	Erosión socavación
Chiapas	Cahuacán	2005	Erosión socavación
Chiapas	Chapingo	2005	Erosión socavación
Chiapas	La Piedra	2005	Erosión socavación
Chiapas	Guadalupe	2005	Colapso de puente
Chiapas	San José	2005	Colapso de puente
Chiapas	El Chorro	2005	Colapso de puente
Chiapas	El Wana	2005	Colapso de puente
Chiapas	Tepuzapa Derecho	2005	Colapso de puente
Chiapas	Islamapa Derecho	2005	Colapso de puente
Chiapas	San Diego I	2005	Colapso de puente
Chiapas	Santo Domingo	2023	Socavación de las pilas, corrosión
Chihuahua	Paso Superior Arados Der.	2023	Agrietamiento de aleros

Fuente: DGCC (2024).

Tabla 2.5c Puentes dañados por socavación en la Red Federal Libre Peaje

ESTADO	NOMBRE DE PUENTE	AÑO DE AFECTACIÓN	TIPO DE DAÑO
Chihuahua	Paso Superior Arados Izq.	2023	Agrietamiento de aleros
Durango	San Antonio del Parral	2016	Colapso de 2 tramos puente
Durango	Molino de Cilindros	2016	Socavación, insuficiencia hidráulica
Durango	San Antonio del Parral	2020	Colapso del Estribo 1 y pila 2 y asentamiento de la pila 4, caída de los tramos 1-2 y 2-3 de la superestructura, así como corte del acceso aledaño al Estribo 1.
Guerrero	Omitlán	2013	Los claros No. 2 y 3 (Tramo principal anterior) colapsaron al desplome de la pila No.3 por el paso del Huracán Ingrid y Manuel.
Guerrero	Canal	2013	Colapso del puente
Guerrero	Petaquillas	2013	Colapso del puente
Guerrero	Barra Vieja Las Lomas	2013	Colapso de varios tramos
Guerrero	Miguel Alemán	2013	Colapso de varios tramos
Guerrero	Coyuca	2013	Colapso de varios tramos
Guerrero	Agustín Lorenzo	2013	Colapso del puente
Guerrero	Ing. Alfredo Mendizabal	2013	Daño en los conos de derrame
Guerrero	Papagayo I	2013	Colapso de superestructura (arcos inferior tipo cerrado)
Guerrero	Buenavista I	2013	Daño en dentello y cono de derrame del caballete 2
Guerrero	Ing. Alfredo Mendizabal	2023	Socavación el acceso de entrada al puente por el paso del Huracán Otis.
Guerrero	Río del Valle	2023	Socavación en el acceso de salida, debido al paso del huracán OTIS en Octubre de 2023.
Guerrero	Juluchuca	2023	Socavación en pilas
Jalisco	Ameca I	2010	El puente sufrió el colapso de 2 claros de 31m cada uno debido a la socavación de uno de sus apoyos, causada por la creciente del río Ameca.
Jalisco	Contla	2013	Colapso del puente
Michoacán	Tuzantla I	2010	Colapso de 2 tramos
Michoacán	El Cuate II	2021	Puente colapsado por socavación de la pila central.
Michoacán	Las Juntas	2021	Erosión socavación de accesos por insuficiencia hidráulica.
Nayarit	El Llano	2010	Colapso debido a la socavación de su apoyo central
Nayarit	Tuxpan nuevo	2021	Erosión y socavación de acceso en la margen derecha por insuficiencia hidráulica.
Nuevo León	Iturbide	2010	Colapso del puente
Nuevo León	Pilón der.	2010	Asentamiento de la pila 3
Nuevo León	Pilón Izq.	2010	Asentamiento de la pila 3
Nuevo León	Pilón Der.	2023	Erosión socavación de conos extremos
Nuevo León	Pilón Izq.	2023	Erosión socavación de conos extremos
Oaxaca	Las Arenas	1997	Colapso del puente

Fuente: DGCC (2024).

Tabla 2.5d Puentes dañados por socavación en la Red Federal Libre Peaje

ESTADO	NOMBRE DE PUENTE	AÑO DE AFECTACIÓN	TIPO DE DAÑO
Oaxaca	Los Tigres	1997	Socavación
Oaxaca	Los Tigres Auxiliar	1997	Erosión socavación
Oaxaca	Río Verde	1997	Erosión socavación
Oaxaca	Yutanana	1997	Colapso del puente
Oaxaca	Yutanana Auxiliar	1997	Colapso del puente
Oaxaca	El Gachupin	1997	Colapso del puente
Oaxaca	Rio Grande II	1997	Colapso del puente
Oaxaca	Barra Prieta	1997	Erosión socavación
Oaxaca	Manialtepec / Hidalgo	1997	Socavación en accesos
Oaxaca	Manialtepec Auxiliar	1997	Socavación en accesos
Oaxaca	San Juan	1997	Erosión socavación
Oaxaca	Chacalapilla	1997	Erosión socavación
Oaxaca	El Azufre	1997	Erosión socavación
Oaxaca	San Miguel	1997	Erosión socavación
Oaxaca	La Pochota	1997	Erosión socavación
Oaxaca	La Mesa	1997	Erosión socavación
Oaxaca	Tres ríos	1997	Colapso del puente
Oaxaca	Chacalapa I	1997	Erosión socavación
Oaxaca	Humedad Auxiliar	1997	Colapso del puente
Oaxaca	Humedad	1997	Colapso del puente
Oaxaca	Macuilxochitl	2010	La corriente erosionó los terraplenes de acceso de ambas márgenes, provocando que la subestructura y superestructura se asentara hasta 40 cm.
Oaxaca	Aeropuerto	2010	La corriente socavó la pila 3 del puente Aeropuerto, provocando que se asentara del orden de 1.2 m
Oaxaca	Xia	2010	Corte del terraplén de acceso de la margen izquierda en una longitud de 20 m
Oaxaca	Guelatao	2010	La corriente incidió en la margen derecha, cortando el terraplén de acceso del puente Guelatao II en 80 m de longitud y provocando que el estribo de ese lado se asentara del orden de 1.0 m
Oaxaca	San Bernardo	2021	Erosión socavación de apoyos
Oaxaca	Zacatepec	2021	Colapso parcial del estribo No 1 y alero izq. del mismo.
Oaxaca	Azufre	2022	Colapso de cimentación por erosión socavación
Oaxaca	San Lorenzo	2023	Socavación en pilas
Sinaloa	Río Quelite	2021	Se colapsan 3 claros, corte del terraplén y paso el agua sobre la rasante
Sonora	Muchachito	2010	Una avenida extraordinaria en el cauce del río Sásabe, lo que provocó el asentamiento diferencial y fractura de la pila 3 por socavación, habiendo quedado los tramos 2-3 y 3-4 de la superestructura apoyados sobre dicha pila sólo en la mitad de su ancho, sin acusar asentamiento alguno sobre la superficie de rodamiento.
Tabasco	Tonalá	2009	Colapso de las pilas

Fuente: DGCC (2024).

Tabla 2.5e Puentes dañados por socavación en la Red Federal Libre Peaje

ESTADO	NOMBRE DE PUENTE	AÑO DE AFECTACIÓN	TIPO DE DAÑO
Veracruz	La Galeana I	1999	Colapso del puente
Veracruz	La Galeana II	1999	Colapso del puente
Veracruz	La Guadalupe	1999	Colapso del puente
Veracruz	Viguetas I	1999	Erosión socavación
Veracruz	Viguetas II	1999	Erosión socavación
Veracruz	Casitas	1999	Corte de accesos
Veracruz	17 de Octubre	1999	Erosión socavación
Veracruz	Río Jimba	2010	Asentamiento y desplome de la pila 3, debido a la socavación causada por la creciente del río.
Veracruz	La Iguana	2017	Colapso de obra de drenaje
Zacatecas	Río Grande	2023	Colapso debido a la socavación de la pila 5

Fuente: DGCC (2024).

De acuerdo con la información proporcionada por la DGCC, se cuenta con el registro de 39 puentes que sufrieron daño por sismo de magnitudes superiores a los 7.1 ° en Escala de Richter entre 1997 y 2022. Las entidades más afectadas son principalmente Michoacán, Oaxaca, Colima, Tabasco y Guerrero. El daño con mayor presencia ha sido el desplazamiento de la superestructura, como se muestra en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6 Resumen de afectaciones en puentes por sismo

Estado	No. de puentes dañados	Efecto del daño	Acción preponderante de mitigación
Michoacán	29	Desplazamiento de la superestructura, fractura de topes antisismo	Construcción de topes y alineamiento de los puentes.
Oaxaca	6	Desplazamientos y colapsos de tramos, asentamientos de pilas, fractura de topes antisismo.	Reconstrucción de tramos afectados y alineamiento de puentes
Colima	2	Desplazamiento transversal, asentamientos de pilas, fractura de topes antisismo en puente Coahuayana y dren San Miguel.	Construcción de puente nuevo
Guerrero	1	Colapso total del puente El Cuajilote (2013)	Construcción de puente nuevo
Tabasco	1	Colapso de la pila 5 y los tramos 4-5 y 5-6 del puente La Pigua I (2000)	Construcción de puente nuevo.

Nota: Basado en la información proporcionada por la DGCC (2024).

Fuente: Elaboración propia (2024).

Respecto a los puentes que han sufrido afectaciones por causa de socavación, de la información proporcionada por la DGCC (2024), se denota que se cuenta con un registro de 130 puentes dañados por socavación, principalmente en los estados del sur del país; Chapas, Oaxaca, Guerrero y Veracruz, que son los estados que mayores fenómenos hidrometeorológicos impactan.



Figura 2.5 Puentes dañados por sismos

Fuente: 1) Cruz, Anadolu Agency (2022), 2) Chaca (2017), 3) La Razón de México (2017), 4) Méndez (2022).

Los mayores efectos de socavación registrados se generaron a consecuencia de corrosión en pilas, erosión y el tránsito de avenidas extraordinarias, principalmente. El desglose se muestra en la Tabla 2.7a y 2.7b.

Tabla 2.7a Resumen de afectaciones en puentes por socavación

Estado	No. de puentes dañados	Efecto del daño	Acción preponderante de mitigación
Chiapas	52	Socavación de las pilas, corrosión de acero de refuerzo en pilastrones	Construcción de obras de desvío. Se construyó un puente para sustituir el terraplén intermedio.
Oaxaca	29	Socavación en pilas	Construcción de puentes nuevos
Guerrero	13	Socavación en pilas	Recimentación de las pilas
Veracruz	9	Colapso de obra de drenaje	Protección contra socavación de la subestructura, reparación de topes antisísmicos
Nuevo León	5	Erosión socavación de conos extremos	Encamisado de aleros con anclajes transversales
Michoacán	3	Erosión socavación de accesos por insuficiencia hidráulica.	Construcción de puentes nuevos

Nota: Basado en la información proporcionada por la DGCC (2024).

Fuente: Elaboración propia (2024).

Tabla 2.7b Resumen de afectaciones en puentes por socavación

Estado	No. de puentes dañados	Efecto del daño	Acción preponderante de mitigación
Baja California	3	Cortes del terraplén	Sustitución del presfuerzo existente, cambio de apoyos y juntas de dilatación, protección contra socavación, construcción de camino de desvío.
Durango	3	Colapso del Estribo, asentamiento de las pilas, colapso de la superestructura.	Construcción de puente nuevo
Coahuila	2	Asentamiento y desplome de pila	Construcción de puente nuevo
Chihuahua	2	Agrietamientos de aleros	Construcción de un claro adicional con cimentación profunda.
Jalisco	2	Colapso del puente	Reconstrucción de zona dañada.
Nayarit	2	Erosión y socavación de acceso por insuficiencia hidráulica.	Construcción de puente nuevo
Sinaloa	1	Colapso de claros, corte del terraplén y paso el agua sobre la rasante.	Construcción de puente nuevo
Sonora	1	Asentamiento diferencial y fractura de la pila por socavación.	Construcción de puente nuevo
Tabasco	1	Colapso de las pilas	Construcción de puente nuevo
Campeche	1	Colapso de puente	Construcción de puente nuevo
Zacatecas	1	Colapso de pila	Construcción de puente nuevo

Nota: Basado en la información proporcionada por la DGCC (2024).

Fuente: Elaboración propia (2024).

Considerando el análisis de los escenarios de riesgo, el dimensionamiento del riesgo en puentes es un proceso complejo que involucra el análisis de confiabilidad de las estructuras, la respuesta sísmica, pero también la atención a la normativa y criterios de diseño, bajo la premisa de que, en México, el peso reglamentario de los vehículos de carga a menudo excede las cargas de diseño para más del 80% del inventario de puentes (Carrión, 2014) y de que más del 50% de los puentes tienen más de 30 años y el 21% requiere mantenimiento inmediato.

3. Determinación de indicadores de riesgo y resiliencia

Partiendo de que los indicadores de riesgo y resiliencia son herramientas utilizadas para monitorear y mitigar los impactos de posibles amenazas y detectar con anticipación los riesgos inherentes a una actividad o proceso, en este apartado se determinan los indicadores para que servirán de base para el monitoreo de la resiliencia de los puentes.

El objetivo principal de los indicadores es dar lugar a una gestión de riesgos efectiva, que permita identificar de manera temprana una amenaza, permitiendo así iniciar acciones para su tratamiento preventivo, anticipándose a los posibles problemas y crisis que se podría generar, asegurando así la continuidad y el éxito de sus operaciones.

Los indicadores presentan las siguientes características:

- Son indicadores que se definen tomando en cuenta el conocimiento de los riesgos potenciales y emergentes.
- Proporcionan información que permita tomar decisiones y priorizar recursos.
- Proporcionan una señal temprana y oportuna de una exposición al riesgo creciente.
- Son medibles; cuantificables, precisos y comparables con otros indicadores y benchmarks.
- Ofrecen información de aquellas medidas que se deben aplicar para revertir el efecto de la materialización del riesgo.
- Son consistentes, es decir, fiables para poder rastrear cambios a lo largo del tiempo.
- Son de relevancia para el monitoreo del proceso que le da origen, estar claramente vinculado y tener un valor predictivo probado.
- Dan lugar a la gestión del desempeño que permite identificar oportunidades.

De acuerdo con Price Waterhouse Coopers (2020), para calcular los indicadores y evaluar y cuantificar los riesgos asociados a diferentes procesos o actividades, como se muestra en la figura 3.1.

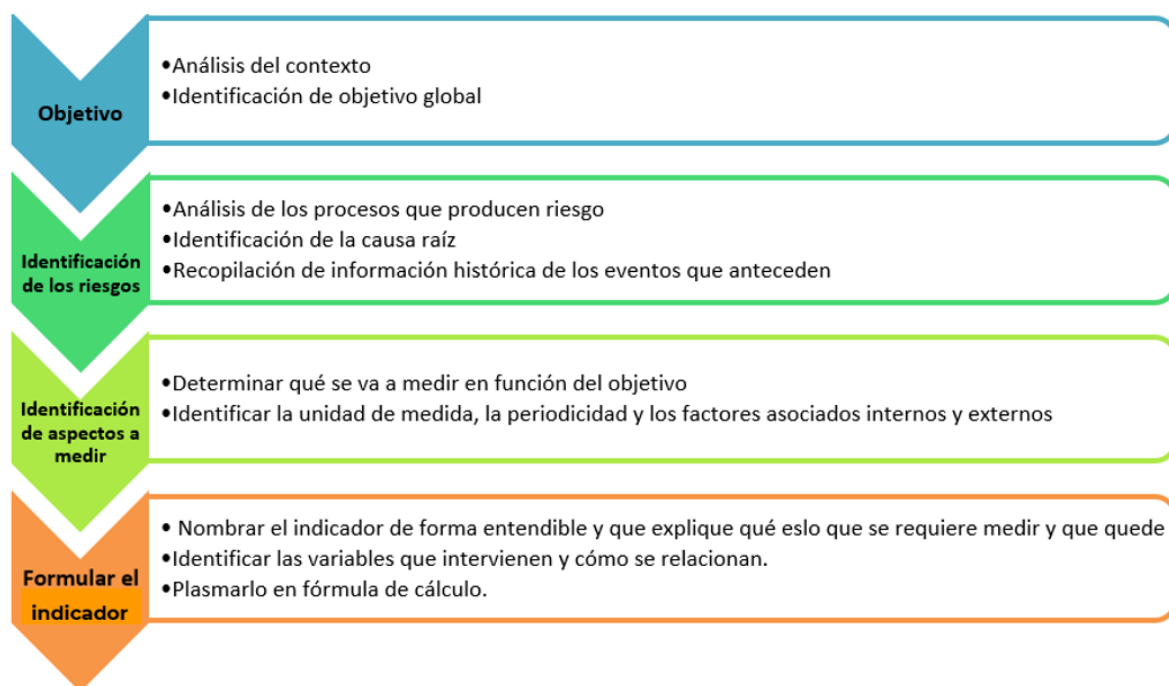


Figura 3.1. Proceso de construcción de indicadores

Nota: Basado en Price Waterhouse Coopers (2020).

Fuente: Elaboración propia (2024).

A continuación, se definen los pasos generales;

a) Identificación de riesgos potenciales.

Corresponde a identificar aquellos riesgos a los que está expuesto un puente y que pueden impactar en su resiliencia ante un evento extraordinario, esto incluye analizar eventos pasados, revisar documentación que anteceda a los riesgos u otro aspecto que permita identificar el riesgo y su contexto.

b) Evaluación de probabilidad.

Cada riesgo identificado se evalúa en términos de su probabilidad de ocurrencia y su impacto potencial. La probabilidad se puede medir en una escala del 1 al 10, donde 1 es improbable y 10 es muy probable. El impacto también se mide en una escala similar, donde 1 es un impacto mínimo y 10 es un impacto catastrófico, esto de acuerdo con cómo se define para el indicador en particular.

c) Cálculo del nivel de riesgo.

El nivel de riesgo se calcula multiplicando la probabilidad por el impacto. Este valor ayuda a priorizar los riesgos según su severidad.

d) Definición de indicadores de riesgo y resiliencia

Los indicadores son métricas específicas que monitorean los riesgos identificados que deben contener las características definidas previamente; ser relevantes, medibles, comparables, etc.

Para construir el indicador y realizar e identificar métricas relevantes que proporcionen información útil sobre los riesgos potenciales comenzando con una comprensión apropiada de los objetivos organizacionales y los eventos relacionados con el riesgo que podrían afectar su cumplimiento, en la Figura 3.1 se muestra el proceso.

Los indicadores deben estar alineados con el efecto del riesgo, las metas de desempeño establecidas y las evaluaciones de los riesgos identificados sobre cada objetivo.

e) Determinación, monitoreo y seguimiento

Una vez definidos, los indicadores deben ser monitoreados regularmente para detectar cambios en el nivel de riesgo, lo cual permite tomar medidas preventivas o correctivas a tiempo.

3.1 Identificación de riesgos potenciales

Para identificar los riesgos potenciales a los que está expuesto un puente, con base en la información recopilada, a continuación, se describen todos los riesgos identificados.

El Índice de Riesgo Mundial (WRI, por sus siglas en inglés, 2023), que es un indicador que evalúa el riesgo de catástrofes naturales en 193 países reconocidos por la ONU considerando la proporción de la población expuesta y la vulnerabilidad social, en su Informe sobre Riesgos Mundiales 2023, elaborado por la Universidad Ruhr de Bochum, indica que el índice de riesgo por catástrofes de fenómenos naturales extremos (terremotos, tormentas, inundaciones, sequías o subida del nivel del mar) e impactos negativos, ocasiona el cambio climático en México, con el índice más alto del registro, 38.17 en Latinoamérica, como se muestra en la Figura 3.2.

De acuerdo con la información proporcionada por la DGCC (2024), desglosada en las Tablas 2.6 y 2.7, respectivamente, tenemos que los daños que presentan con mayor frecuencia los puentes, y de los cuales se cuenta con registros en el Sistema de Gestión de Conservación de Carreteras, son los causados por sismo o por socavación, a consecuencia de eventos de sísmicos, hidrometeorológicos, avenidas extraordinarias, corrosión en elementos estructurales y erosión, principalmente.

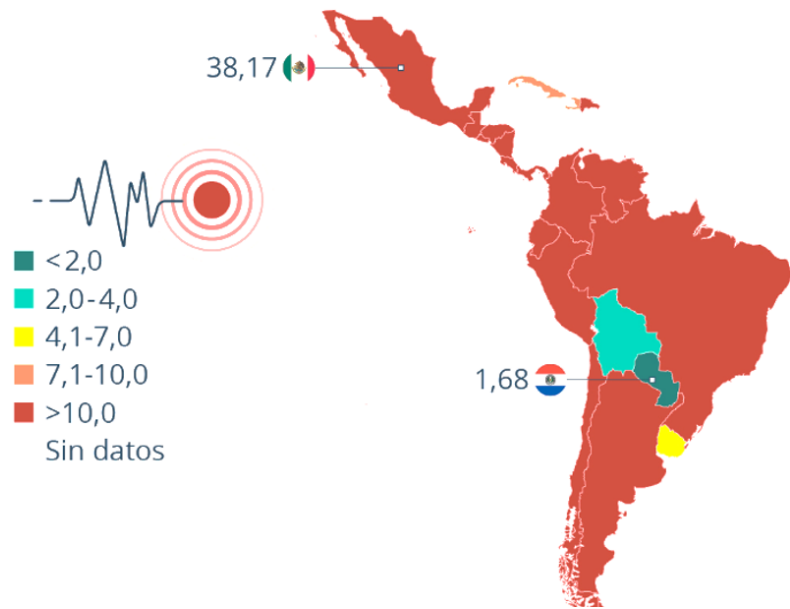


Figura 3.2 Índice de riesgo por fenómenos naturales extremos

Nota: Información recopilada del WRI (2023).

Fuente: Statista (2024).

El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2023) realizó la identificación por entidad federativa de las que cuentan con mayor incidencia en número de declaratorias riesgo de desastre y emergencia, las cuales durante 2023 fueron Veracruz y Guerrero, principalmente, con el 58 % del total de declaratorias emitidas. (ver Figura 3.3.)

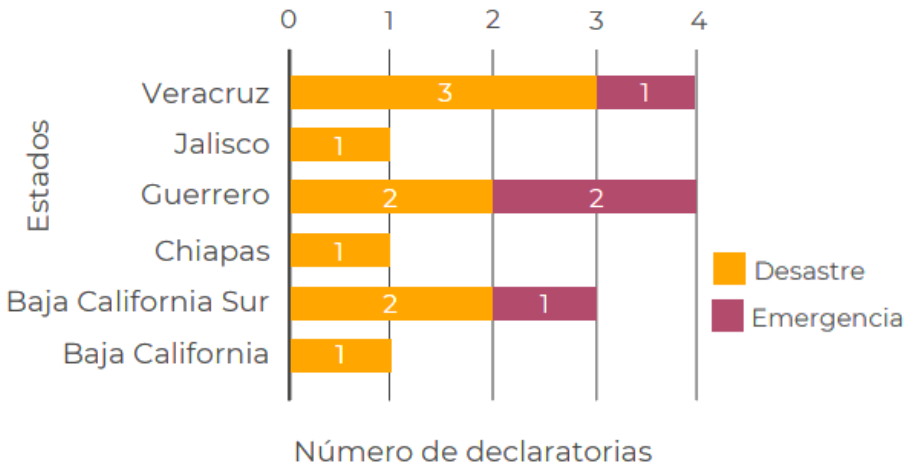


Figura 3.3 Declaratoria emitidas por entidad 2023

Fuente: CENAPRED (2024).

La Dirección General de Conservación de Carreteras (DGCC) tiene registrado en el Sistema de Gestión de Conservación de Carreteras, modulo Puentes, que el puente más antiguo, y aún sin reconstruir, fue

construido en el año 1710, se trata justamente del puente Tequisquiapan ubicado en el estado de Querétaro, los materiales con que están contruidos los puentes y su antigüedad se relacionan en la Gráfica 3.1 de la cual se destaca que los puentes son contruidos principalmente a base de concreto y que los años de mayor densidad de construcción ha sido de 1980 a la fecha, aun cuando recientemente el presupuesto ha disminuido, se ha aplicado al mantenimiento y reconstrucción, particularmente de los que han sido impactados por fenómenos de desastres naturales entre 2010 y actualmente. En su página web la DGCC destaca que el 50% de los puentes (4,919) están contruidos de concreto reforzado y que el 36% (3,507) son de concreto presforzado.



Gráfica 3.1 Materiales de construcción de los puentes

Nota: Basada en información de la DGCC (2024).

Fuente: Elaboración propia (2024).

La Federal Highway Administration (2007) (FHWA, por sus siglas en inglés), identifica varios riesgos potenciales asociados con los puentes, especialmente en relación con desastres naturales y eventos inducidos por el hombre, descrito para este estudio como antrópicos, entre ellos destacan, las inundaciones, los terremotos, los vientos fuertes y huracanes, las explosiones y accidentes, así como el desgaste y deterioro, algunos de los principales riesgos se describen en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Riesgos potenciales identificados por la FHWA

Riesgo	Efecto
Inundaciones	Causan socavación, que es la erosión del material alrededor de las bases de los puentes, debilitando su estructura
Sismos	Los movimientos sísmicos pueden dañar seriamente la integridad estructural de los puentes, por ello es importante que estén diseñados para resistir tales fuerzas
Huracanes (Vientos fuertes)	Causan daños directos a la estructura del puente y también pueden llevar escombros que lo impacten. (Carrión et al., 2011)
Accidentes (antrópicos)	Corresponden a explosiones o accidentes vehiculares que pueden comprometer la seguridad de los puentes
Desgaste y deterioro	Acciones que ocurren con el paso del tiempo, debido al tráfico constante y las condiciones climáticas, y que pueden causar fallos estructurales si no se realiza un mantenimiento adecuado. (Carrión et al., 2011)

Nota: Basada en Rimal y Pagán (2013) y Carrión et al., (2011).

Fuente: Elaboración propia (2024).

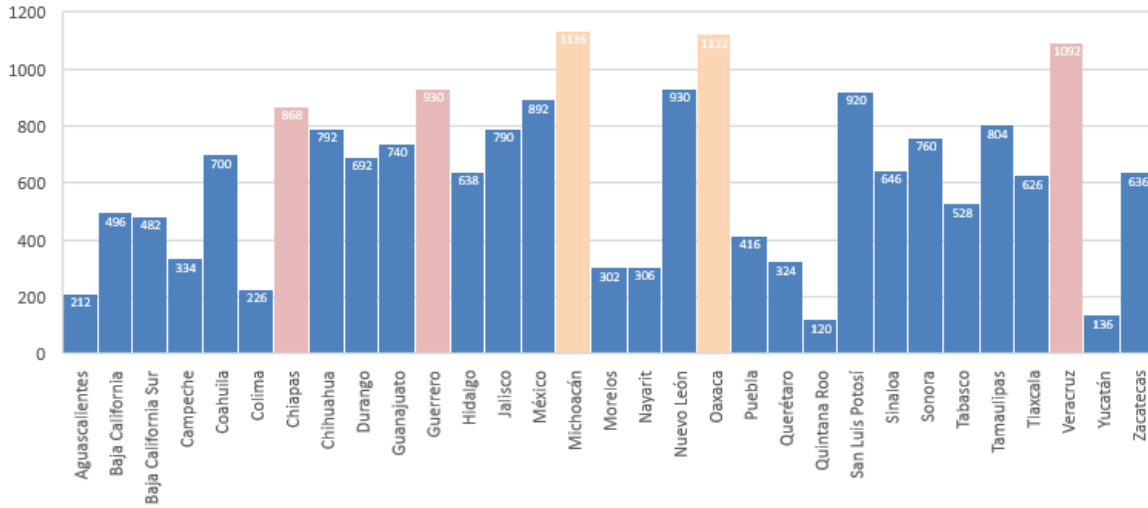
En cuanto al desgaste y deterioro, cabe destacar que, en la base de datos trabajada, este rubro se identificó como daños de elementos estructurales del puente, en el cual se incluyen los principales factores que han sido identificados de alta importancia al realizar inspecciones periódicas y mantenimientos como, fatiga o desgaste de materiales, corrosión, sobrecargas y tráfico, daños a consecuencia de falta de mantenimiento o factores ambientales que pueden afectar la integridad estructural del puente.

Otro riesgo importante es el de amenaza ambiental, para el cual la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT), a través de la Dirección General de Conservación de Carreteras (DGCC) creó los Lineamientos de Operación Específicos para atender los daños desencadenados por fenómenos naturales perturbadores y define la forma de actuar ante estos eventos extraordinarios, destacando que la extinción del Fondo de Desastres Naturales (FONDEN), agrava el riesgo principalmente económico y social, ya que, aún impera desconocimiento de los protocolos de actuación ante este tipo de situaciones.

3.2 Evaluación de probabilidad de impacto

Cada riesgo identificado se evalúa en términos de su probabilidad de ocurrencia y su impacto potencial en el puente, considerando que la DGCC cuenta con un registro de 19,596 puentes incluyendo puentes de libre peaje, de la red básica y secundaria, así como corredores, como se muestra en la Gráfica 3.2., en este se identifican las entidades con mayor número; Michoacán con 1,136, Oaxaca con 1,122, Veracruz con 1, 092, Nuevo león y Guerrero con 930, San Luis Potosí con 920, Chiapas 868, de las cuales

las de mayor incidencia en declaratorias de desastre y emergencia, son Veracruz, Guerrero y Chiapas.



Gráfica 3.2 Riesgos potenciales identificados por la FHWA

Nota: Basada en información de la DGCC (2024).

Fuente: Elaboración propia (2024).

Con base en el Resumen ejecutivo 2023 del Impacto Socioeconómico de los desastres, emitido por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2024), y en los registros de inspecciones realizadas por la Dirección General de Conservación de Carreteras (DGCC) realizados en ese mismo año, se analizó la información encontrando coincidencia con los eventos que fueron las causas principales de daño en los puentes identificados en las inspecciones. En la Figura 3.4. se muestran las declaratorias de desastres y emitidas por el CENAPRED en México, de las cuales el 50% fueron a causa de ciclones tropicales, el 29% por lluvia, 14% por proceso de remoción de masa y el 7% por inundación.



Figura 3.4 Porcentaje de declaratorias de desastre y emergencia por subtipo de fenómeno 2023

Fuente: CENAPRED (2024).

Los ciclones tropicales tuvieron el mayor impacto, representaron 98.4 % del total de daños, en tanto que a las lluvias e inundaciones correspondió 1.6 %. Los daños y pérdidas en 2023 fueron cuatro veces mayores que en 2022, principalmente, por los efectos del huracán Otis, como se muestra en el resumen de la Figura 3.5.

Figura 3.5 Impacto económico de fenómenos hidrometeorológicos 2023

Fecha de inicio	Fenómeno	Estado	Descripción	Daños y pérdida (millones de pesos corrientes)
24 al 25 de octubre de 2023	Hidrometeorológicos	Guerrero	Huracán <i>Otis</i>	84 207
9 al 11 de octubre de 2023	Hidrometeorológicos	Guerrero	Tormenta tropical <i>Max</i>	701.9
3 de agosto del 2023	Hidrometeorológicos	Veracruz	Lluvia severa e inundación fluvial y/o pluvial	537.6
18 al 20 de agosto de 2023	Hidrometeorológicos	Baja California	Huracán <i>Hilary</i>	427.4
15 al 16 de octubre de 2023	Hidrometeorológicos	Veracruz	Lluvia severa e inundación fluvial y/o pluvial	427.1
19 de agosto de 2023	Hidrometeorológicos	Baja California Sur	Huracán <i>Hilary</i>	426.5

Fuente: CENAPRED-DGGR (2024).

La Dirección General para la Gestión de Riesgos (DGGR) (2024), cuenta con el registro de las Declaratorias de Desastres, actualizada al segundo trimestre de 2024, en la cual se indican los sismos cuyo impacto fue severo, al grado que varios sectores de la población se vieron afectados, esta información se muestra en la Tabla 3.2.

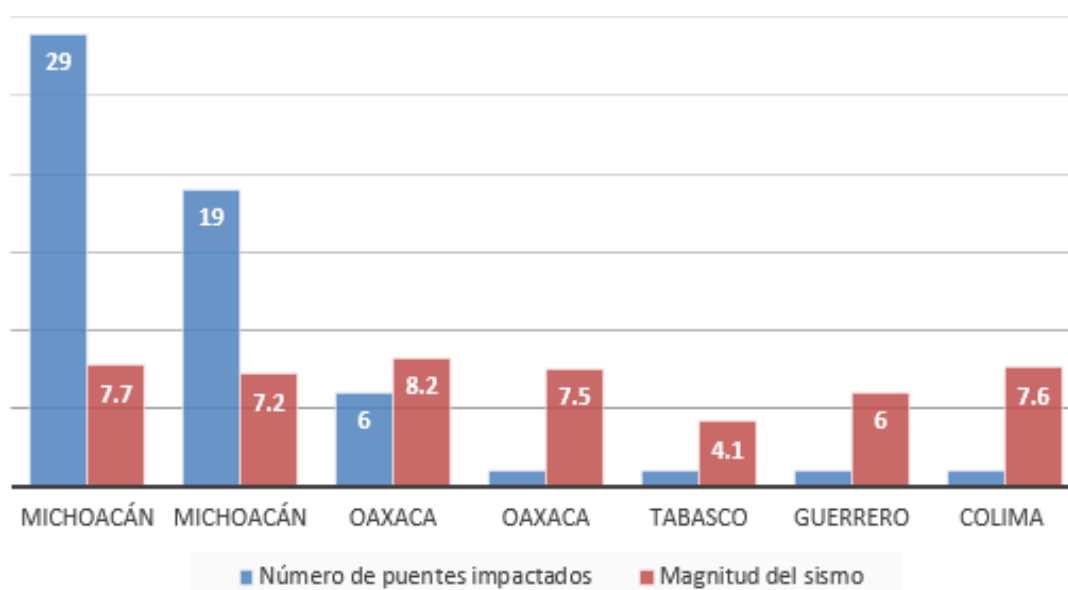
Tabla 3.2 Registro de Declaratorias de desastre por sismo

Entidad	Datos del evento		Impacto	
	Año	Tipo	Localidades afectadas	Sectores afectados
Oaxaca	2020	Sismo de magnitud 5.3	2	Educativo, Vial Urbano y Vivienda
Oaxaca	2020	Sismo magnitud 7.4	157	Carretero, Educativo, Hidráulico, Monumentos Arqueológicos, Naval, Salud, Turístico, Vial Urbano y Vivienda
Guerrero	2021	Sismo magnitud 7.1	16	Carretero, Educativo, Monumentos Arqueológicos y Naval
Colima	2022	Sismo magnitud 7.7	10	Carretero, Cultura, Deportivo, Educativo, Monumentos Arqueológicos, Artísticos e Históricos, Naval y Salud
Michoacán	2022	Sismo magnitud 7.7	5	Carretero, Educativo, Hidráulico, Monumentos Arqueológicos, Artísticos e Históricos, Naval y Salud

Nota: Basada en información de la DGGR (2024).

Fuente: Elaboración propia (2024).

De acuerdo con la información recopilada de la Dirección General de Conservación de Carreteras (DGCC) (2024), se indica que el impacto por sismo de menor magnitud fue de 4.1, mientras que el de mayor magnitud fue de 8.2, de las cuales, las entidades de mayor recurrencia e impacto son Michoacán y Oaxaca. El sismo que se presentó en el estado de Michoacán en el año 2022 fue de magnitud 7.7 y causó daños diversos a elementos estructurales a 29 puentes, y el sismo que incidió en el estado de Oaxaca, aconteció en el año 2017 fue de magnitud 8.2 y causó daños en elementos estructurales de 6 puentes, los impactos de los sismos se muestran en la Gráfica 3.3.



Gráfica 3.3 Entidades con registro de daños en puentes a consecuencia de sismo

Nota: Basada en información del SGCP-DGCC (2024).

Fuente: Elaboración propia (2024).

El daño económico causado los fenómenos hidrometeorológicos, representó una gran parte de las pérdidas en 2023 y lamentablemente se repitió en 2024, aunque aún no se tiene registro oficial de los daños, lo anterior constituye una oportunidad para realizar una revisión exhaustiva de la infraestructura expuesta en las áreas de mayor riesgo y para elaborar planes eficientes que protejan los bienes públicos y privados.

3.3 Cálculo del nivel de riesgo

Para determinar el nivel de riesgo de los puentes, en este subcapítulo se presenta un recuento de los riesgos potenciales identificados en la sección anterior en función del impacto de aquellos con los que se cuenta con información para definir un valor que nos permitirá priorizar los riesgos de acuerdo con su severidad.

Así también se define el riesgo identificado a través del Sistema de Gestión en Puentes (SIPUMEX), ahora denominado Sistema de Gestión de Conservación de Carreteras (SGCC), modulo Puentes de la DGCC cuenta con una base de datos en la que se tiene el inventario de todos los puentes de la red carretera federal libre de peaje, con sus características geométricas y estructurales básicas; su estado físico y los datos de tránsito de los vehículos que soportan, entre otros datos de referencia de los puentes, a través del cual, la DGCC elabora los programas anuales de conservación de puentes, desde 1994 a la fecha.

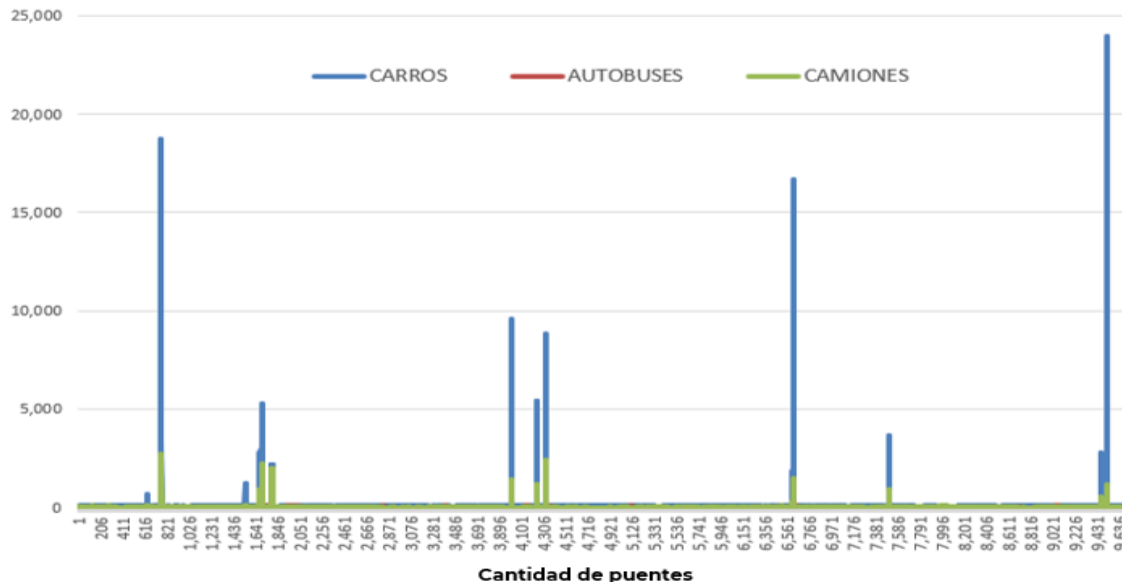
El objetivo del SGCC, módulo Puentes, al igual que SIPUMEX es llevar a cabo, de manera ordenada y metódica, el mantenimiento de los puentes, jerarquizar las necesidades de los proyectos de rehabilitación y de la ejecución de las obras y asegurar que el mantenimiento de los puentes de la red federal se lleve a cabo de manera óptima.

El Sistema de Gestión de Conservación de Carreteras (SGCC) en su Módulo de Puentes clasifica los daños en seis categorías, basándose en la gravedad del daño y la urgencia de atención de esta, conforme a lo siguiente:

- 0.** Estructuras recientes: Puentes nuevos, recién contruidos, reconstruidos o reparados sin problemas de ninguna índole.
- 1.** Puentes en buen estado: A pesar de tener determinada antigüedad, no presentan problemas de ninguna índole y por consiguiente no requieren atención.
- 2.** Estructuras con problemas menores: Aquellas que requieren ser incluidas en la planeación o programa de conservación para su atención en un plazo de atención definido, pero no urgente.
- 3.** Daño significativo: Requiere reparación necesaria a largo plazo, generalmente se realiza en un lapso de 3 a 5 años, de acuerdo con la asignación de recurso y programación.
- 4.** Daños importantes: Requieren reparación a mediano plazo en un lapso de 1 a 2 años.
- 5.** Daño extremo: Requiere atención en un plazo inmediato o no mayor al año siguiente.

Con base la información de capacidad de carga residual y de que tránsito diario promedio anual de vehículos (TDPA) que la DGCC tenga registrada en la base de datos del SGCC, como se muestra en las Gráficas 3.4 y 3.5 respectivamente, y utilizando los parámetros de calificación de los puentes, la DGCC obtiene un listado preliminar de puentes para atender en orden de prioridad, el cual da origen al programa de conservación de puentes del año en que se realiza la jerarquización en función de los recursos disponibles.

En la gráfica 3.4 se muestra que automóvil, es el vehículo que más transita por los puentes y las zonas más transitadas son Zacatecas, San Luis Potosí y Coahuila.

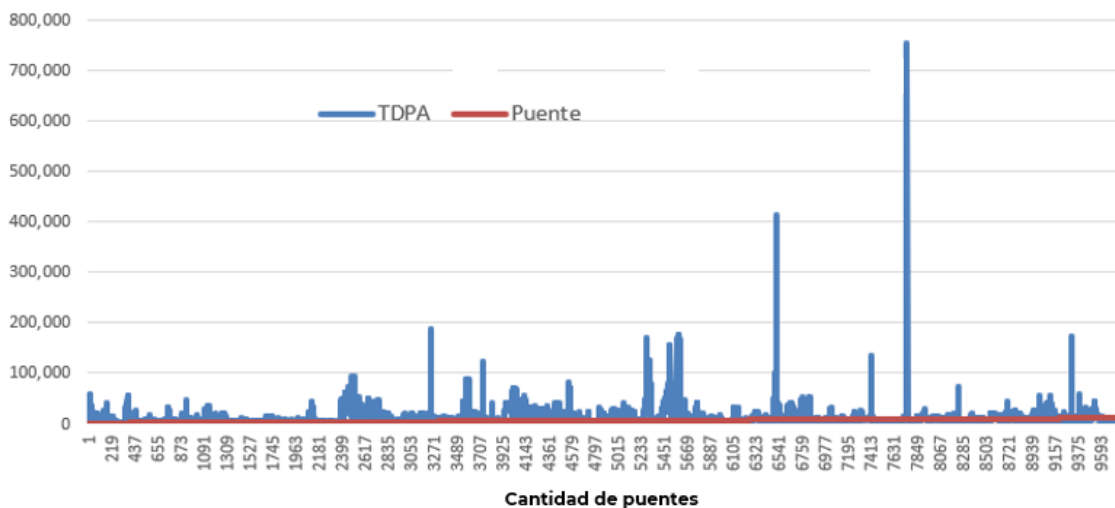


Gráfica 3.4 Volumen de tráfico que transita por los puentes del SCCG

Nota: Basada en información del SGCP-DGCC (2024).

Fuente: Elaboración propia (2024).

En la Gráfica 3.5 se muestra que el Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) de vehículos presenta los mayores rangos en los puentes ubicados en los estados de Tabasco, San Luis Potosí, Hidalgo, Zacatecas, Nuevo León y Oaxaca.



Gráfica 3.5 Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) por puente

Nota: Basada en información del SGCP-DGCC (2024).

Fuente: Elaboración propia (2024).

Con base a la calificación asignada a los puentes inspeccionados, registrados en el Sistema de Gestión en el rubro de Puentes de la Dirección General de Conservación de Carreteras (DGCC), en la Tabla 3.3 se muestra el nivel de riesgo clasificado de acuerdo con la calificación asignada al puente en general, es decir, de acuerdo al estado físico del puente ante la inspección realizada en el año 2023, de acuerdo con las características que presenta la superestructura, subestructura, sus apoyos, su superficie, entre otras características de sus elementos estructurales.

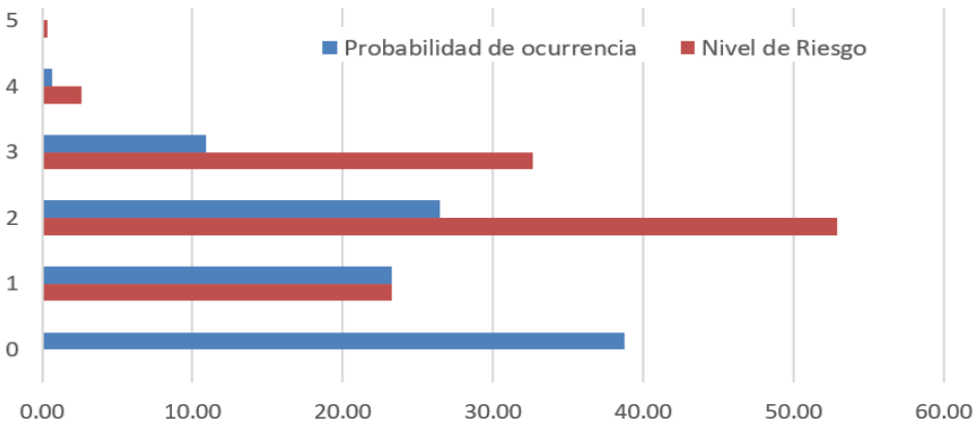
Tabla 3.3 Nivel de riesgo de los puentes de acuerdo con su clasificación del SGCC

Impacto (Nivel de daño)	Probabilidad de ocurrencia	Nivel de Riesgo
5	0.06	0.31
4	0.64	2.57
3	10.89	32.68
2	26.46	52.92
1	23.22	23.22
0	38.72	0.00

Nota: Basada en información del SGCP-DGCC (2024).

Fuente: Elaboración propia (2024).

Para ello, se define una prioridad de inspección de los puentes dañados en función de la calificación del SGCC, módulo Puentes, como sigue, 0 y 1 prioridad baja, 2 y 3 prioridad media y 5 prioridad alta. Con base en estos resultados, se la DGCC elabora el Plan Nacional de Evaluación de Puentes, el cual permite programar las inspecciones detalladas de los puentes de con prioridad alta. En la Gráfica 3.6, podemos observar que el nivel de riesgo de mayor probabilidad se encuentra en los puentes clasificados en el rango 2, en prioridad media de las estructuras que requieren ser incluidas en el programa de conservación para su atención.

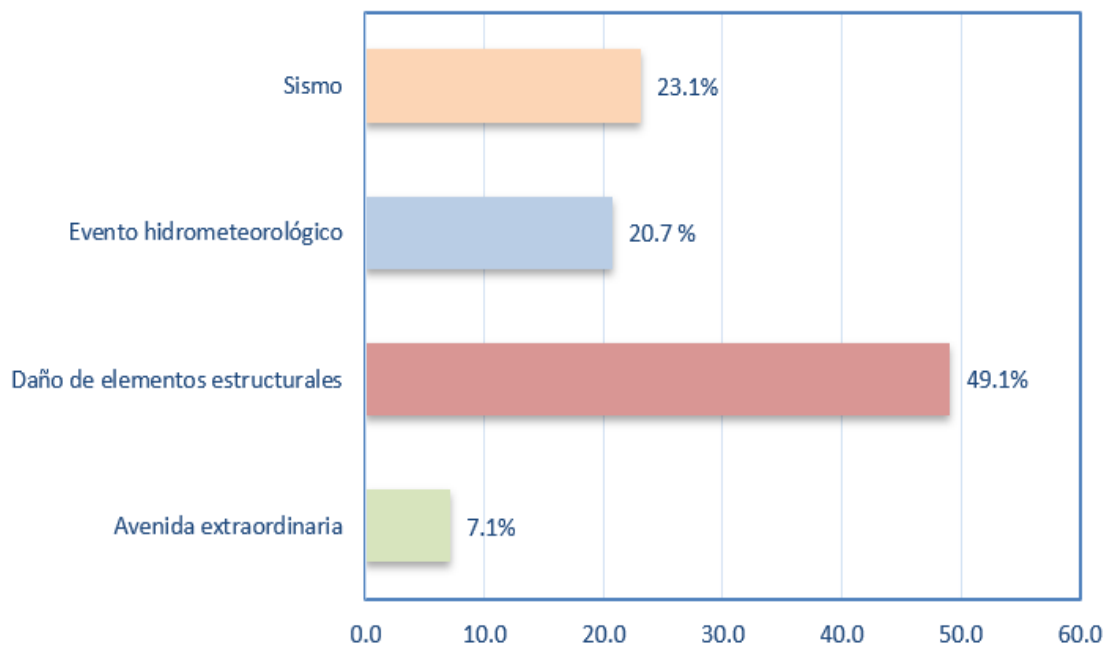


Gráfica 3.6 Entidades con registro de daños en puentes a consecuencia de sismo

Nota: Basada en información del SGCP-DGCC (2024).

Fuente: Elaboración propia (2024).

Con la información recabada, se realizó una análisis que permitió identificar de manera efectiva los riesgos potenciales y la probabilidad de ocurrencia de cada uno de ellos, la acción que se realizó fue relacionar los eventos de desastres asociados a los eventos de daños sufridos por los puentes registrados en el Sistema de Gestión de Conservación de Carreteras (SGCC) con los clasificados por la DGCC (2024) como puentes con daño por socavación, que constituye un total de 130 puentes, así como los clasificados como puentes con daño por sismo, constituido por 39 registros, y en función de ello, se discretizaron los elementos que sufrieron daño y sus causas, de esta manera se obtuvo, como se muestra en la Gráfica 3.7, que de los puentes identificados con daños, el 49.1% estuvo expuesto a riesgos por daño en elementos estructurales, principalmente a consecuencia de corrosión o fatiga, el 23.1% estuvo expuesto a riesgos por eventos sísmicos, el 20.7% presentó daños por exposición a los riesgos de eventos hidrometeorológicos y el 7.1% sufrió daños por exposición a riesgos por avenidas extraordinarias.



Gráfica 3.7 Porcentaje de exposición a riesgos potenciales por tipo

Nota: Basada en información del SGCC de la DGCC (2024).

Fuente: Elaboración propia (2024).

El SGCC en la programación de las inspecciones de los puentes tiene una enorme utilidad para la conservación de puentes, ya que dará pie a la identificación de los riesgos a los que se encuentra expuesto un puente y sus indicadores de resiliencia que les permitirán mitigar su degradación, prevenir un colapso e incluso prever y generar acciones para contrarrestar el efecto del medio ambiente a la estructura.

3.4 Definición de indicadores de riesgo y resiliencia

Los indicadores que definimos en este rubro, son métricas específicas, cuya característica principal es que deben permitir el monitoreo de los riesgos identificados y contener las características definidas previamente; ser relevantes, medibles, comparables, etcétera, de tal manera que de ellos se pueda obtener información útil de las características de los eventos que impactan a los puentes y que afectan su correcto funcionamiento y que contemplen acciones de actuación inmediata ante cualquier eventualidad, tal que no limite su funcionamiento y afecte al entorno social y económico del lugar donde el puente se encuentre ubicado. De acuerdo con lo anterior, los indicadores de riesgo se clasifican de acuerdo con el estado físico del puente en general considerando la calificación emitida por la DGCC basada en la inspección del puente, mientras que los indicadores de resiliencia son definidos de acuerdo con los elementos con los cuenta con información que evidencian la capacidad del puente para reaccionar y accionar ante un evento catastrófico, por lo tanto, en las tablas siguientes se definen dichos indicadores.

Con base en el informe de riesgo generado por BBVA Research (2024) con datos del año 2023 y evaluando los datos recopilados de la DGCC, en la Tabla 3.4. se definen los indicadores de riesgo.

Tabla 3.4 Indicadores de riesgo de los puentes

Indicador	Objetivo	Fuente de información
Riesgos hidrometeorológicos	Presencia de riesgos causados a consecuencia de huracanes, lluvias torrenciales, inundaciones, avenidas extraordinarias.	DGCC, CENAPRED
Riesgos geológicos	Presencia de riesgos causados a consecuencia de sismos, erosión, deslizamientos de tierra.	DGCC, CENAPRED
Condición estructural	Evaluación del estado físico del puente, incluyendo desgaste, corrosión, y daños visibles.	DGCC
Carga y tráfico	Análisis del volumen y tipo de tráfico que soporta el puente, así como su capacidad de carga. (TDPA)	DGCC
Materiales de construcción	Calidad y durabilidad de los materiales utilizados en la construcción del puente.	DGCC
Factores ambientales	Impacto de condiciones climáticas, como lluvias intensas, vientos fuertes, y cambios de temperatura.	SGCC-DGCC
Mantenimiento y reparaciones	Historial de mantenimiento y reparaciones realizadas, así como la frecuencia de inspecciones.	SGCC-DGCC
Diseño y construcción	Evaluación del diseño original y la calidad de la construcción, incluyendo posibles errores o deficiencias.	SGCC-DGCC

Nota: Basada en información de BBVA Research (2024) y del SGCC-DGCC (2024).

Fuente: Elaboración propia (2024).

En la Tabla 3.5 se describen los indicadores de resiliencia de los puentes identificados de la recopilación de información considerando que son las métricas de la capacidad del puente para resistir y recuperarse de eventos disruptivos.

Tabla 3.5 Indicadores de resiliencia de los puentes

Indicador	Objetivo	Referencia
Capacidad de carga residual	La habilidad del puente para mantener su funcionalidad después de un evento extremo, como un terremoto o una inundación.	DGCC-IMT
Redundancia estructural	La presencia de elementos adicionales que permitan que el puente siga funcionando incluso si una parte de él falla.	SGCC-DGCC-IMT
Flexibilidad y adaptabilidad	La capacidad del puente para adaptarse a cambios en las condiciones ambientales y de carga sin sufrir daños significativos.	SGCC-DGCC-IMT
Durabilidad de los materiales	Uso de materiales que resistan la corrosión, el desgaste y otros factores ambientales adversos.	SGCC-DGCC-IMT
Sistemas de monitoreo en tiempo real	Implementación de tecnologías que permitan la detección temprana de daños y la evaluación continua del estado del puente	SGCC-DGCC-IMT
Planes de mantenimiento y rehabilitación	Estrategias bien definidas para el mantenimiento regular y la rehabilitación rápida ante eventos disruptivos	DGCC

Nota: Basada en información del SGCC de la DGCC (2024).

Fuente: Elaboración propia (2024).

Estos indicadores de resiliencia permiten tomar decisiones informadas sobre el mantenimiento, rehabilitación o reemplazo de los puentes, influyendo en la estrategia de planeación y la elaboración del programa de conservación de puentes que desarrolla la DGCC.

3.5 Determinación, monitoreo y seguimiento

Una vez definidos los indicadores, deben ser monitoreados regularmente para detectar cambios en el nivel de riesgo y resiliencia, mediante una serie de evaluaciones y análisis técnicos que permite tomar medidas preventivas o correctivas y de conservación en los puentes.

Para la determinación de la capacidad de carga residual, el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) desarrolla metodologías para evaluar la confiabilidad y el riesgo en puentes, utilizando modelos numéricos y simulaciones para analizar la integridad estructural, estas se desglosan en la Tabla 3.6. Estos estudios suelen considerar factores como el deterioro por fatiga, las cargas vehiculares, y las condiciones ambientales para determinar la capacidad de carga residual de los puentes aplicando técnicas como la simulación Monte Carlo para evaluar la probabilidad de fallos estructurales y la confiabilidad de los puentes. (Samoaya et al., 2006)

Tabla 3.6 Metodología de determinación de la capacidad de carga residual

Metodología	Monitoreo y seguimiento
Inspección visual y evaluación de daños	Se realiza una inspección detallada para identificar daños visibles, como grietas, corrosión, y deformaciones en los elementos estructurales
Pruebas de carga	Se aplican cargas controladas y predeterminadas al puente para observar su comportamiento y medir su respuesta elástica para evaluar su comportamiento en condiciones de carga específicas
Análisis estructural	Utilizando modelos computacionales, se simulan diferentes escenarios de carga y se evalúa la capacidad del puente para soportar estas cargas sin fallar. Este análisis incluye tanto cargas estáticas como dinámicas
Evaluación de materiales	Se analizan las propiedades de los materiales utilizados en la construcción del puente, como el hormigón y el acero, para determinar su resistencia actual y cualquier deterioro que haya ocurrido con el tiempo.
Monitoreo en tiempo real	En algunos casos, se instalan sensores para monitorear continuamente el estado del puente y detectar cualquier cambio en su comportamiento estructural
Normas y Regulaciones	Se comparan los resultados de las evaluaciones con las normas y regulaciones vigentes para determinar si el puente cumple con los requisitos de seguridad y capacidad de carga

Nota: Basado en Samoaya et al., (2006).

Fuente: Elaboración propia (2024).

Para determinar la redundancia estructural, se realiza un análisis detallado que evalúa la capacidad del puente para soportar cargas adicionales en caso de fallo de uno o más de sus elementos, para que pueda seguir funcionando de manera segura aún en situaciones adversas, ver Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Metodología de determinación de la redundancia estructural

Metodología	Monitoreo y seguimiento
Análisis de hiperestaticidad	Se evalúa el grado de hiperestaticidad del puente, que indica cuántos elementos adicionales existen más allá de los necesarios para mantener el equilibrio estructural. Esto se calcula mediante fórmulas específicas para estructuras en dos y tres dimensiones.
Modelado y simulación	Se utilizan programas de software avanzados, como el Método de Elementos Finitos (FEM), para crear modelos detallados del puente y simular diferentes escenarios de carga y fallo. Esto permite observar cómo se redistribuyen las cargas en caso de fallo de un componente
Análisis modal	Este método descompone la respuesta dinámica del puente en diferentes modos de vibración, evaluando cómo las cargas dinámicas, como terremotos o vientos fuertes, se distribuyen y absorben por varios elementos de la estructura
Pruebas de carga y monitoreo	Se realizan pruebas de carga controladas y se instalan sensores para monitorear el comportamiento del puente en tiempo real. Esto ayuda a identificar posibles puntos débiles y evaluar la capacidad del puente para redistribuir cargas sin colapsar
Evaluación de la integridad estructural	Se combinan técnicas de integridad estructural y redundancia para analizar la seguridad del puente en presencia de defectos o daños. Esto incluye la evaluación de la capacidad de los materiales y la estructura para soportar cargas adicionales

Nota: Basado en Díaz (2024)

Fuente: Elaboración propia (2024)

El Instituto Mexicano del Transporte (IMT) realiza el monitoreo y evaluación de la integridad estructural de los puentes en el país, generando datos mediante sistemas de monitoreo remoto y tecnologías avanzadas de comunicación satelital, sensores de fibra óptica y ultrasonido para la evaluación de la redundancia estructural y la capacidad para soportar fallos en sus componentes en algunos puentes, como el puente del Río Papaloapan y el puente Baluarte Bicentenario. (Quintana et al., 2021)

La flexibilidad y adaptabilidad de un puente se determina mediante varios métodos y tecnologías para garantizar que los puentes sean seguros y capaces de adaptarse a condiciones cambiantes y eventos extremos, especialmente en respuesta al cambio climático, su metodología se define en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8 Metodología de determinación de la flexibilidad y adaptabilidad

Metodología	Monitoreo y seguimiento
Diseño Estructural	Se incorporan elementos como aisladores sísmicos, amortiguadores y juntas de dilatación en el diseño del puente. Estos componentes permiten que el puente se mueva y absorba energía durante eventos como terremotos, sin sufrir daños significativos
Materiales Avanzados	Se utilizan materiales innovadores como el hormigón de alto rendimiento y las aleaciones de titanio, que ofrecen mayor resistencia y durabilidad frente a condiciones ambientales extremas
Modelado y Simulación	Se emplean programas de software avanzados para simular diferentes escenarios de carga y condiciones ambientales. Esto ayuda a evaluar cómo el puente puede adaptarse a cambios en su entorno y a cargas dinámicas
Monitoreo en Tiempo Real	Se instalan sensores y sistemas de monitoreo que proporcionan datos en tiempo real sobre el comportamiento del puente. Esto permite detectar y responder rápidamente a cualquier cambio o daño potencial
Pruebas de Carga y Flexibilidad	Se realizan pruebas de carga controladas para evaluar la capacidad del puente para soportar diferentes tipos de cargas sin perder su integridad estructural.
Planes de Contingencia y Mantenimiento	Se desarrollan planes de contingencia y estrategias de mantenimiento que aseguran que el puente pueda adaptarse y recuperarse rápidamente después de eventos adversos

Fuente: Elaboración propia (2024).

La Comisión Europea (H2020 CORDIS) (2024) a través de proyectos financiados por la propia Unión Europea, como el TimePresCompBridge, desarrollan y publican investigaciones sobre nuevos métodos de diseño y adaptación de nuevos materiales y tecnologías en puentes para mejorar dichos aspectos. Se han desarrollado diseños estructurales que incorporan elementos como aisladores sísmicos y sistemas de alerta temprana, así como materiales avanzados y técnicas de monitoreo en tiempo real para asegurar que los puentes sean resilientes.

La durabilidad de los materiales se monitorea utilizando una combinación de tecnologías y métodos de inspección para asegurar que los puentes puedan ser evaluados de manera efectiva, garantizando su seguridad y longevidad, su metodología se muestra en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9 Metodología de determinación de la durabilidad de los materiales

Metodología	Monitoreo y seguimiento
Sensores Integrados	Se instalan sensores en los materiales de construcción del puente para medir factores como la tensión, la compresión, la vibración, la temperatura y la humedad. Estos sensores proporcionan datos en tiempo real sobre el comportamiento y la salud estructural del puente
Internet de las Cosas (IoT)	Los sensores conectados a través de IoT permiten la recopilación y análisis continuo de datos. Esto facilita la detección temprana de daños y el monitoreo constante de la integridad estructural
Inspección Visual y Drones	Las inspecciones visuales periódicas, complementadas con el uso de drones, permiten identificar daños visibles y áreas de deterioro que requieren atención inmediata
Análisis Predictivo	Utilizando los datos recopilados por los sensores, se aplican técnicas de análisis predictivo para anticipar posibles fallos estructurales y planificar el mantenimiento preventivo
Materiales Avanzados	Se emplean materiales de alta durabilidad, como hormigón de alto rendimiento y aleaciones resistentes a la corrosión, que son monitoreados para evaluar su desempeño a lo largo del tiempo
Sistemas de Monitoreo Distribuido	Estos sistemas permiten la instalación de una red de sensores a lo largo de la estructura del puente, proporcionando una cobertura detallada y continua para la detección de deformaciones y tensiones

Fuente: Elaboración propia (2024).

Los sistemas de monitoreo en tiempo real mejoran significativamente la seguridad y la durabilidad de los puentes, permitiendo una gestión más eficiente y proactiva de la infraestructura mediante la utilización de tecnologías para observar y analizar continuamente el estado estructural del puente y sus componentes. Dichos componentes y su funcionamiento se desglosan en la Tabla 3.10a y 3.10b, respectivamente.

Tabla 3.10a Componentes del sistema de monitoreo de puentes en tiempo real

Componente	Función
Sensores Integrados	Se instalan diversos tipos de sensores en el puente, como sensores de fibra óptica, acelerómetros, y medidores de deformación. Estos sensores recopilan datos sobre vibraciones, tensiones, temperatura, humedad y otros factores relevantes (BibLus, 2024)
Internet de las Cosas (IoT)	Los sensores están conectados a través de redes IoT, lo que permite la transmisión de datos en tiempo real a una plataforma centralizada. Esto facilita la recopilación y el análisis continuo de la información
Plataformas de Gestión de Datos	Los datos recopilados por los sensores se envían a plataformas de gestión de datos, donde se almacenan y procesan. Estas plataformas utilizan algoritmos avanzados y análisis predictivo para identificar patrones y posibles problemas estructurales (Bentley Systems, 2024)

Fuente: Elaboración propia (2024).

Tabla 3.10b Componentes del sistema de monitoreo de puentes en tiempo real

Componente	Función
Gemelos Digitales	Se crean modelos digitales del puente que replican su comportamiento en tiempo real. Estos gemelos digitales permiten simular diferentes escenarios y evaluar cómo respondería el puente a diversas condiciones y cargas (Bentley Systems, 2024)
Alertas y Notificaciones	El sistema puede generar alertas automáticas si se detectan anomalías o condiciones que podrían comprometer la seguridad del puente. Estas alertas se envían a los ingenieros y responsables de mantenimiento para que puedan tomar acciones inmediatas (IMT, 2016)
Inspección y Mantenimiento Proactivos	Con la información en tiempo real obtenida, se pueden planificar y ejecutar intervenciones de mantenimiento de manera más eficiente, abordando problemas antes de que se conviertan en fallos críticos (BibLus, 2024)

Fuente: Elaboración propia (2024).

Un ejemplo de aplicación del sistema de monitoreo en tiempo real se muestra en la Figura 3.6.


Figura 3.6 Monitoreo de puentes con una plataforma BIM IoT

Fuente: BibLus editorial Team (2024).

Los planes de mantenimiento y rehabilitación de puentes se realizan siguiendo un enfoque estructurado y basado en datos generados a partir de las metodologías empleadas para la determinación de cada indicador de riesgo y resiliencia, ver Tabla. 3.11.

Tabla 3.11 Metodología para la definición de un plan de mantenimiento y rehabilitación

Metodología	Función/Alcance
Inspección y Evaluación Inicial	Se llevan a cabo inspecciones visuales y técnicas para evaluar el estado actual del puente. Esto incluye la identificación de daños visibles, como grietas, corrosión y deformaciones
Inventario y Monitoreo	Se utiliza el Sistema de Puentes en México (SIPUMEX) para mantener un inventario digital de todos los puentes y coordinar las inspecciones. Este sistema ayuda a priorizar las necesidades de mantenimiento y reparación.
Análisis de Datos	Los datos recopilados durante las inspecciones se analizan para determinar la gravedad de los daños y las necesidades de intervención. Esto incluye el uso de tecnologías avanzadas como sensores y sistemas de monitoreo en tiempo real
Planificación de Intervenciones	Basado en el análisis de datos, se desarrollan planes detallados de mantenimiento y rehabilitación. Estos planes incluyen cronogramas de trabajo, asignación de recursos y estrategias específicas para abordar los problemas identificados
Ejecución de Trabajos	Se llevan a cabo las reparaciones y el mantenimiento necesario, que pueden incluir la reparación de elementos estructurales, la aplicación de tratamientos anticorrosión y la sustitución de componentes dañados
Monitoreo Continuo	Después de las intervenciones, se implementan sistemas de monitoreo continuo para asegurar que el puente mantenga su integridad estructural y para detectar cualquier nuevo problema a tiempo
Revisión y Actualización	Los planes de mantenimiento y rehabilitación se revisan y actualizan periódicamente para incorporar nuevas tecnologías y métodos, así como para adaptarse a cambios en las condiciones del puente y su entorno.

Fuente: Elaboración propia (2024).

Las metodologías presentadas en aseguran que los puentes se mantengan en buen estado y puedan seguir operando de manera segura y eficiente y que mediante su monitoreo e inspección se realicen detecciones preventivas ante la acción de eventos extraordinarios naturales o antrópicos.

4. Evaluación del impacto

Definir los indicadores de riesgo, es imperativo dimensionar el impacto de los daños ocurridos a un puente que ha sido expuesto a un fenómeno de desastre natural o antrópico y asegurar su seguridad y durabilidad.

En México, más del 50% de los puentes tienen más de 30 años y el 21% requiere mantenimiento a corto o mediano plazo. (Carrión et al., 2021) Dado que nuestro país es una zona sísmica, el análisis de la respuesta sísmica de los puentes es indispensable para definir la dirección transversal de la estructura, que es la más sensible ante la acción de un sismo. La evaluación del impacto de riesgo es un paso fundamental en la gestión de riesgos que consiste en determinar las consecuencias potenciales de un evento adverso en términos de pérdidas financieras, daños materiales, lesiones o interrupciones operativas, para ello se identifica la metodología definida en Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Metodología de evaluación de impacto de riesgo

Metodología	Función/Alcance
Identificación de escenarios de riesgo	Identificar los posibles eventos adversos que podrían afectar tu organización o proyecto
Cuantificación financiera	Estima las pérdidas económicas directas e indirectas asociadas con cada escenario de riesgo, incluyendo costos de reparación, pérdida de ingresos, gastos legales, etc.
Impacto en la seguridad y salud	Evalúa las posibles lesiones o pérdidas de vidas humanas.
Impacto en la continuidad de operación	Analiza cómo el riesgo podría afectar la operación normal y la capacidad de cumplir con los objetivos o responder ante
Priorización de escenarios	Clasifica los escenarios según su gravedad y probabilidad para enfocar los recursos en los más críticos.

Nota: Basada en información de Asociación Mundial de la Carretera [PIARC] (2023).

Fuente: Elaboración propia (2024).

Para determinar la confiabilidad de la estructura y analizar los riesgos a los que está expuesta, se utilizan metodologías probabilísticas para evaluar la integridad estructural de los puentes y analizar las incertidumbres en las cargas y propiedades del material que los compone. Así mismo, las normativas y criterios de diseño, como la NOM-037-SCT2-2020 y la NOM-008-SCT2-2020, establecen los criterios para el diseño y mantenimiento de puentes.

Los costos de rehabilitación de puentes pueden variar significativamente dependiendo de las características geométricas del puente, el tipo de materiales que los constituye, el alcance de los daños, su ubicación, según las especificaciones del proyecto o las condiciones locales. Para obtener una estimación más precisa, es recomendable realizar un análisis detallado del proyecto específico y consultar con expertos en ingeniería y construcción.

El impacto económico de una rehabilitación, que destaco debido a que es el factor de mayor impacto debido a la recurrencia en el riesgo de fenómenos hidrometeorológicos y geológicos, se desglosa en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Determinación del impacto económico

Actividad/Insumo	Impacto	Monto Económico
Materiales y Mano de Obra	Los costos de materiales como el cemento y el concreto premezclado para una obra de rehabilitación de un puente vehicular	Aproximadamente 14.5 millones de pesos
Transporte y Logística	Los costos de acarreos y fletes para una ampliación o rehabilitación de una carretera	Promediar alrededor de 36.6 millones de pesos
Inspección y Supervisión	Representan un costo menor en comparación con los materiales y la mano de obra	Una parte del costo total
Inflación y Variaciones de Precios	Los precios de los materiales de construcción pueden aumentar los costos de construcción de carreteras y puentes.	Incremento de aproximadamente 11.88% en comparación con el año 2023.

Nota: Basada en Obras por expansión (2024).

Fuente: Elaboración propia (2024).

Otro tipo de impacto económico es el que representan los desastres naturales. En 2010, los huracanes Alex, Karl y Matthew afectaron fuertemente a México, ocasionando una inversión para la recuperación de 92 300 millones de pesos y en 2017, los sismos del 7 y 19 de septiembre afectaron a la población y a la infraestructura con más de 88 400 millones de pesos en daños y pérdidas, así como el huracán Otis, el cual causó daños calculados en 88 910 millones de pesos.

En la Figura 4.1 se presenta la evolución del valor de los desastres a precios corrientes para el periodo 2000-2023, observando lo antes expuesto, que 2010 y 2017 han sido los años más costosos para el país en materia de desastres. (CENAPRED, 2024)

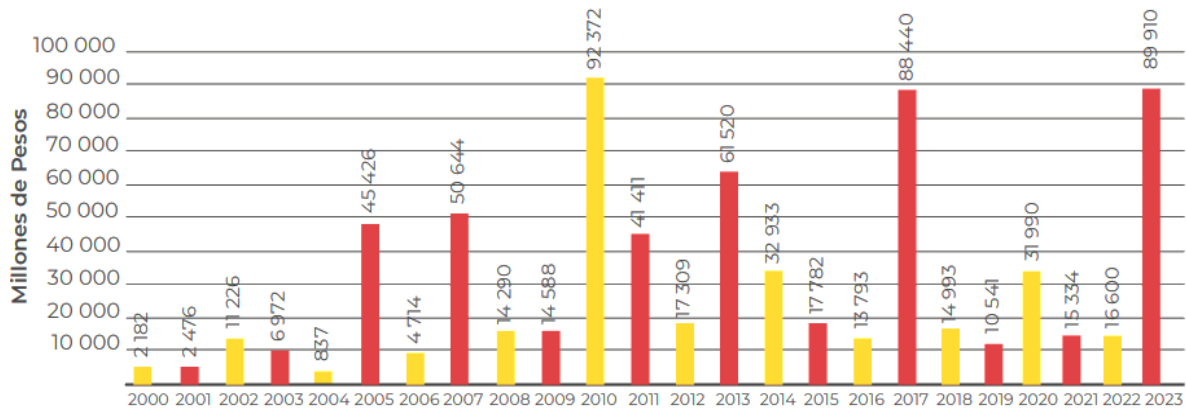


Figura 4.1 Evolución de los costos de los desastres en MÉXICO 2000-2023

Fuente: CENAPRED (2024).

Adicionalmente, no se puede dejar de lado el impacto en pérdidas humanas derivado de desastres. El registro emitido por CENAPRED (2024), mostrado en la Figura 4.2., indica que, durante el año 2023 se confirmaron 984 defunciones, de las cuales 514, que representa el 52.2 %, fueron relacionadas con desastres consecuentes de fenómenos hidrometeorológicos y 339 defunciones, es decir el 34.5 %, se registraron como consecuentes de eventos de origen socio organizativo.

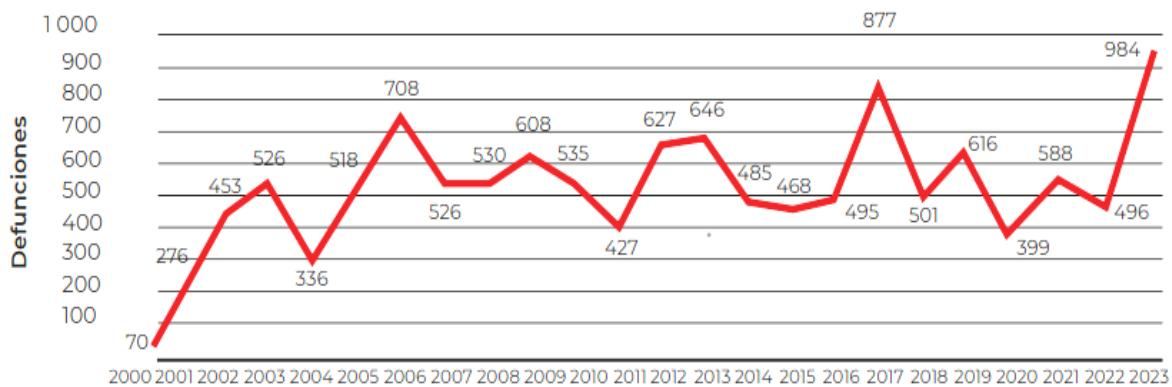


Figura 4.2 Defunciones totales causadas por desastres naturales y antrópicos

Fuente: CENAPRED (2024).

La priorización de puentes en México se realiza mediante un enfoque estructurado que desarrolla la DGCC, ver Tabla 4.3, y que considera criterios como la condición estructural, la intensidad de tráfico, la importancia estratégica la edad y diseño del puente, los factores ambientales de su entorno, así como el costo y los recursos disponibles para su mantenimiento y conservación, estos criterios se combinan para crear un plan de conservación que incluya la rehabilitación e incluso, de ser necesario la reconstrucción del puente, de manera tal que se garantice la seguridad y funcionalidad de la red.

Tabla 4.3 Enfoque de priorización de puentes

Aspecto	Objetivo
Condición estructural	Se evalúa el estado actual del puente a través de inspecciones visuales y técnicas avanzadas, como el monitoreo de salud estructural (SHM). Los puentes con daños significativos o deterioro avanzado se priorizan para rehabilitación
Intensidad del tráfico	Los puentes que soportan un alto volumen de tráfico vehicular y peatonal reciben mayor prioridad, ya que su falla tendría un impacto significativo en la movilidad y la seguridad pública
Importancia estratégica	Se considera la importancia del puente dentro de la red de transporte. Los puentes que conectan rutas críticas o que no tienen rutas alternativas viables son priorizados
Edad y diseño del puente	Los puentes más antiguos o aquellos construidos con diseños obsoletos pueden necesitar rehabilitación antes que los más nuevos o aquellos construidos con técnicas modernas
Factores ambientales	Se evalúan los riesgos ambientales, como la actividad sísmica, la socavación y las condiciones hidrológicas. Los puentes en áreas con alto riesgo de desastres naturales pueden recibir prioridad
Costos y recursos disponibles	La disponibilidad de fondos y recursos también influye en la priorización. Se busca optimizar el uso de los recursos disponibles para maximizar el impacto positivo en la red de puentes
Monitoreo continuo y datos Históricos	El uso de tecnologías de monitoreo en tiempo real y el análisis de datos históricos ayudan a identificar tendencias y predecir fallos, lo que permite una priorización más precisa y basada en datos.

Fuente: Ribes, Fernández y Maldonado (2022).

El aspecto de la evaluación del impacto ambiental de los puentes no es menos importante, ya que se debe evaluar el impacto a los ecosistemas, la generación de residuos, las emisiones atmosféricas el consumo de recursos, el cambio climático al tiempo que se realiza la evaluación del ciclo de vida del puente, desde su construcción hasta su desmantelamiento, con un enfoque integral y sostenible para ser abordados de manera efectiva.

La construcción de puentes genera una gran cantidad de residuos, incluyendo escombros y materiales de construcción, así como el uso de maquinaria pesada contribuyen a las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos, los cuales deben ser gestionados adecuadamente para minimizar su impacto ambiental.

Adicionalmente, construir un puente requiere una gran cantidad de recursos naturales, como agua y materiales de construcción, y su operación puede afectar negativamente a los ecosistemas locales, alterando hábitats y contaminando cuerpos de agua o generar otro tipo de daño al medio ambiente.

El cambio climático genera el aumento de la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos, que deben ser considerados en las evaluaciones de impacto ambiental y un riesgo potencial para la resistencia y resiliencia de los puentes.

Cabe destacar que la evaluación del impacto de riesgo es un proceso iterativo y debe actualizarse regularmente.

5. Definición del modelo de evaluación de la resiliencia de puentes

El modelo de evaluación de la resiliencia de puentes se debe centrar en la capacidad de estas estructuras para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de eventos adversos, como desastres naturales y cambios climáticos, considerando la evaluación de los riesgos, la implementación de técnicas y materiales que aumenten la robustez, el impacto ambiental que produce la construcción y mantenimiento de los puentes, buscando reducir la huella de carbono y promover prácticas sostenibles, la capacidad de los puentes para soportar eventos extraordinarios, el monitoreo y mantenimiento del estado en que se encuentran los puentes así como realizar el mantenimiento preventivo necesario para asegurar su resiliencia a largo de su vida útil.

Estos elementos ayudan a garantizar que los puentes no solo puedan resistir eventos extremos, sino también recuperarse rápidamente y continuar funcionando de manera segura y eficiente.

Con la finalidad de que el modelo propuesto, pueda ser aplicado al Sistema de Gestión de Conservación de Carreteras (SGCC), en su módulo de Puentes, el modelo que se define está basado en la evaluación mediante la probabilidad de falla. Este modelo originalmente fue implementado por Lounis (2014), concebida la resiliencia como un prerrequisito del desarrollo sustentable a través de una vida útil larga y una probabilidad baja de falla del puente, es decir, a menor riesgo de falla mayor resiliencia y sustentabilidad.

Siendo el cálculo de riesgo de falla un indicador de la resiliencia producto de la probabilidad de falla, por las consecuencias de falla, para la cual la probabilidad total de falla se calcula con la fórmula propuesta por el *Joint Comité on Structural Safety* (JCSS) (2008) cómo se describe a continuación:

$$P_f = \sum_{i=1}^{n_H} p(H_i) \sum_j^{n_D} \sum_{k=1}^{n_s} p(D_j|H_i)p(S_k|D_j) \quad \text{Ecuación 5.1.}$$

Donde:

- H_i representa a cada riesgo,
- n_H es el número de riesgos,

- n_D el número de niveles daño (D),
- n_s número de comportamientos estructurales (S) posterior al daño.

Primero, J. (2020), propone dividir las consecuencias de la falla en categorías que asume como pilares de la sustentabilidad; consecuencias sociales, consecuencias económicas y consecuencias ambientales. Por lo tanto, el riesgo de falla se obtiene multiplicando la probabilidad de falla (P_f) determinada con la ecuación 5.1, por las consecuencias de la falla como se muestra en la ecuación 5.2.

$$R_f = P_f * C_f \quad \text{Ecuación 5.2.}$$

Donde;

- R_f es el riesgo de falla,
- P_f es la probabilidad de falla
- C_f son las consecuencias de la falla.

El criterio para las consecuencias de la falla consiste en que a menor riesgo de falla el puente es más resiliente.

Sin embargo, existe un modelo de evaluación cuantificación física de la resiliencia definido originalmente por Minaie y Moon (2017), quienes conciben la resiliencia como la habilidad de un puente para mantener un nivel de robustez durante y después de un evento extraordinario y de recuperarse en el menor tiempo posible, basado en la severidad del daño provocado por el evento extraordinario.

La resiliencia se expresa como la relación entre el área bajo el comportamiento post disrupción y el área bajo el nivel de comportamiento objetivo para un periodo de control de 365 días expresada matemáticamente como la ecuación 5.3.

$$R = \frac{\int_{t_0}^{t_0+365 \text{ días}} P(t)dt}{\int_{t_0}^{t_0+365 \text{ días}} P(100\%)dt} = 2.74 \times 10^{-5} \times \int_{t_0}^{t_0+365 \text{ días}} P(t)dt \quad \text{Ecuación 5.3.}$$

Donde;

- $P(t)$ es el comportamiento del puente
- $P(100\%)dt$ es el comportamiento del puente al nivel 100% (no interrumpido)
- t_0 es el tiempo de ocurrencia del evento extremo (evento disruptivo) expresado en días.
- 2.74×10^{-5} es una constante.

La aplicación de la ecuación se inicia con la determinación del comportamiento del puente P_R y el tiempo de recuperación t_{rec} después del evento extremo. El comportamiento del puente se define como la robustez del sistema o estructura de puente (P_R), por lo que es el producto del riesgo (H), la vulnerabilidad (V) y un factor de incertidumbre (UF), tal como se define en la ecuación 5.4.

$$P_R = [100\% - \max(9.259 \times H \times V \times UF) \times I] > 0\% \quad \text{Ecuación 5.4.}$$

Donde;

- UF es el factor de incertidumbre
- I es el factor de importancia del puente.
- 9.259 es una constante para poner a P_R , en una escala de 0 - 100%.

Considerando que H es la probabilidad de ocurrencia de un riesgo, en un periodo de tiempo de retorno que depende la naturaleza de este y que la vulnerabilidad V , es la probabilidad de falla ante un riesgo, estos se determinan de forma separada con la Tablas 5.1a y 5.1b, así como 5.2a y 5.2b, respectivamente, haciendo uso de la combinación de valores máximos que representan el peor escenario que se puede presentar en todas las combinaciones de riesgo y vulnerabilidad que pueden causar la interrupción del funcionamiento del puente.

Tabla 5.1a Valores sugeridos de riesgo (H)

Riesgos considerados	Valores de riesgo		
	1	2	3
Socavación; deslaves colisión, licuefacción sísmica asentamiento, inundación	Más allá de un periodo inundable de 500 años	Más allá de un periodo inundable de 100 años	En un periodo inundable de 100 años
	Diseño sísmico categoría A. Probabilidad baja de ocurrencia de un terremoto o licuefacción	Diseño sísmico categoría C. Probabilidad moderada de ocurrencia de un terremoto o licuefacción	Diseño sísmico categoría D, E, F. Probabilidad alta de ocurrencia de un terremoto o licuefacción
	Huracán de riesgo bajo, viento con ráfaga de 3 s, velocidad menor de 145 km/h	Huracán de riesgo moderado, velocidad del viento con ráfaga de 3 s, velocidad mayor a 145 km/h y menor de 210 km/h	Huracán de riesgo alto, velocidad del viento con ráfaga de 3 s, velocidad mayor a 210 km/h
	Sobre un canal no navegable	Sobre un canal navegable para buques de tamaño medio	Sobre un canal navegable para buques de tamaño grande
	Ubicado a más de 800 km de la costa	Ubicado a más de 80 km de la costa	Ubicado a menos de 80 km de la costa
	Sin posibilidad de socavación	En el rating 113 de NBI de 5 o mayor	En el rating 113 de NBI de 4 o menor
	No hay registros de terremotos significativos, inundaciones, marejadas o ciclones	Registros moderados de terremotos, inundaciones, marejadas o ciclones	Deriva y escombros observados en los muelles, antecedentes de flujo polar en canal

Nota: ADTT son las siglas del promedio anual diario de tráfico de camiones.

Fuente: Minaie y Moon (2017).

Tabla 5.1b Valores sugeridos de riesgo (*H*)

Riesgos considerados	Valores de riesgo		
	1	2	3
Sísmico; fatiga, colisión, sobrecarga, incendio	Diseño sísmico categoría A. Probabilidad baja de ocurrencia de daño por sismo	Diseño sísmico categoría C. Probabilidad moderada de ocurrencia de daño por sismo	Diseño sísmico categoría D, E, F. Probabilidad alta de ocurrencia de daño por sismo
	No hay registros significativos de sismos	Registros moderados de sismos	Registros significativos de sismos
	ADTT inferior a 5,000 (baja probabilidad de falla por fatiga)	ADTT inferior a 10,000 (moderada probabilidad de falla por fatiga)	ADTT mayor a 10,000 (alta probabilidad de falla por fatiga)
	No afecta a la carretera	Afecta a la Carretera con ADTT menor a 1,000	Afecta a la Carretera con ADTT con más de 1,000
	Ubicado a más de 32 km de la industria pesada	Ubicado a más de 16 km de la industria pesada	Ubicado a menos de 16 km de la industria pesada
	Sin antecedentes de sobrecargas, colisiones, incendios bajo el puente	Antecedentes de nivel moderado de sobrecargas, colisión, incendio	Antecedentes de nivel alto de sobrecargas, colisión, incendio

Nota: ADTT son las siglas del promedio anual diario de tráfico de camiones.

Fuente: Minaie y Moon (2017).

Tabla 5.2a Valores sugeridos de vulnerabilidad (*V*)

Vulnerabilidades consideradas	Valores de vulnerabilidad		
	1	2	3
Seguridad geo-hidráulica	Fundada sobre cimientos profundos o lecho rocoso	Fundada sobre cimientos poco profundos en un suelo cohesivo	Fundada sobre cimientos poco profundos en un suelo no cohesivo
	No hay evidencia de licuefacción en las proximidades del puente	Evidencia de licuefacción en las proximidades del puente	Evidencia de licuefacción en las proximidades del puente
	Sin antecedentes ni evidencia de socavación o asentamiento	Evidencia de socavación leve durante inspecciones subacuáticas pasadas o presentes	Evidencia de socavación moderada durante inspecciones subacuáticas pasadas o presentes
	Cumple con los estándares actuales de protección contra impactos y socavación de muelles	Sistema de protección del muelle en buen estado	Falta del sistema de protección del muelle o en mal estado
	Superestructura por encima del nivel de inundación de 500 años	Superestructura por encima del nivel de inundación de 100 años, pero por debajo del nivel de alimentos de 500 años	Superestructura por encima del nivel de inundación de 50 años, pero por debajo del nivel de alimentos de 100 años
	Sin inclinación de los elementos de la subestructura	Inclinación menor de los elementos de la subestructura	Inclinación significativa de los elementos de la subestructura

Fuente: Minaie y Moon (2017).

Tabla 5.2b Valores sugeridos de vulnerabilidad (*V*)

Vulnerabilidades consideradas	Valores de vulnerabilidad		
	1	2	3
Seguridad estructural	Cumple con todas las especificaciones de diseño actuales	Es posible que no cumpla con las especificaciones de diseño, pero no afecta la integridad estructural y la capacidad	No cumple con los estándares actuales
	La estructura muestra redundancia bidireccional	Construido con soporte simple con capacidades de distribución transversal	Construido con soporte simple con mínimas capacidades de distribución transversal
	20 años o menos desde la construcción o renovación importante	50 años o menos desde la construcción o renovación importante	50 años o menos desde la construcción o renovación importante
	Detalles de fatiga A y B	Detalles de fatiga C y D	Detalles de fatiga E y E'
	Cojinetes de neopreno	Cojinetes de chapa de acero	Cojinetes de balancín; Dependencia de la fuerza intrínseca; tirantes pretensados expuestos
	Sin evidencia de daño estructural	Evidencia menor de daño estructural sin ruta de carga crítica	Evidencia de daño estructural sin ruta de carga crítica
	Sin antecedente de desplazamientos excesivos, vibraciones, deformaciones, inclinaciones	Antecedente de desplazamientos excesivos, vibraciones, deformaciones, inclinaciones significativas	Antecedente de desplazamientos excesivos, vibraciones, deformaciones, inclinaciones excesivas

Fuente: Minaie y Moon (2017).

La evaluación física de la estructura permite determinar la resiliencia, en función del tipo de inspección que se realice, para lo cual se utiliza el factor de incertidumbre (*UF*), que va del enfoque objetivo (1), al enfoque subjetivo (2), como se muestra en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3 Factores de incertidumbre (*UF*)

Práctica de evaluación del puente	<i>UF</i>
Inspección visual	1.20
Inspección visual y técnicas analíticas	1.10
Inspección visual, técnicas analíticas y técnicas NDE	1.0

Nota: NDE son las siglas de Evaluación no destructiva.

Fuente: Minaie y Moon (2017).

El factor de importancia (*I*) está basado en la importancia del puente en la red carretera, su valor para la comunidad, definido en los factores de la Tabla 5.4.

Para el cálculo de la resiliencia, es necesario el cálculo del tiempo de recuperación (t_{rec}) y el tiempo de control. El tiempo de control se propone sea de un año (365 días).

Tabla 5.4 Factor de importancia del puente (I)

Factor de impacto	Criterio
0.75	• El puente está localizado en rutas locales • El costo del reemplazo es menor al 5% del total del presupuesto de la DGCC • El puente no forma parte de la línea de servicios públicos • El tráfico medio diario es menor a 10,000 • La longitud de desvío es inferior a 3 o el nivel de servicio en la línea de desvío es A ó B
1.00	• El puente está localizado en rutas estatales • El costo de reemplazo es mayor al 5% y menor al 25% del total del presupuesto de la DGCC • El puente transporta líneas de servicios públicos como fibra óptica, líneas de comunicación, de otros servicios públicos de bajo riesgo (colocación) • El tráfico medio diario es superior a 10,000 y menor a 50,000 • La longitud del desvío es de más de 5 km e inferior a 16 km o el nivel de servicio en el desvío es C o D.
1.25	• El puente se encuentra en rutas de evacuación, infraestructura crítica, en la Red de Autopistas Estratégicas o en la red nacional de camiones • Costos de reemplazo más del 25% del presupuesto de la agencia • El puente transporta líneas de servicios públicos como la electricidad, gas, u otro servicio de alto riesgo • El tráfico medio diario es superior a 50,000 • Longitud del desvío de más de 16 km o el nivel de servicio en el desvío es E o F.

Fuente: Minaie y Moon (2017).

El tiempo de recuperación (t_{rec}) de un puente después de un evento extremo está estrechamente relacionado con el área afectada y la severidad del riesgo, ya que estos determinan el acceso a servicios de emergencia y equipos de trabajo de reparación, así como el nivel del daño.

La determinación de la severidad del riesgo está basada diseño sísmico realizado por la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (AASHTO, por sus siglas en inglés, 2007), definida en el coeficiente de aceleración espectral de diseño (S_{DI}), que es el valor ajustado del coeficiente de acuerdo con la ubicación del puente para un periodo de $T_m=1$ s, como se muestra en la Tabla 5.5.

Para los huracanes se usa la escala de viento Saffir-Simpson sugerida por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 2019), que se muestra en la Tabla 5.6, en la cual, el área afectada, puede ser clasificada como aislada cuando un puente o parte de este se ve afectado, local cuando más de un puente de una red es afectado y regional cuando múltiples redes de puentes son afectadas.

Tabla 5.5 Categorías de diseño sísmico AASHTO

Valor de S_{DI}	AASHTO SDC	Nivel de severidad propuesto
$S_{DI} < 0.15$	A	Bajo
$0.15 \leq S_{DI} < 0.30$	B	Moderado
$0.30 \leq S_{DI} < 0.50$	C	Severo
$0.50 \leq S_{DI}$	D	Catastrófico

Fuente: Minaie y Moon (2017).

Tabla 5.6 Escala Saffir-Simpson

Categoría	Velocidad km/h	Tipo de daño debido a los vientos de los huracanes
Huracán 1	119-156	Vientos muy peligrosos que producirán algún daño
Huracán 2	154-177	Vientos extremadamente peligrosos, que causarán daños extensos
Huracán 3	178-208	Se producirá un daño devastador
Huracán 4	209-251	Podría ocurrir un daño catastrófico
Huracán 5	≥ 252	Ocurrirá un daño catastrófico

Fuente: NOAA (2019).

De acuerdo con el National Institute of Standards and Technology (NIST, 2016) el periodo de recuperación de un puente se divide en cuatro fases:

- Fase 1 Evaluación y respuesta, en la que se evalúa la extensión de los daños e inicia la recuperación.
- Fase 2 Restauración mínima a corto plazo, en la que se restaura la funcionalidad del puente al 30%, permitiendo el acceso a equipos de emergencia y de restauración.
- Fase 3 Restauración funcional intermedia, en la que se restaura la funcionalidad del puente al 60%, permitiendo la circulación restringiendo la carga y camiones por la red carretera, el tipo y tamaño de los puentes tienen una gran influencia en el tiempo de restauración de esta fase.
- Fase 4 Restauración operacional a largo plazo, en la que se reestablece la funcionalidad al 100%, el tiempo depende del tipo de daño.

De acuerdo con lo descrito, este modelo es de recuperación continua y lineal, en el que se propone el tiempo de recuperación como una función de los tiempos básicos de restauración y factores de ajuste como se muestra en la ecuación 5.5.

$$t_{rec} = t_{res} \times \alpha_1 \times \alpha_2 \times \alpha_b \quad \text{Ecuación 5.5.}$$

Donde;

- t_{rec} es el tiempo de recuperación.
- t_{res} es el tiempo básico de restauración, conforme a la tabla 5.7.

Tabla 5.7 Tiempos básicos de restauración (t_{res})

Área afectada	Severidad del riesgo			
	Bajo	Moderado	Severo	Catastrófico
Aislada	1 día	2 semanas	6 meses	N/A
Local	3 días	6 meses	9 meses	N/A
Regional	1 semana	9 meses	12 meses	24 meses

Fuente: Minaie y Moon (2017).

- α_1 es un factor de ajuste, conforme a la tabla 5.8, con base en las prácticas de gestión de eventos extremos de la agencia (Freckleton et al., 2012).

Tabla 5.8 Factor de ajuste de eventos extremos (α_1)

Prácticas de gestión de desastres	α_1
Al menos tres de los siguientes criterios:	0.8
• Programas educativos públicos de preparación para eventos extremos programas de pruebas y simulacros;	
• Designación de rutas de evacuación	
• Designación de refugios	
• Planes de gestión de eventos extremos y centros designados	
• Los socorristas están equipados con las herramientas y el equipo necesarios para gestionar las condiciones posteriores a eventos extremos	
• Contratistas de emergencia de guardia para la gestión de incidentes	
• Acceso local a equipos, bienes y materiales por un mínimo	
• Mas de 2 medios de transporte disponibles en un radio de 8 km alrededor del puente	
• Acceso a un número mayor o igual a 20 instalaciones de emergencia (hospital, gasolineras, etc.) en un radio de alrededor de 18 km del puente	
• Gestión de respuesta a emergencias (ERM) Nivel III o superior.	
No cumplir con los requisitos anteriores	1.0

Nota: Los niveles de la Gestión de respuesta a emergencias (ERM) (Freckleton et al., 2012), se definen como;

- Nivel I, los oficiales de policía dirigen el tráfico.
- Nivel II, direccionamiento con señales de tráfico.
- Nivel III, direccionamiento con señales de tráfico dinámicas con temporización y mediciones.
- Nivel IV, cámaras de tráfico y signos de mensajes variables.
- Nivel V, sistemas de transportación inteligente y sistemas de información avanzados de viajeros.

Fuente: Minaie y Moon (2017).

- α_2 es un factor de ajuste basado en los eventos extremos históricos suscitados en el año anterior al evento extremo de análisis, conforme a la tabla 5.9.

Tabla 5.9 Factor de ajuste de eventos extremos históricos (α_2)

Prácticas de contratación	α_2
Sin antecedente de eventos disruptivos	1.0
Antecedente de evento bajo	1.1
Antecedente de evento moderado	1.2
Antecedente de evento severo	1.4
Antecedente de evento catastrófico	1.6

Fuente: Minaie y Moon (2017).

- α_b es un factor de ajuste que depende del tipo de puente, conforme a la tabla 5.10.

Tabla 5.10 Factor de ajuste basado en el tipo de puente (α_b)

Tipo de puente	α_b
Puentes de un solo tramo (mayor a 15 metros), o simplemente apoyados	1.00
Puentes de tamaño medio (tramos mayores a 50 metros), continuamente apoyados o puentes móviles	1.15
Puentes de tramos largos (de 50 a 150 metros)	1.30
Puentes complejos (de longitudes mayores a 150 metros)	1.50

Nota: Categorías de los puentes de Pennsylvania DOT (2015).

Fuente: Minaie y Moon (2017).

5.1 Consideraciones de aplicación

Cada puente es único, y la inspección debe adaptarse a sus características específicas.

La evaluación de la resiliencia de puentes es fundamental para comprender su capacidad de recuperación ante eventos extremos, como terremotos o inundaciones. Para detectar el deterioro temprano en puentes, se utilizan diversas técnicas, las cuales combinadas en sus aspectos técnicos, geotécnicos y probabilísticos permiten comprender el actuar del puente frente a eventos extremos y garantizar la seguridad de la infraestructura y de las personas.

En resumen, algunas de estas técnicas son;

- Análisis de riesgos para identificar y clasificar los riesgos potenciales durante las etapas de construcción y operación del puente incluyendo la evaluación de la probabilidad de ocurrencia y el impacto de eventos como sismos, inundaciones y otros desastres naturales.
- Determinación de curvas de fragilidad para determinar la probabilidad de falla del puente bajo diferentes condiciones de carga y eventos extremos.
- Evaluación del estado actual de la estructura mediante inspecciones y pruebas de carga estática o dinámica en los puentes para validar y calibrar modelos numéricos, permitiendo emitir un dictamen.
- Simulaciones numéricas del comportamiento del puente utilizando elementos finitos para predecir posibles daños y evaluar su impacto.
- Análisis de datos en tiempo real mediante plataformas como LabVIEW para procesar y analizar datos de los sensores pueden detectar cambios inesperados y activar alarmas ante desviaciones del comportamiento del puente.
- Evaluación de impacto del cambio climático para detectar el impacto del incremento de temperaturas y eventos climáticos extremos, en la durabilidad y resistencia de los puentes.
- Análisis de riesgo sísmico probabilístico, por medio del cual se evalúa cómo afectarían a los puentes los sismos en una zona específica. Con esta herramienta se puede analizar la amenaza sísmica, la vulnerabilidad de las estructuras y la exposición de la población.
- Módulo de resiliencia, para determinar la capacidad del puente para recuperarse después de un evento adverso mediante modelos que analizan la variación del módulo ante cambios en el contenido de agua.
- Propiedades geotécnicas y dinámicas del suelo, así como el análisis espectral de respuesta sísmica en la zona donde se encuentra el puente para definir su capacidad de resistir movimientos del terreno ante un evento.
- Diseñar puentes con redundancia estructural permite que sigan funcionando incluso si una parte está dañada.
- Proyectar puentes que sean construidos con materiales de alto rendimiento para obtener alta resistencia mecánica, ductilidad y tolerancia al daño y mejorar la resiliencia y la sostenibilidad, particularmente en los puentes con mayor carga de tráfico.

La combinación de estas técnicas permite una evaluación integral y temprana del estado de los puentes, y evaluar su resiliencia a lo largo de su ciclo de vida, para incrementar la seguridad, eficiencia económica y

sostenibilidad ecológica y contribuir a la tomar decisiones informadas eficaces.

5.2 Análisis de resultados

Dado que la idea fundamental es aplicar el modelo de resiliencia al Sistema de Gestión de Conservación de Carreteras (SGCC), módulo Puentes de la Dirección General de Conservación de Carreteras (DGCC), se realizó el ejercicio de acuerdo con la probabilidad de ocurrencia e impacto identificados en la sección 3 del presente estudio, obteniendo los siguientes resultados:

En la implementación de los parámetros de resiliencia descritos en la sección 5.1 al SGCC módulo puentes, se logra definir con facilidad la funcionalidad residual, reflejada en la cantidad de puentes que se refieren en la priorización para programa de mantenimiento y conservación, constatando que es la categoría 3, de puentes que requieren reparación a mediano plazo, de acuerdo con la asignación de recurso y programación para optimizar su resiliencia. Es importante considerar la utilización de la base de datos actualizada del Atlas Nacional de Riesgos (2024) así como el número de declaratorias de contingencias hidrometeorológicas, sísmológicas o de otra índole relacionadas con los eventos de desastre acontecidos para cada puente en particular.

El tiempo de recuperación permite visualizar y tomar decisiones respecto a las acciones de mantenimiento y/o rehabilitaciones necesarias para el eficaz restablecimiento del funcionamiento del puente. El valor de resiliencia se expresa en escala de 0 -100% y se estima que, de los puentes carreteros de libre peaje, cuya inspección y priorización los refleja en buen estado de conservación, y representan que el 12.42% de ellos es claramente resiliente, de acuerdo con la información recopilada de la DGCC. Es importante que exista un mayor flujo de recursos financieros destinados al mantenimiento, rehabilitación y la conservación de los puentes. Por lo tanto, se define que el método tiene un buen desempeño aplicado al SGCC, pues es práctico y refleja a grandes rasgos el concepto de resiliencia, también ilustra los beneficios y dificultades de aplicar este concepto a los puentes de México con las herramientas propuestas y aplicadas a la base de datos del SGCC y es practico ya que se puede actualizar al cargar las actualizaciones correspondientes a la base de datos.

Se detectan retos, ya que la clave radica en la eficaz recopilación de la información de las inspecciones para mantener actualizada la información y gestionar de manera preventiva la conservación de los puentes.

Conclusiones y recomendaciones

Los puentes son estructuras continuamente sometidas a acciones externas típicas del día a día o extraordinarias provocadas por fenómenos naturales, hidrometeorológicos o sísmicos principalmente, el envejecimiento de las estructuras u otros ocasionados por el estado físico de los elementos estructurales que conforman el puente, pero también están propensos a accidentes o acciones antrópicas. Todos estos aspectos son los indicadores de riesgo de la estabilidad de los puentes, la seguridad de los usuarios y su entorno.

De acuerdo con lo anterior, dichos indicadores deben ser monitoreados y estar en seguimiento continuo, ya que, de no ser abordados y controlados de manera adecuada, limitan la resiliencia del puente.

Contar con el recurso financiero necesario y la inversión adecuada en el mantenimiento y la conservación de los puentes juegan un papel crucial para garantizar su funcionamiento seguro y prolongar su vida útil.

El mantenimiento preventivo ha demostrado, en diversas publicaciones de la Asociación Mundial de la Carretera (PIARC) que reduce significativamente el costo total previsto. Sin embargo, la capacidad para realizarlo depende totalmente del presupuesto asignado para dicho fin, lo que deja a los administradores de la red de puentes el desafío de la toma de decisiones sobre qué estructuras priorizar para añadir al programa de mantenimiento y conservación, en función de lo cual, el puente podrá contar con un índice de resiliencia mayor, menor o nulo.

La implementación de sistemas avanzados de monitoreo estructural y el desarrollo de un sistema de gestión de puentes se presenta como una solución a este problema, integrando a la base de datos del sistema, la información actual referente a los indicadores de riesgo y resiliencia, para que le sea aplicado el método de jerarquización, y los administradores del sistema, en este caso la Dirección General de Conservación de Carreteras (DGCC) pueda tomar decisiones informadas y basadas en datos actuales para priorizar las acciones a implementar.

Recomendaciones

En los últimos años, la atención hacia la resiliencia de puentes ha cobrado mayor importancia, y para ello se está desarrollando y utilizando nuevos materiales, como los polímeros reforzados con fibra (FRP) que han demostrado ser viables técnicamente y pueden mejorar la durabilidad y resistencia para la recuperación rápida y eficaz de los puentes, y a reducir los costos de mantenimiento y aumentar la seguridad estructural.

Por destacar algunos de estos materiales utilizados en la construcción de puentes, se describen a continuación;

- Hormigón de Alto Rendimiento (HPC): Este tipo de hormigón ofrece una mayor resistencia y durabilidad frente a condiciones ambientales adversas y cargas pesadas.
- Acero Estructural: El acero sigue siendo uno de los materiales más utilizados debido a su alta resistencia y capacidad para soportar grandes cargas. Además, los avances en tratamientos anticorrosión han mejorado su durabilidad.
- Polímeros Reforzados con Fibra (FRP): Estos materiales compuestos son ligeros, resistentes a la corrosión y tienen una alta relación resistencia-peso, lo que los hace ideales para aplicaciones en puentes.
- Hormigón Autorreparable: Este innovador material tiene la capacidad de reparar pequeñas grietas por sí mismo, lo que prolonga significativamente la vida útil de las estructuras.
- Nanomateriales: La nanotecnología está permitiendo la creación de materiales más resistentes y duraderos, como concretos con nanopartículas que mejoran su resistencia y durabilidad.

Los resultados de la implementación parcial del modelo definido el actual SGCC, modulo puentes, constituye una oportunidad para realizar una revisión exhaustiva de la infraestructura expuesta en las áreas de mayor riesgo y para elaborar planes eficientes que protejan los bienes públicos y privados.

Para el fortalecimiento de la imagen interna y externa de la DGCC en materia de planeación y conservación de puentes, se recomienda realizar un monitoreo continuo de las bases de datos de inspección de los diferentes organismos administradores de los puentes a nivel nacional, con la finalidad de unir esfuerzos en el fortalecimiento de la resiliencia de estos.

La FHWA trabaja en programas de investigación y desarrollo para mejorar la resiliencia de los puentes y reducir estos riesgos mediante el uso de

nuevas tecnologías y materiales avanzados, por lo que se puede gestionar la vinculación y crear mapas de ruta en temas tecnológicos estratégicos nacionales para los años 2025 a 2030.

Por el momento, es altamente importante mantener los recursos necesarios para el monitoreo de los puentes, para contar la capacidad de detectar anomalías o degradación de manera oportuna, reduciendo los riesgos y costes de mantenimiento y contar con una visión detallada y continua de las condiciones de los puentes.

Bibliografía

American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO]. (2002). *Standard Specifications for Highway Bridges, 17th Edition*. Washington D.C., E. U.

American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO]. (2005). *LRFD Bridge Design Specifications, Third Edition, SI Units*. Washington D.C., E. U.

American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO]. (2007). *Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design*. Subcommittee for Seismic Effects on Bridges T-3. Washington, DC.

American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO]. (1994). *Manual for Condition Evaluation of Bridge*. Washington D.C., E. U.

Andrés, L., Ribes, F., Fernández, E. y Maldonado, J. (2022). *Application of mathematical models and multicriteria analysis to establish an optimized prioritization for the maintenance of bridges in a network. Modelling for Engineering & Human Behaviour 2022*.

Carrión, F., Quintana, J., López, A., Gutiérrez, A. (2011). *Diseño y estrategia para un centro de monitoreo de puentes y estructuras inteligentes de México* [Boletín Notas #132]. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF]. <https://www.imt.mx/archivos/Boletines/Nota132.pdf>

Centro Nacional de Prevención de Desastres [CENAPRED]. (2014). *Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos*. México: Sistema Nacional de Protección Civil.

Committee on Increasing National Resilience to Hazards and Disasters [CINRHD], Engineering and Public Policy Committee on Science [EPPCS] y The National Academies. (2012). *Disaster Resilience: A National Imperative*. Washington, D. C. The National Academies Press.

Córdova, E. (2022). *Los 20 mejores puentes de México que presentan la maestría e ingenio de la ingeniería en la nación azteca*. Cinco Noticias.

- [Consulta en línea]. <https://www.cinconoticias.com/puentes-de-mexico/>
- Díaz, M. (2023). *Aplicación de técnicas de integridad estructural y redundancia estructural en puentes metálicos y mixtos en presencia de fisuras*. Universidad de Cantabria, Santander. <https://hdl.handle.net/10902/29565>
- Dirección General de Conservación de Carreteras [DGCC]. (2024). *Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes: Puentes de la Red Federal de Carreteras*. [Consulta en línea]. <https://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-conservacion-de-carreteras/puentes-de-la-red-federal-de-carreteras/>
- Duwadi, S. y Chase, S. (2006). *Multiyear Plan for Bridge and Tunnel Security Research, Development, and Deployment*. FHWA-HRT-06-072, Federal Highway Administration, United States Department of Transportation.
- Duwadi, S. y Munley, E. (2011). *Hazard Mitigation R&D Series: Article 5 – Securing the Nation’s Bridges*. Public Roads Magazine, 74(6), 20-27.
- Estrada, F., J. Tol, R. S., & Gay-García, C. (2011). A critique of The Economics of Climate Change in Mexico. The Economic and Social Research Institute (ESRI), 1(1) 422-408., Dublin. <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/100187/1/669218731.pdf>
- Centre for Research on the Federal Highway Administration [FHWA]. (2001). *Aerodynamics Laboratory Fact Sheet*. FHWA-RD-01-111, United States Department of Transportation.
- Federal Highway Administration [FHWA]. (2007). *Hydraulics Laboratory Fact Shee*. FHWA-HRT-07-054, United States Department of Transportation.
- Fondriest Environmental, Inc. (2014). *Monitoring Scour at Bridges and Offshore Structures. Fundamentals of Environmental Measurements*. [Consulta en línea] <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/environmental-monitoring-applications/monitoring-scour-bridges-offshore-structures/>
- Freckleton, D., Heaslip, K., Louisell, W., y Collura, J. (2012). *Evaluation of transportation network resiliency with consideration for disaster magnitude*. Transportation Research Board, Washington, DC.

- Gobierno de la República. (2020) *Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes 2020 – 2024*. [Consulta en línea] [Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes 2020-2024 | Secretaría de Comunicaciones y Transportes | Gobierno | gob.mx](#)
- Gómez, D., Marulanda, J. y Thomson, P. (2008). *Sistemas de control para la protección de estructuras civiles sometidas a cargas dinámicas*. Dyna, 75 (155), 77–89.
- Hernández, D., Martínez Soto, A. y Aguirre Pérez, J. M. (2000). *Impacto ambiental de proyectos carreteros. Efectos por la explotación de bancos de materiales y construcción de cortes y terraplenes*. Instituto Mexicano del Transporte. [Publicación Técnica No. 145]. México. Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF]. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt145.pdf>
- Barousse, M. y Galindo, A. (1994). *Sistema de Administración de Puentes (SIAP)*. [Publicación Técnica No. 49]. México. Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF]. <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt49.pdf>
- Kong, J. y Frangopol, D. (2003). Evaluation of expected life-cycle maintenance cost of deteriorating structures. *Journal of Structural Engineering*, 129(5), 682-691.
- Lara, M., Li, J. (2024) *Desarrollo Sostenible e Incluyente. México | Agua ya no pasa por mi casa: una revisión de la situación hídrica actual*. [Consulta en línea] <https://www.bbvaresearch.com/wp-content/uploads/2024/04/2024-04-23-Situacion-hidrica-en-Mexico.pdf>
- Lounis, Z. (2014). *Reliability-based life cycle design of resilient highway bridges*. National Research Council Canada, 142(9). Recuperado el 30 de septiembre de 2020. <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=c8c34abf-c83c-4ffd-9b0e93d51485b26b>
- Márquez, M., Valenzuela, M., Milla, P. y Vidal, P. (2017). Procedimiento de refuerzo de puentes tradicionales chilenos: socavación y sismo. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, 4(1), 91-104.
- Minaie, E., y Moon, F. (2017). Practical and Simplified Approach for Quantifying Bridge Resilience. *Journal of Infrastructure Systems*, 23(4),

- 04017016-1-11. [Recuperado el 30 de septiembre de 2020] <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29IS.1943-555X.0000374>
- Nuño, J. (2022). *Infraestructura de puentes, reflejo de una creciente nación ante futuro promisorio*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Gobierno. [Consulta en línea] <https://www.gob.mx/sct/prensa/infraestructura-de-puentes-reflejo-de-una-creciente-nacion-ante-futuro-promisorio-nuno-lara>
- Primero, J. (2020) *Introducción a la resiliencia de puentes en México*. Universidad Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. [Consulta en línea] <http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/17365>
- Red Nacional de Caminos [RNC]. (2019). *Red Nacional de Caminos (RNC)*. [Consulta en línea] Representación cartográfica en formato digital y georreferenciada de la red nacional de caminos: <https://www.gob.mx/imt/acciones-y-programas/rednacional-de-caminos>
- Rimal, S. y Pagán, J. (2013). *Reducción de riesgo a desastres por medio de carreteras resilientes: un programa de investigación y desarrollo*. Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. 13(1) 129.
- Samayoa, D., Balankin, A., Carrión, F., López, J. (2006) *Análisis de confiabilidad y riesgo en puentes atirantados*. [Publicación técnica No. 301]. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF]. http://www.imt.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt_301.pdf
- Sheinbaum, C. (2024). *100 Pasos para la transformación*. [Consulta en línea] <https://es.slideshare.net/slideshow/100-pasos-para-la-transformacin-de-la-dra-claudia-sheinbaumpdf/266612772>
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (1999). *NORMA: N-INT-1/99. Propósito de la Normativa para la Infraestructura del Transporte*.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2001). *NORMA: N-PRY-CAR-6-01-001/01. Proyectos de Puentes y Estructuras, 01. Proyectos de Nuevos Puentes y Estructuras Similares, 001. Ejecución de Proyectos de Nuevos Puentes y Estructuras Similares*.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2001). *NORMA: N-PRYCAR-10-03-003/01. Proyecto de Señalamiento y Dispositivos de Seguridad en Calles y Carreteras, 03. Señalamiento y Dispositivos para Protección de Obras, 003. Dispositivos de Canalización para Protección en Obras*.

Secretaría de Energía. (2013). *Estrategia Nacional de Energía 2013-2027*. México.

Torres, R. (2006). *Afectaciones de puentes por condiciones de servicio y/o accidents*. Grases J, Ingeniería Forense y Estudios de Sitio, 2(1) 1-15, Caracas.

Zhang, L., Jiang, Y. (2017) *Causes and statistical characteristics of bridge failures: A review*. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 9(12) 388-406. DOI: 10.1016/j.jtte.2021.12.003

Terminología

Abertura: Ancho o área de la abertura de un puente en un nivel especificado, medido de manera normal a la dirección principal de flujo.

Agradación: Crecimiento o elevación general y progresiva del perfil longitudinal del lecho de un cauce como resultado de la deposición de sedimentos.

Colapso: Cambio significativo de la geometría del puente que hace que éste ya no sea apto para su uso.

Curso de Agua: Cualquier arroyo, río, lago, laguna u océano.

Degradación: Descenso general y progresivo del perfil longitudinal del lecho de un cauce como resultado de la erosión a largo plazo.

Descarga de Diseño: Máximo flujo de agua que el puente puede acomodar sin superar las limitaciones de diseño adoptadas.

Diseño: Dimensionamiento y detallado de los elementos de un puente.

Estado Límite: Condición más allá de la cual el puente o elemento deja de satisfacer los requisitos para los cuales fue diseñado.

- Correspondientes a Eventos Extremos: Relacionados con eventos de sismos, cargas y colisiones de vehículos, con períodos de recurrencia mayores que el período de diseño del puente.
- De Resistencia: Relacionados con la resistencia y la estabilidad.
- De Servicio: Relacionados con las tensiones, deformaciones y fisuración.

Estructura con Múltiples Recorridos de Cargas: Estructura capaz de soportar las cargas especificadas luego de la pérdida de un elemento o conexión portante principal.

Estructura para Corrección de un Cauce: Cualquier obra construida en una corriente o colocada sobre, adyacente o en la proximidad de un curso de agua para desviar la corriente, inducir deposición de sedimentos, inducir socavación o alterar de alguna otra manera el flujo y los regímenes de los sedimentos del curso de agua.

Factor de Carga: Factor que considera fundamentalmente la variabilidad de las cargas, la falta de exactitud de los análisis y la probabilidad de la ocurrencia simultánea de diferentes cargas, pero que también se relaciona con aspectos estadísticos de la resistencia a través del proceso de calibración.

Factor de Modificación de las Cargas: Factor que considera la ductilidad, redundancia e importancia operativa del puente.

Factor de Resistencia: Factor que considera fundamentalmente la variabilidad de las propiedades de los materiales, las dimensiones estructurales y la calidad de la mano de obra junto con la incertidumbre en la predicción de la resistencia, pero que también se relaciona con aspectos estadísticos de las cargas a través del proceso de calibración.

Fatiga: Combinación de cargas de fatiga y fractura que se relacionan con la sobrecarga gravitatoria.

Geomorfología del Curso de Agua: Estudio de un curso de agua y su zona de inundación en relación con su topografía, la configuración general de su superficie y los cambios que ocurren debido a la erosión y a la acumulación de arrastres erosivos.

Inundación de Control para Socavación del Puente: Se utiliza para investigar y evaluar las fundaciones de un puente a fin de determinar si éstas pueden soportar dicho flujo y la socavación asociada permaneciendo estable.

Inundación de Desbordamiento: Caudal de inundación que, si es superado, provoca que haya un flujo sobre una carretera o puente, sobre una divisoria de drenaje, o a través de estructuras provistas para alivio de emergencia. La peor condición de socavación puede ser provocada por la inundación de desbordamiento.

Inundación de Diseño para Socavación del Puente: Caudal de inundación menor o igual que la inundación de 100 años de período de recurrencia que provoca la máxima socavación en las fundaciones del puente. La carretera o el puente se pueden inundar en presencia del nivel de agua correspondiente a la inundación de diseño para socavación del puente. La peor condición de socavación puede ser provocada por la inundación de desbordamiento, como resultado del potencial flujo a presión.

Período de Diseño: Período de tiempo en el cual se basa el cálculo estadístico de las cargas transitorias.

Propietario: Persona o agencia con jurisdicción sobre el puente.

Puente de Alivio: Abertura en un terraplén en una zona de inundación para permitir el pasaje del cauce mayor.

Puente: Cualquier estructura que tiene una abertura de no menos de 6100 mm y que forma parte de una carretera o está ubicada sobre o debajo de una carretera.

Rehabilitación: Proceso mediante el cual se restablece o incrementa la resistencia del puente.

Resistencia Nominal: Resistencia de un elemento o conexión a las solicitaciones, según lo indicado por las dimensiones especificadas en la documentación técnica y por las tensiones admisibles, deformaciones o resistencias especificadas de los materiales.

Servicio Regular: Condición que excluye la presencia de vehículos que requieren permisos especiales, vientos superiores a los 90 km/h, y eventos extremos, incluida la socavación.

Socavación Generalizada o de Contracción: Socavación de un cauce o zona de inundación que no está localizada en una pila u otra obstrucción del flujo. En un cauce la socavación generalizada/de contracción habitualmente afecta la totalidad del ancho del cauce o la mayor parte de este, y típicamente es provocada por una contracción del flujo.

Socavación Localizada: Socavación de un cauce o zona de inundación que está localizada en una pila, estribo u otra obstrucción del flujo.

Solicitud: Deformación, tensión o esfuerzo resultante (es decir, fuerza axial, esfuerzo de corte, momento torsor o flector) provocado por las cargas aplicadas, deformaciones impuestas o cambios volumétricos.

Superinundación: Cualquier inundación o caudal de marea con un caudal mayor que el de la inundación de cien años, pero no mayor que el de una inundación de quinientos años.

Vida de Servicio: Período de tiempo durante el cual se espera que el puente esté en operación.

Zona Libre: Área relativamente plana, sin obstrucciones, más allá del borde de la calzada para la recuperación de vehículos descarrilados. La calzada no incluye banquetas ni carriles auxiliares.



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado-Galindo"
San Fandila, Pedro Escobedo
C.P. 76703
Querétaro, México
Tel: +52 442 216 97 77 ext. 2610

publicaciones@imt.mx

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