



Notas Técnicas

Riesgo de inundaciones en redes viales



Financiado por



Australian Government
Department of Foreign Affairs and Trade

© 2016 Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento/Banco Mundial
1818 H St. NW
Washington DC, 20433 EE.UU.
Teléfono: 202-473-1000
Sitio web: www.worldbank.org

Esta obra ha sido realizada por el personal del Banco Mundial con contribuciones externas. Las opiniones, interpretaciones y conclusiones aquí expresadas no son necesariamente reflejo de la opinión del Banco Mundial, de su Directorio Ejecutivo ni de los países representados por este.

El Banco Mundial no garantiza la exactitud de los datos que figuran en esta publicación. Las fronteras, los colores, las denominaciones y demás datos que aparecen en los mapas de este documento no implican juicio alguno, por parte del Banco Mundial, sobre la condición jurídica de ninguno de los territorios, ni la aprobación o aceptación de tales fronteras.

La presente obra fue publicada originalmente por el Banco Mundial en inglés, con el título Flood Risk in Road Networks en 2016. En caso de discrepancias, prevalecerá el idioma original.

Derechos y autorizaciones

El material contenido en este trabajo está registrado como propiedad intelectual. El Banco Mundial alienta la difusión de sus conocimientos y autoriza la reproducción total o parcial de este informe para fines no comerciales en tanto se cite la fuente.

Cualquier consulta sobre derechos y licencias, incluidos los derechos subsidiarios, deberá enviarse a la siguiente dirección: World Bank Publications, The World Bank Group, 1818 H Street NW, Washington, DC 20433, EE. UU.; fax: 202-522-2625; correo electrónico: pubrights@worldbank.org.

Foto de la portada: Getty Images
Diseño de la portada: FCI Creative

ANTECEDENTES

Las redes viales son esenciales por motivos económicos, sociales, ecológicos y de seguridad. Por ello, se consideran redes vitales debido a las consecuencias de sus interrupciones (Tacnet y Mermet, 2012). Las inundaciones representan una amenaza importante para las carreteras y pueden provocar una considerable obstrucción del tránsito y dañar las estructuras viales, con posibles efectos a largo plazo (Buren y Buma, 2012). Además, conllevan costos de reparación considerables para las autoridades de administración vial, generan dificultades de acceso para los servicios de emergencia (Versini, Gaume y Andrieu, 2010a) e interrupciones para los usuarios de las carreteras y toda la comunidad. Las consecuencias para los negocios y la economía en general pueden ser considerables (Brabhaharan, Wiles y Freitag, 2006). Debido al tiempo y el costo requeridos para la reconstrucción, es fundamental una planificación sostenible y a largo plazo (Michael, Høegh y Søren, 2010); por lo tanto, la consideración del riesgo de inundaciones constituye un aporte importante para la toma de decisiones relacionadas con la planificación de este tipo de infraestructura. El análisis del riesgo de inundaciones en redes viales permite la aplicación adecuada de los planes y asignar recursos para prevención, mitigación y restauración (Balijepalli y Oppong, 2014; Jenelius y Mattsson, 2014).

Cuando las redes viales se ven afectadas por un suceso peligroso, los efectos de este pueden ser críticos para el manejo de emergencias. Las vías de acceso son consideradas, por lo general, lo más importante en una emergencia debido a su rol vital en la restauración de todos los demás servicios fundamentales (Cova y Conger, 2004). Las interrupciones en las redes viales pueden suponer una amenaza a la posibilidad de proporcionar asistencia médica y otros servicios fundamentales (Jenelius y Mattsson, 2014).

En este informe, se resumen los conceptos y las metodologías principales que se utilizan para evaluar los riesgos de inundaciones en redes viales. El informe presenta referencias y ejemplos, y está diseñado para ser un punto de partida para los profesionales en este ámbito.

Este documento ha sido producido por María Carolina Rogelis, Consultora Sênior en Evaluación de Riesgos de Inundación, bajo la guía y la supervisión de Fernando Ramirez-Cortés y Oscar A. Ishizawa, Especialistas Sênior en Gestión de Riesgos de Desastres, como parte de las notas técnicas desarrolladas en el marco del Programa de Evaluación Probabilista del Riesgo de Desastres (CAPRA; Probabilistic Risk Assessment Program) para América Latina y el Caribe del Banco Mundial.

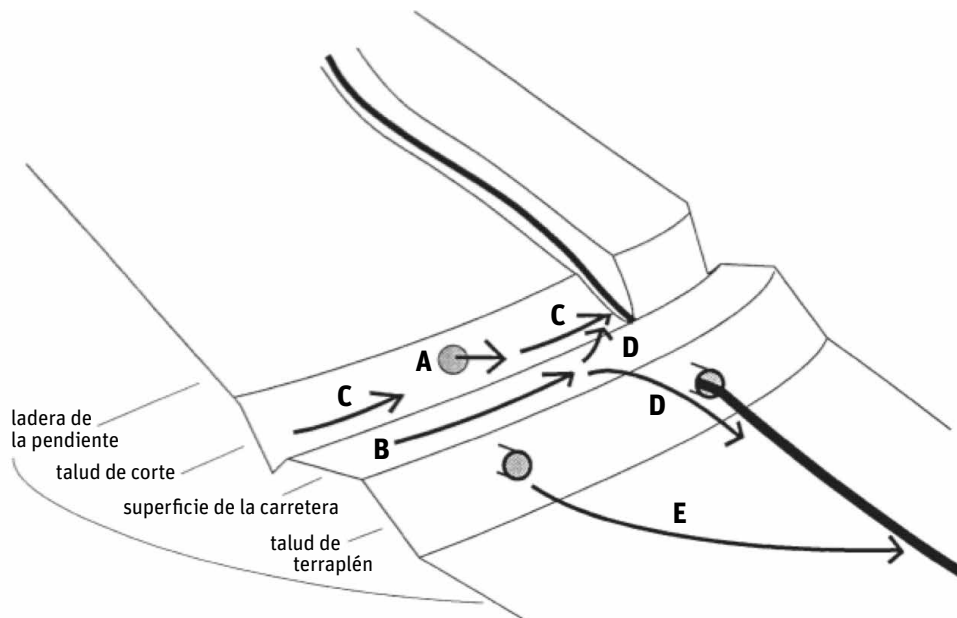
Revisión técnica por Frederico Pedroso, Especialista en Gestión de Riesgos de Desastres, y Giovanni Prieto, Consultor en Amenazas de Inundación.

INTERACCIONES ENTRE LAS CARRETERAS Y LAS INUNDACIONES

Las carreteras pueden sufrir daños por inundaciones, pero, además, pueden potenciar las condiciones peligrosas de una inundación. La inundación de una carretera produce dos niveles de consecuencias: por un lado, puede haber personas heridas y destrucción de vehículos; por el otro, la interrupción del tráfico puede tener secuelas indirectas graves. El cierre de carreteras puede tener consecuencias económicas, sociales y de seguridad (Tacnet y Mermet, 2012). Al mismo tiempo, las carreteras y el desarrollo de estas pueden tener efectos considerables en los patrones y los efectos de las inundaciones naturales. Las carreteras dividen hábitats e interrumpen el flujo de agua, sedimentos, nutrientes y vida acuática, lo que produce un impacto en los efectos beneficiosos del ciclo de inundación natural (Douven, Goichot y Verheij, 2009).

El desarrollo de carreteras en las llanuras aluviales altera la hidráulica de dichas tierras y afecta a los ecosistemas acuáticos relacionados (Douven, Goichot y Verheij, 2009). En la figura 1, se muestran las interacciones que pueden tener lugar entre los tramos de carretera y los flujos de agua o de sedimentos. Las carreteras pueden actuar como pasillos para los flujos de agua en su superficie (A y B en la figura 1) o en las zanjas a los costados de ellas (C en la figura 1). Además, las carreteras pueden ser fuentes de agua para las redes de corrientes que fluyen por obras de desagüe (D en la figura 1) o por sumideros (E en la figura 1). La interacción entre las carreteras y las corrientes de agua puede modificar la magnitud y dirección de los flujos de agua y de detritos, y los flujos de agua pueden transformarse en flujos de detritos, o viceversa (Jones *et al.* 2000).

Figura 1 Tipos de flujo de agua en una carretera



Fuente: Jones *et al.* 2000.

Nota: En la figura, se muestran cinco tipos de interacciones entre el agua en una carretera construida en una vertiente y una corriente de agua (línea continua).

La falla de una red vial es de interés para los usuarios de carreteras (pasajeros y cargas), así como para las infraestructuras de apoyo (carretera, equipo de seguridad, puentes, etc.), la infraestructura vital que depende de otras construcciones (como puentes o túneles) de la red vial (energía, telecomunicaciones, etc.) y la función de transporte (conectividad y accesibilidad de los puntos conectados entre sí por medio de la carretera) (Tacnet y Mermet, 2012). Las inundaciones provocan la interrupción del tránsito, que desaparece tan pronto como las aguas bajan y regresan a su cauce. En algunos casos, después de una inundación, hay una capa de sedimento, como lodo u otro material de grano grueso. En zonas montañosas o donde hay una inclinación pronunciada de la pendiente de fondo, el agua tiene suficiente energía para producir una destrucción parcial o total (Bil *et al.* 2014).

Los tipos de inundaciones en una red vial pueden dividirse en tres grupos (Michael, Høegh y Søren, 2010):

- Si la capacidad del sistema de drenaje es insuficiente, el agua en la superficie se acumula en depresiones en terrenos bajos. Las áreas que contribuyen al drenaje pueden ser las zonas aledañas así como el drenaje directo en la carretera.
- Los ríos pueden desbordarse porque no hay suficiente capacidad aguas abajo.
- El aumento del nivel del mar produce la inundación de terrenos bajos.

Las inundaciones en una red vial pueden tener los siguientes efectos (Buren y Buma, 2012):

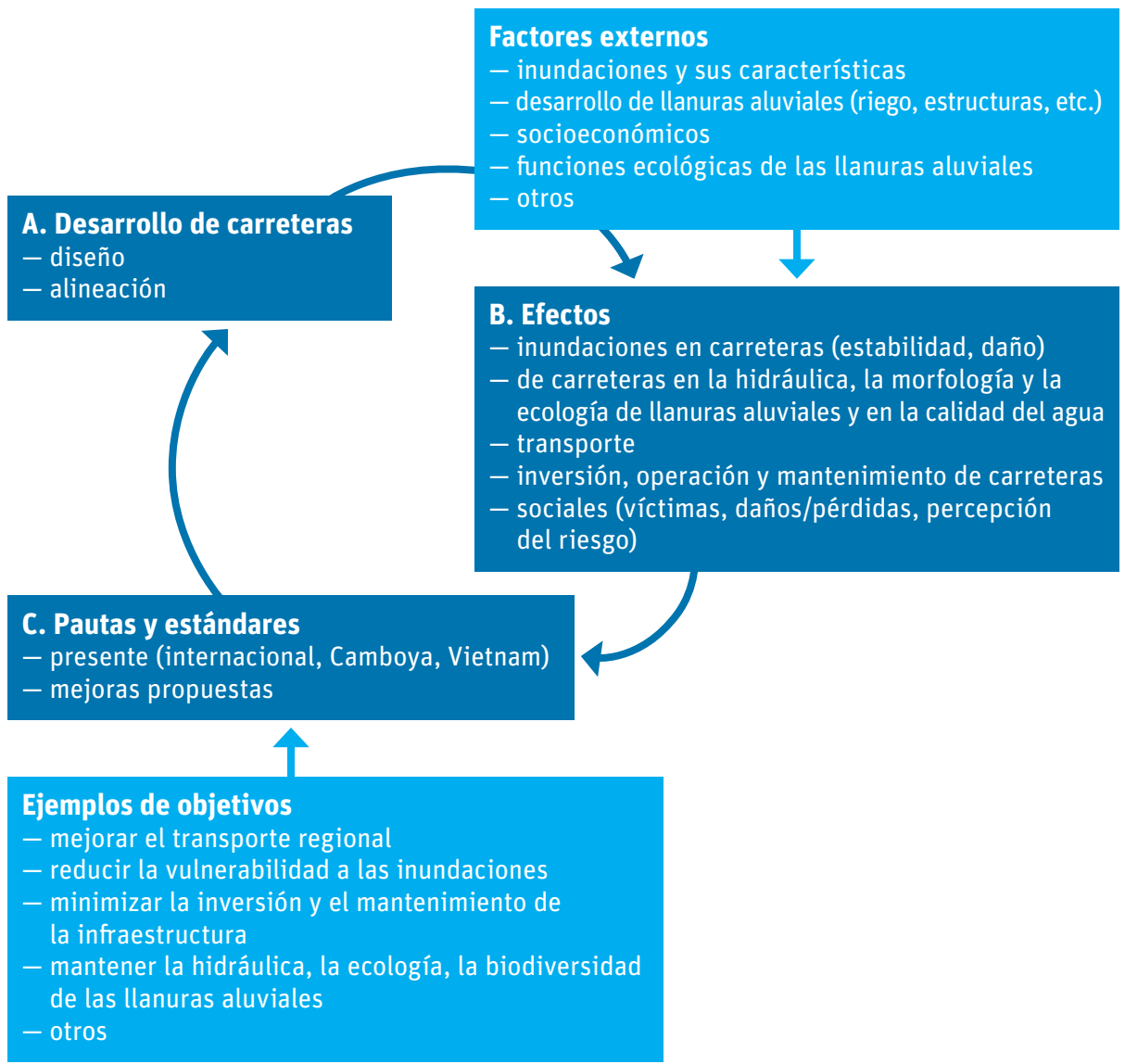
- El agua que se acumula en la carretera debido a la falla de las defensas contra inundaciones provoca el estancamiento del tránsito o, si el agua alcanza una profundidad determinada, la interrupción de este. Los niveles altos de agua en la carretera o a los costados de la construcción de esta pueden provocar la pérdida de la capacidad portante a corto y largo plazo después de la inundación. Las secciones a mayor profundidad y los túneles, así como las carreteras con cimientos livianos, pueden ser propensos al levantamiento por subpresión y al desplazamiento lateral.
- Las precipitaciones intensas pueden aumentar la inundación pluvial y la inestabilidad de los cimientos de la carretera.
- Los niveles de aguas subterráneas excesivos puede causar el levantamiento por subpresión y el desplazamiento lateral de las carreteras en excavación, la pérdida de la capacidad portante, el levantamiento por subpresión de carreteras con cimientos livianos y la lixiviación de contaminantes. Los posibles efectos de una carga hidráulica excesiva en el acuífero ubicado directamente debajo de la estructura de la vía incluyen el levantamiento por subpresión y el desplazamiento lateral de las carreteras.
- La aparición de agua en las carreteras durante lluvias torrenciales puede provocar el cierre de vías y problemas de seguridad para los vehículos. Durante lluvias torrenciales, la pulverización de agua que se produce detrás de los automóviles tiene como resultado una menor visibilidad. Además, en el peor de los casos, el agua en la carretera puede provocar que los vehículos pierdan adherencia, patinen y derrapen (fenómeno conocido como *aquaplaning* o *hidroplaneo*).

Los impactos pueden dividirse en directos e indirectos. Los impactos directos incluyen los costos de reconstrucción de las carreteras dañadas y la reconstrucción de las zonas de derrumbe o el ajuste de las orillas desgastadas por la erosión. Los indirectos implican los costos de interrupción y de las alteraciones logísticas. Por ejemplo, cuando parte de una carretera está cerrada, las desviaciones son siempre menos convenientes porque son más extensas o demandan más tiempo (Berdica, 2002). Estos costos adicionales son parte de los costos indirectos. Otros costos indirectos pueden expresarse como oportunidades perdidas, por ejemplo, si no pueden realizarse viajes planeados o si deben elegirse

otros medios de transporte (Bil *et al.* 2014). La inaccesibilidad a las carreteras inundadas durante las actividades de manejo de emergencias puede causar daños indirectos a la operatividad de las estructuras estratégicas, como hospitales y estaciones de bomberos (Albano *et al.* 2014).

La integración de la planificación y el diseño de carreteras con la gestión de riesgos de inundaciones desempeña una función crucial en el desarrollo de redes viales eficientes y sostenibles en llanuras aluviales. En la figura 2, se presenta un marco para el análisis integrado de la planificación y el diseño de carreteras. En dicha figura, se muestra la relación entre el diseño y la planificación del desarrollo de carreteras (A) y los efectos (B), que están relacionados con el uso de estándares y pautas (C). En la planificación y el desarrollo de carreteras, deben tomarse en cuenta todos los efectos mediante el uso de pautas ecológicas y económicamente sólidas para la planificación y la construcción de carreteras en llanuras aluviales (C) (Douven, Goichot y Verheij, 2009).

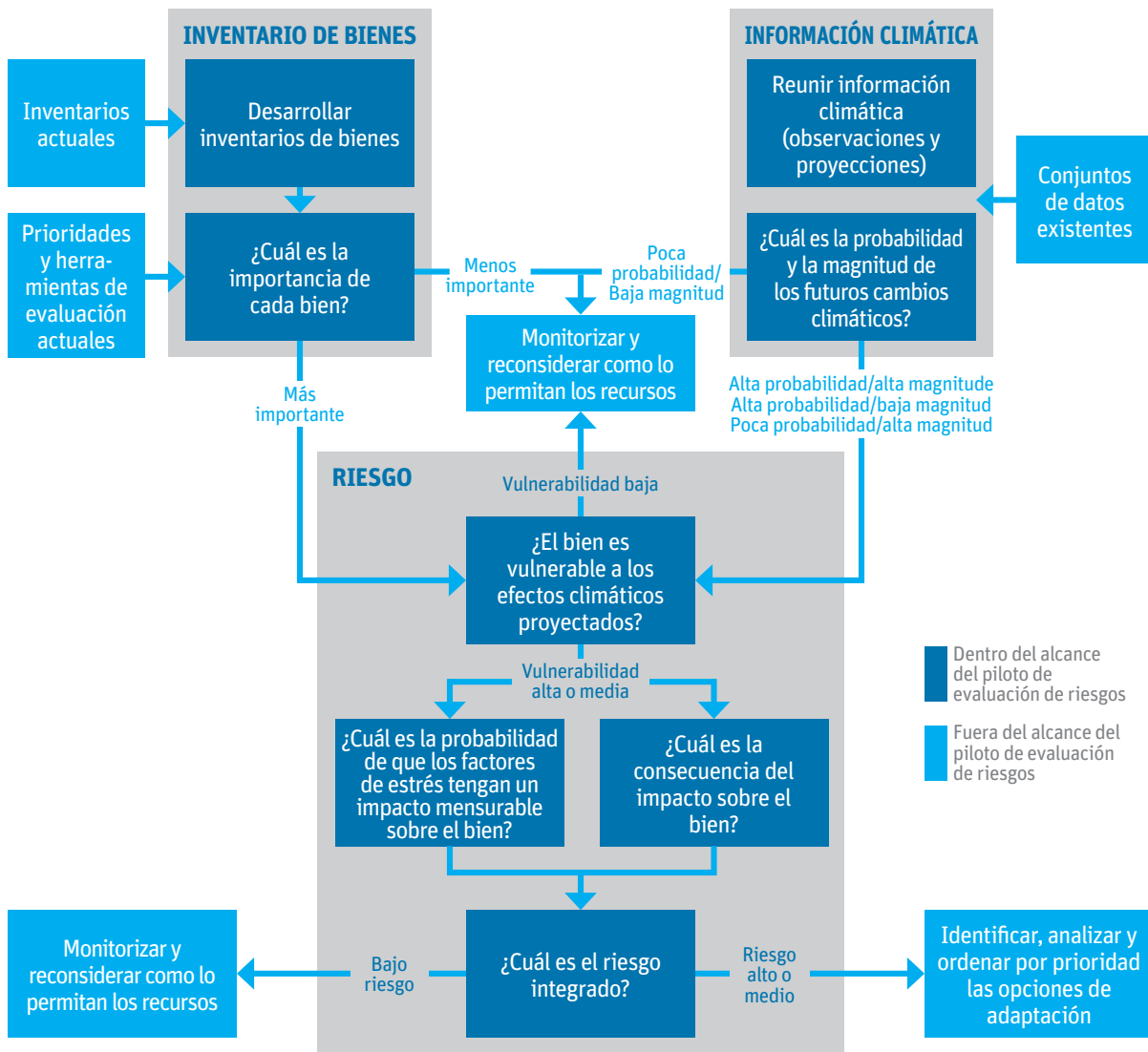
Figura 2 Marco conceptual para el diseño y la planificación de carreteras en llanuras aluviales



Otro aspecto relevante en la planificación y el diseño de carreteras es el cambio climático. Para tomar en cuenta el cambio climático, es necesario contar con buenos mapas de inundaciones y una buena planificación de la gestión del agua. Además, la consideración del cambio climático puede tener un impacto en los procedimientos de diseño estándar, ya que los métodos para calcular y estimar la capacidad de las obras de drenaje pueden ser insuficientes (CEDR, 2012). La adaptación al clima es un concepto relevante: implica identificar los riesgos para el desarrollo de un proyecto como consecuencia de la variabilidad y el cambio climático, y asegurar que esos riesgos se reduzcan a niveles aceptables por medio de cambios ecológicamente razonables, económicamente viables, y socialmente aceptables (Lal y Thurairajah, 2011).

La Administración Federal de Carreteras (FHWA; Federal Highway Administration) de los EE. UU. desarrolló un modelo conceptual para comprender las consecuencias del cambio climático para la infraestructura de transporte. El modelo consiste en tres pasos interrelacionados. El primer paso es desarrollar un inventario de bienes y ordenarlos por prioridad sobre la base de su vulnerabilidad, como se muestra en la esquina superior izquierda de la figura 3. El segundo paso es combinar los datos climáticos de una región para comprender los factores específicos de vulnerabilidad, como se muestra en la esquina superior derecha de la figura 3. El tercer paso del marco conceptual, que se muestra en el centro de la figura 3, implica un análisis cuantitativo de riesgos para identificar los bienes de transporte más vulnerables (VDOT *et al.*, 2011).

Figura 3 Estructura del marco conceptual de la FHWA para la evaluación de riesgos y la adaptación de la infraestructura de transporte al cambio climático



Fuente: VDOT *et al.* 2011.

Suarez *et al.* (2005) proporcionan un ejemplo que incluye el cambio climático en el análisis del riesgo de inundaciones en redes viales. Su enfoque estima el impacto de las inundaciones en una red vial bajo la influencia del cambio climático. Este enfoque requiere un modelo que sea capaz de estimular los flujos de tráfico rodado en una variedad de condiciones. El modelo se ejecuta por primera vez en circunstancias normales a fin de proporcionar valores de referencia para el volumen de tránsito y el tiempo de viaje. Luego, se diseña un conjunto de escenarios de inundación para identificar las áreas que se inundan, de modo que ningún viaje comience ni termine allí, y los tramos de la red que se interrumpen. El modelo se vuelve a ejecutar, y los resultados se comparan con los de la ejecución inicial para determinar cuántos viajes perdidos y cuánto tiempo de viaje adicional pueden atribuirse al fenómeno climático. Este tipo de análisis proporciona una base para estimar los costos relacionados con el transporte de los fenómenos climáticos más frecuentes y extremos en diversos escenarios de

cambio climático. Para captar los efectos de las inundaciones en la capacidad de la red de transporte, se definen diferentes escenarios de inundación basados en combinaciones del año de simulación (2003 o 2025), las áreas inundadas (sin inundaciones, llanura aluvial con período de retorno de 100 años o llanura aluvial con período de retorno de 500 años) y tipo de inundación (costera, ribereña o ambas).

VULNERABILIDAD

En los estudios de transporte, el concepto de vulnerabilidad se utiliza para reconocer que la susceptibilidad no es uniforme en las personas, los vehículos, el flujo de tránsito, la infraestructura ni el medioambiente. La vulnerabilidad puede hacer referencia a la vulnerabilidad física de los usuarios de transporte o a la posibilidad de que un accidente reduzca la vialidad del sistema de transporte. La vulnerabilidad en el transporte también puede abordarse desde el punto de vista de la fiabilidad de la red, ya que una red fiable es menos vulnerable (Cova y Conger, 2004) y, por lo tanto, más resiliente cuando ocurre un desastre.

El impacto de la interrupción de un elemento determinado se denomina “importancia del elemento”. Muchos otros términos han sido utilizados en varios campos para hacer referencia al mismo concepto, incluidos “criticidad” (Taylor y Susiwalati, 2012) y “vulnerabilidad” (Jenelius y Mattsson, 2014). El principal objetivo detrás de la medida de importancia es comparar y clasificar los diferentes elementos. Esto permite, por ejemplo, la identificación de aquellas partes del sistema de transporte donde las interrupciones serían especialmente graves. Las interrupciones de dichos elementos representan el peor escenario, y esos elementos también pueden considerarse blancos potenciales de ataques antagónicos al sistema. La identificación de los elementos importantes significa que pueden tomarse medidas focalizadas para reducir el riesgo de interrupciones en esas ubicaciones.

La combinación de la importancia y de la probabilidad de interrupción se denomina “criticidad del elemento”. De este modo, la importancia puede expresarse como “criticidad condicional” (Jenelius y Mattsson, 2014). Otro concepto importante es la resiliencia, que es definida por la Directiva de Política Presidencial (PPD, U.S. Presidential Policy Directive) 21 de los EE. UU. como “la capacidad de prepararse para condiciones cambiantes y adaptarse a ellas, y de soportar las interrupciones y recuperarse rápidamente de ellas”. Por lo tanto, el análisis de resiliencia de una red vial debe abordar las características físicas de la red vial y las actividades que esta facilita (World Bank, 2015).

La definición de vulnerabilidad aún no ha sido aceptada universalmente (Susilawati y Taylor, 2008). La mayoría de los conceptos de vulnerabilidad se basan en la reducción de la capacidad de la red vial. Algunas definiciones relacionadas con la vulnerabilidad incluyen lo siguiente:

- El análisis de vulnerabilidad de la red vial puede definirse como el estudio del deterioro potencial del sistema de transporte por carretera y sus efectos en la sociedad a través de la modelización de la infraestructura vial como una red con tramos (secciones de carretera) y nodos (intersecciones) (Jenelius y Mattsson, 2014).
- La expectativa (E) de impactos físicos (bajos, medios o altos¹) sobre bienes o redes dados diferentes niveles de exposición (World Bank, 2015).
- «Una susceptibilidad a los incidentes que puede tener por consecuencia una reducción considerable de la vialidad de una red» (Berdica, 2002). La vialidad del tramo, la ruta o la carretera describe la posibilidad de utilizarlos durante un período dado. Además, debido a que la accesibilidad depende de la calidad del funcionamiento del sistema de transporte, el concepto está relacionado con diferentes niveles de vulnerabilidad en lo que respecta a la reducción de la accesibilidad por varios motivos.

1. Para las redes de transporte, los niveles de impacto se definen como “abierto”, con una pérdida mínima de la capacidad de la carretera, “parcialmente cerrado” y “completamente cerrado”.

- Taylor, Sekhar y D'Este (2006) definen la vulnerabilidad de la siguiente manera:
 1. Un nodo de red es vulnerable si la pérdida (o deterioro considerable) de algunos tramos reduce de manera significativa la accesibilidad a él, medida según un índice estándar de accesibilidad.
 2. Un tramo de red es crítico si perderlo (o si su deterioro considerable) reduce de manera significativa la accesibilidad, medida según un índice estándar, a la red o a nodos específicos de esta.

Según esta definición, la vulnerabilidad de la carretera permite evaluar la debilidad de una red vial en materia de incidentes y los efectos adversos que tiene para la comunidad una red vial con una vialidad reducida.

- La vulnerabilidad es una combinación del potencial para sufrir daños, los costos asociados y la exposición de personas, bienes, infraestructura y vehículos. La definición de vulnerabilidad se relaciona con las consecuencias de los fenómenos naturales y puede dividirse en vulnerabilidad directa e indirecta. La vulnerabilidad directa corresponde al daño físico directamente relacionado con los efectos de los fenómenos, como las lesiones de las personas o los daños a la infraestructura —causados por fracturas de carretera, flujos de detritos, avalanchas, deposiciones, desprendimiento de rocas, etcétera—. La vulnerabilidad indirecta corresponde a las consecuencias lejanas de un suceso, como una inundación, una avalancha o un flujo de detritos (Tacnet y Mermet, 2012).

En general, definir la vulnerabilidad permite identificar las debilidades estructurales en la topología de la red que la hacen vulnerable a las consecuencias de las fallas o el deterioro. Luego, pueden destinarse recursos a evaluar esos tramos débiles (Taylor, Sekhar y D'Este, 2006).

En las siguientes subsecciones, se presentan las metodologías principales que se utilizan para el análisis de vulnerabilidad de la red vial.

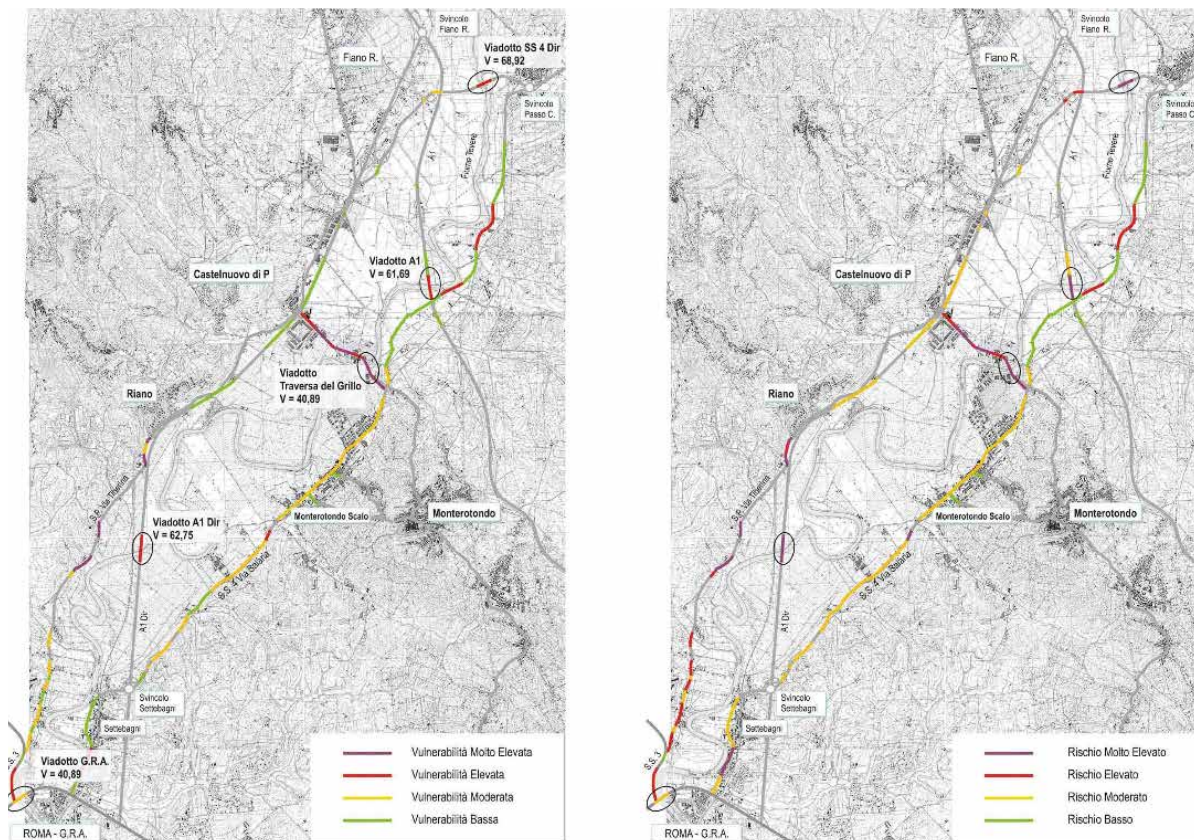
Técnicas de análisis multicriterio

En el análisis multicriterio, se establecen preferencias entre las opciones y se hace una evaluación comparativa entre alternativas o medidas heterogéneas. Por ejemplo, Benedetto y Chiavari (2010) presentan un modelo analítico para la evaluación de la vulnerabilidad de carreteras basado en el análisis multicriterio. Para cada elemento de la carretera j , la vulnerabilidad V_j se determina de la siguiente manera:

$$V_j = \sum_{i=1}^N Y_i \cdot P_i$$

En la ecuación, las P_i son parámetros de vulnerabilidad, y las Y_i cuantifican el efecto de cada parámetro en la vulnerabilidad total (estos representan los grados de libertad en este modelo). Las P_i son parámetros hidráulicos, geotécnicos, estructurales y funcionales (sensibilidad). Se define un grupo de parámetros específico para cada elemento tipológico (adaptabilidad). Cada parámetro puede asumir el valor 0, 1 o 2, dependiendo de si el parámetro implica vulnerabilidad baja/nula, media o alta del elemento. Se definen los parámetros de vulnerabilidad cuantitativa y cualitativa. La asignación de los valores se basa en los valores supuestos por la entidad considerada para los parámetros cuantitativos y en las categorías de evaluación cualitativa para los parámetros cualitativos. En el mapa 1, se muestran los resultados de los análisis aplicados a la red vial en el norte de Roma, en la llanura aluvial del río Tíber.

Mapa 1 Análisis de la red vial en la llanura aluvial del río Tíber, en el norte de Roma



Fuente: Benedetto y Chiavari, 2010.

El método de Gestión de Riesgo de Carreteras ante el Cambio Climático (RIMAROCC; Risk Management for Roads in a Changing Climate) (Bles *et al.*, 2010) utiliza diversos indicadores en la aplicación del análisis multicriterio a la evaluación de riesgos de carreteras. En esta metodología, el proceso de identificación de vulnerabilidades se conceptualiza como la búsqueda de los elementos vulnerables del sistema vial en caso de que se produjera un suceso no deseado (perjudicial). El estudio de las vulnerabilidades en la metodología RIMAROCC incluye lo siguiente: (i) sensibilidad y exposición de un recurso económico (carretera, servidumbre de paso, equipos, vehículos de mantenimiento, etc.) a factores de riesgo o a sucesos no deseados; (ii) tránsito; (iii) edad de la infraestructura; (iv) estándares de diseño; (v) prácticas de mantenimiento (reparaciones regulares o considerables); (vi) adaptabilidad del recurso económico; y (vii) posibilidad de mejoras sin reconstruir por completo el recurso económico.

En la tabla 1, se muestran los indicadores de vulnerabilidad propuestos por la metodología RIMAROCC, los cuales se utilizan luego para evaluar el riesgo en un marco de análisis multicriterio. La estimación de los indicadores requiere la obtención de datos, como la fecha de construcción, los estándares, materiales y equipos utilizados, etc., con un nivel de precisión que depende de la escala del análisis. Esta estimación también requiere datos del tránsito real y una comparación con el tránsito esperado para los conteos, el tipo y el análisis de origen-destino del tránsito, etc., así como datos de mantenimiento (reparaciones regulares o considerables) y defectos estructurales o daños existentes que podrían empeorar a causa de factores climáticos. Los componentes de la estructura principal que deben estudiarse son la hidráulica principal y secundaria, y el drenaje, las estructuras de ingeniería, los equipos, la geotécnica, el medioambiente y la calzada.

Tabla 1 Indicadores de vulnerabilidad propuestos por la metodología RIMAROCC

	Bajo (1)	Medio (2)	Alto (3)	Crítico (4)
V1: Velocidad de acaecimiento/ tiempo de pronóstico del suceso	Predicciones precisas posibles a >3 días	Predicciones precisas posibles de ½ a 3 días	Predicciones precisas posibles a <12 horas	Predicciones precisas posibles a <5 horas
V2: Nivel de conocimiento de la amenaza y de sus consecuencias relacionadas	Predicciones detalladas de acaecimiento y consecuencias de la amenaza	Predicciones aproximadas de acaecimiento y consecuencia de la amenaza	Solo perspectiva cualitativa (tendencias)	Se desconoce
V3: Cantidad y tipo de información para usuarios de carreteras	Pizarras de matrices disponibles	Buena cobertura de radio	Cobertura de radio parcial	Sin información de carretera
V4: Edad de la infraestructura	<10 años	10–30 años	30–100 años	>100 años
V5: Estándares de diseño	Estándares de diseño recientes (<5 años)	5–25 años	25–50 años	>50 años o estándares desconocidos
V6: Procedimientos de control y mantenimiento	Inspección sistemática después de cada suceso climático inusual + medios de mantenimiento alto	Inspección periódica (al menos 1 por año) + medios de mantenimiento medio	Inspección ocasional (solo después de producido el daño) + medios de mantenimiento bajo	Casi sin inspección ni medios de mantenimiento
V7: Nivel de tránsito	<2000 veh./día	2000–10 000 veh./día	10 000–50 000 veh./ día	>50 000 veh./ día
V8: Factores del sitio que tienden a empeorar los riesgos climáticos	Situación óptima en relación con la cobertura terrestre, la topografía, la erosión y el control de inundaciones	Situación aceptable en relación con la cobertura terrestre, la topografía, la erosión y el control de inundaciones	Situación deteriorada en relación con, al menos, un factor del sitio	Situación deteriorada en relación con todos los factores del sitio, o situaciones altamente deterioradas para un factor del sitio.

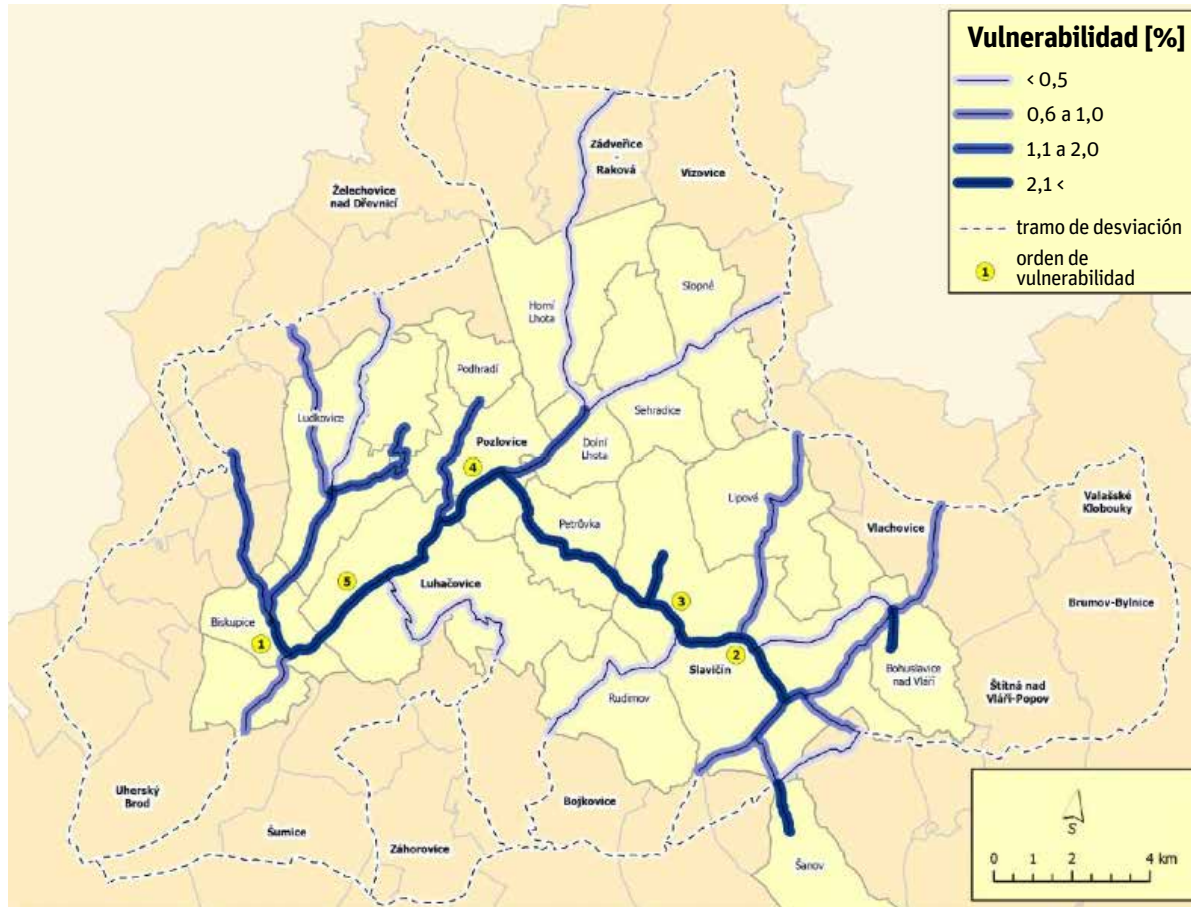
Fuente: Bles *et al.* 2010.

Las redes viales dan servicio a diferentes demandas o clientes, y los enfoques descritos son solo una instantánea de los posibles métodos que pueden utilizarse para evaluar la vulnerabilidad y la criticidad.

Análisis de vialidad

La vialidad de un tramo se define como la posibilidad de utilizarlo durante un período determinado, lo que luego se relaciona con la posibilidad de deterioro parcial de las carreteras. Si las consecuencias del tramo que está afectado son graves, el tramo es considerado crítico para la red (Balijepalli y Oppong, 2014).

Mapa 2 Vulnerabilidad de una red vial en Luhacovice, República Checa



Fuente: Bil *et al.* 2014.

Bil *et al.* (2014) abordan la vulnerabilidad como el efecto de la interrupción de un tramo específico en la vialidad de toda la red (los costos de reparación serán directamente proporcionales a la longitud de la carretera afectada y se diferenciarán de acuerdo con los tipos de objetos en el lugar de la interrupción; los costos de reparación serán más altos en el caso de reparaciones de puentes y túneles). En el mapa 2, se muestran los resultados del análisis en la República Checa. Los tramos más débiles se encuentran en la zona central del territorio. Si esos tramos se interrumpen, la longitud de la conexión (desviación) entre los nodos de extremo aumentará considerablemente.

Otro ejemplo del uso del concepto de vialidad en el análisis de vulnerabilidad de las carreteras es el uso del índice de vulnerabilidad de red, que toma en cuenta la vialidad y la importancia de cada tramo de carretera en la red (Balijepalli y Oppong, 2014). La vialidad del tramo i se calcula dividiendo la capacidad total disponible del tramo por la medida máxima del caudal por hora estándar (es decir, la capacidad) por carril para un determinado tipo de carretera. La capacidad total disponible de un tramo se obtiene sumando la capacidad de todos los carriles operativos disponibles.

Índices de accesibilidad

La accesibilidad es definida por Susilawati y Taylor (2008) como la facilidad con la que las personas pueden participar en actividades utilizando un medio de transporte desde una ubicación específica. Con esta definición, la accesibilidad puede utilizarse para evaluar la capacidad del sistema de transporte. En el cuadro 1, se muestra un ejemplo, tomado de Susilawati y Taylor (2008), de la aplicación de índices para identificar tramos críticos. Existen diversos índices para medir la accesibilidad:

- **Índice de Hansen.** El índice de Hansen no solo considera el costo generalizado de viaje, sino también el atractivo de la ubicación, que representa el tamaño de la actividad, como la población, el número de asientos de salas de teatro, el número de empleos, así como el tamaño de los centros comerciales. El índice de accesibilidad integral de Hansen para una ubicación puede expresarse de la siguiente manera:

$$A_i = \sum_j B_j f(C_{ij})$$

donde A_j es la accesibilidad integral, B es el atractivo de la ubicación (ciudad) j , y C es el número de oportunidades disponibles en j . A menudo, B se toma como la población de la ciudad j , y $f(C_{ij})$ es la función de impedancia, que representa la separación entre i y j . La función de impedancia $f(C_{ij})$ en la ecuación para el índice puede ser el tiempo y el costo del viaje. De este modo, cuanto mayor es la función de impedancia, menor es el índice de accesibilidad en un área particular. Taylor, Sekhar y D'Este (2006) utilizaron la reciprocidad de la distancia entre dos ciudades (X_{ij}) como el factor de impedancia, lo que implica que para un costo superior de viaje entre dos ciudades la accesibilidad entre ellas es menor.

- **Índice de accesibilidad al destino.** Este índice mide la capacidad de los evacuados para acceder a diferentes destinos (como puntos de reunión o centros de evacuación). Si la falla o el deterioro de la capacidad de una sección de la carretera afecta la reducción máxima en el índice de accesibilidad, esa carretera se identifica como una ubicación crítica (Luathep *et al.*, 2013).
- **Índice de accesibilidad/lejanía de Australia (ARIA, Accessibility/Remoteness Index of Australia).** ARIA es un índice de lejanía que mide la distancia desde localidades pobladas hasta centros de servicios fundamentales. Este índice también puede definirse como la accesibilidad de un centro poblado de una localidad a diversos tipos de servicios fundamentales, como salud, finanzas y educación.
- **Costo generalizado de viaje.** Dados los flujos de origen-destino, se estima la diferencia entre la ruta menos costosa con la red intacta y la ruta menos costosa sin el tramo en evaluación. De esta forma, pueden evaluarse los aumentos totales del costo en una red deteriorada (Taylor, Sekhar y D'Este, 2006).
- **Medida de eficacia de la red.** Este índice corresponde al número promedio de viajes por costo unitario y representa la eficiencia de una red mediante la relación tránsito-costo. Cuanto mayor es el tránsito gestionado por costo unitario, más eficiente es la red (Balijepalli y Oppong, 2014).
- **Medida de importancia.** Para la medida de importancia, se presupone que todos los conductores son forzados a tomar una ruta más costosa cuando un suceso causa la interrupción o el cierre de un tramo o de un grupo de tramos. "Ruta más costosa" no solo se refiere a lo económico en términos de una función de costo, sino que también implica tiempos de viaje y distancias mayores. El comportamiento se describe según el principio de equilibrio del usuario, donde la elección de la ruta supone minimizar el costo personal de viaje. La base de la medida es el cambio en el costo de viaje (Balijepalli y Oppong, 2014).

- **Índice de robustez de la red.** El índice de robustez de la red se define como el cambio en el costo del tiempo de viaje asociado con el redireccionamiento de todo el tránsito en el sistema si dicho segmento se vuelve inestable. Se basa en las capacidades de los tramos individuales y considera las opciones de redireccionamiento para los pares origen-destino que utilizan ese tramo, y, luego, utiliza el tiempo de viaje para medir el costo del redireccionamiento del tránsito si el tramo debe eliminarse por completo. El índice supone que la interrupción causará el cierre total del tramo y que los conductores seguirán el equilibrio del usuario en el momento de elegir una ruta. También se calcula el costo de viajes del sistema para cuando todos los tramos están intactos, y la diferencia da como resultado el índice de robustez de la red (Balijepalli y Oppong, 2014).

ANÁLISIS DE AMENAZAS

Una amenaza puede definirse como un fenómeno, sustancia, actividad humana o condición peligrosos que pueden ocasionar la muerte, lesiones u otros efectos en la salud, daños materiales, pérdida del sustento y de servicio, trastornos sociales y económicos o daños al medioambiente (UNISDR, 2009). En el contexto de las redes viales, el daño causado por un fenómeno peligroso —en este caso, inundaciones— puede incluir todos los efectos abordados en la sección “Interacciones entre las carreteras y las inundaciones”. Por su parte, la susceptibilidad describe la probabilidad de que una sección de la carretera se inunde dada la amenaza natural. La susceptibilidad es la frecuencia con la cual se inunda el tramo de carretera considerado en un período extenso (Versini, Gaume y Andrieu, 2010a).

Existen diversas dimensiones importantes en el análisis de amenazas al transporte, especialmente las escalas espacial y temporal. La escala espacial incluye el alcance del estudio y la resolución o detalle. El alcance espacial puede ser global, nacional, regional, local o un tramo individual en una red. El alcance espacial y el detalle están correlacionados, pero como el almacenamiento informático continúa creciendo, esta correlación está debilitándose, y pronto existirán estudios nacionales (o de mayor alcance) con un excelente detalle espacial y temporal. El alcance temporal y la resolución también son importantes. Una cuestión central es el horizonte temporal del estudio, que puede extenderse desde un solo período (transversal) hasta cualquier duración (longitudinal). El tiempo también es importante debido a los numerosos ciclos que afectan el potencial de amenaza (Cova y Conger, 2004).

En los enfoques actuales para la evaluación de amenazas de inundación en redes viales, las amenazas se evalúan con diferentes niveles de complejidad, y algunos de estos enfoques se limitan a la susceptibilidad.

El análisis de amenazas comienza con la identificación de la amenaza y un análisis de impacto. La fuente de proceso es el área que tiene una predisposición uniforme para la formación de amenazas. Para las amenazas hídricas, esta área es el canal de agua y el área de la cuenca. Las posibles magnitudes de los sucesos se clasifican con intervalos de recurrencia para determinados años. En las siguientes subsecciones, se analizan algunos enfoques y ejemplos para ilustrar el procedimiento.

Modelización para la evaluación de amenazas de inundación

Para obtener la intensidad asociada a un período de retorno, se utiliza la modelización de inundaciones. En el mapa 3, se representa un ejemplo de la modelización de inundaciones a través de una red de transporte.

En el mapa 3, se muestra la profundidad de la inundación en metros, con la dirección y la velocidad de la inundación representadas mediante un campo vectorial. Este ejemplo es un resultado del sistema de simulación de inundaciones MIKE 21 para la modelización de flujos bidimensionales a superficie libre. El sistema puede modelar numerosas condiciones que ocurren en una llanura aluvial, incluidas inundación y drenaje de la llanura, rebosamiento de diques, flujo a través de estructuras hidráulicas, fuerzas de marea y marejadas ciclónicas (Cova y Conger, 2004).

Otros enfoques más simples incluyen el uso de un sistema de información geográfica (SIG), como el método presentado por Dawod *et al.* (2014). Este método se basa en la idea de que cuanto mayor es la profundidad de la escorrentía en una subcuenca, mayor es la amenaza en las carreteras de esa subcuenca. Los cómputos de inundación se realizan en el nivel de subcuenca. De este modo, la profundidad de la escorrentía de cada subcuenca puede ser considerada el factor que más afecta el impacto de la inundación.

Cuadro 1. Índices de accesibilidad en Australia

Susilawati and Taylor (2008) estudiaron la vulnerabilidad de la red vial en la región Green Triangle de Australia utilizando dos índices de accesibilidad. El primero es el índice de Hansen, que mide la accesibilidad integral de lugares determinados, y el segundo es el índice de accesibilidad/lejanía de Australia (ARIA), que fue elaborado por el Departamento de Salud y Envejecimiento (DHAC) de dicho país para medir la lejanía del acceso al centro de servicios.

La metodología apunta a encontrar la vulnerabilidad de una red vial en el ámbito regional midiendo los cambios de los índices de accesibilidad de Hansen y el índice ARIA después de que uno o más tramos se hayan deteriorado. La metodología básica se muestra en la figura 4.

Figura 4 Metodología para la evaluación de vulnerabilidad de una red vial (Susilawati y Taylor 2008)

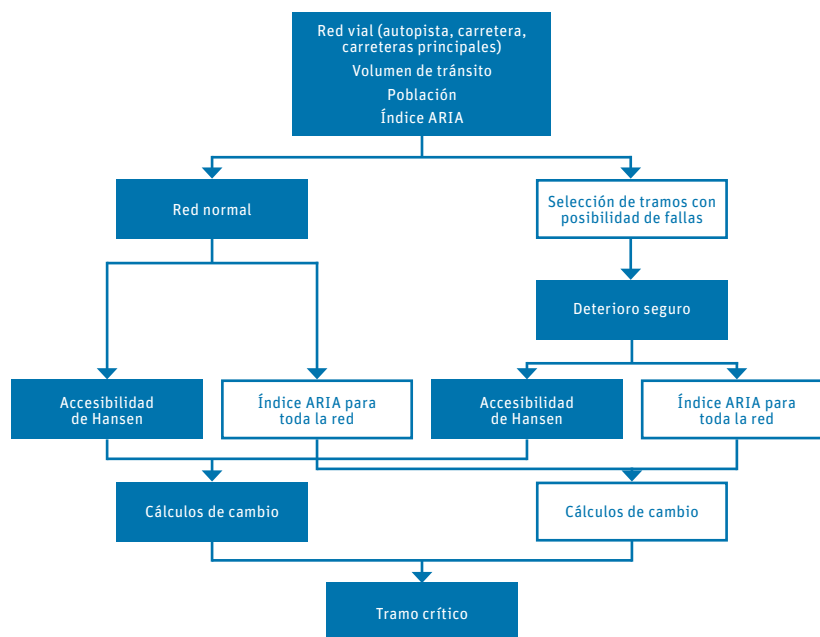
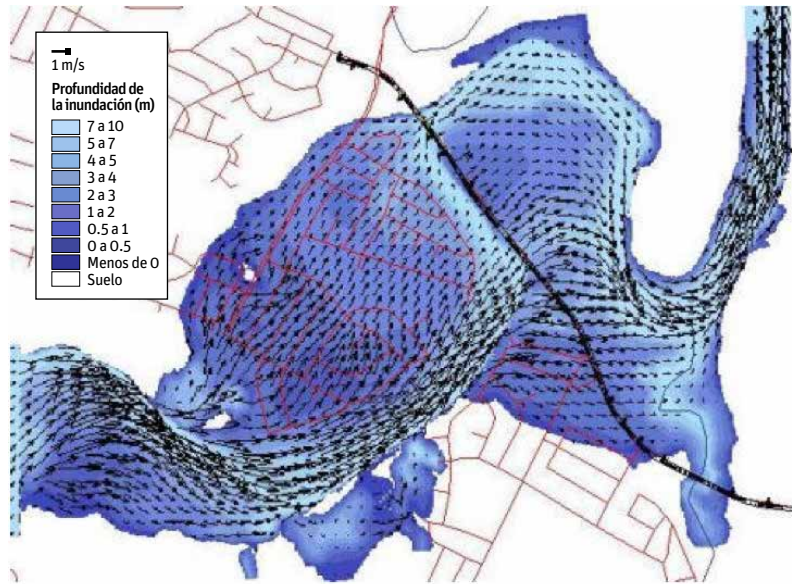


Figura 5 Tramos críticos que se identificaron en el estudio

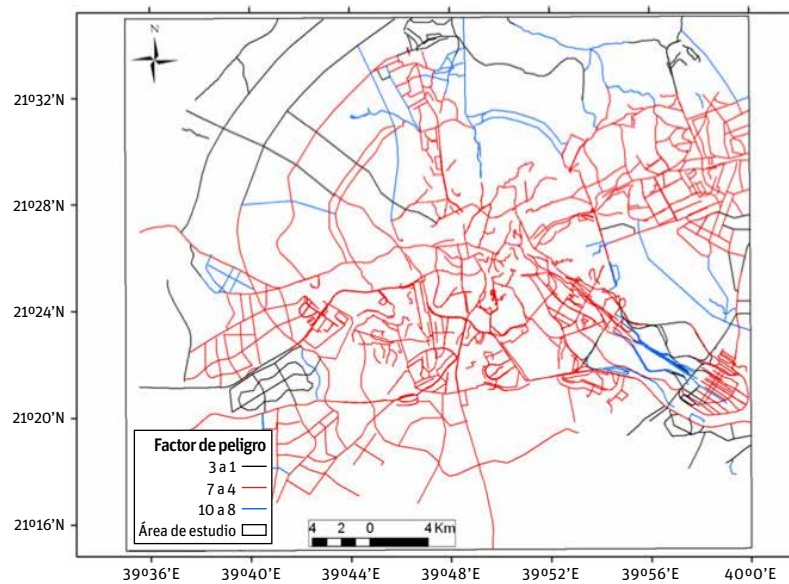


Por lo tanto, las herramientas de análisis espacial del software ArcGIS se utilizan para reclasificar la profundidad de la escorrentía en diez categorías, y a cada categoría se le asigna un número único. Ese número, llamado “factor de amenaza” o “factor de peligro”, se asigna a la carretera en una subcuenca determinada. En este enfoque, cada carretera en la red de transporte recibe un factor de amenaza único en cada escenario que representa el nivel de amenaza de inundación. Los factores de peligro obtenidos por Dawod *et al.* (2014) están en una escala del 1 al 10, siendo 10 el número que representa la mayor amenaza. Los resultados para Makkah, Arabia Saudita, se muestran en el mapa 4.

Mapa 3 Mapa de inundación de llanura aluvial sobre una red de transporte



Mapa 4 Factores de peligro para la red vial en Makkah, Arabia Saudita



Fuente: Dawod *et al.* 2014.

Metodología FEDRO

En la metodología de la Oficina Federal de Caminos de Suiza (FEDRO), la carretera debe tenerse en cuenta como un elemento que afecta el proceso (FEDRO, 2009). Como se explicó en la sección “Interacciones entre las carreteras y las inundaciones”, la interacción entre las carreteras y las corrientes de agua es determinante en condiciones de amenaza.

De acuerdo con la metodología presentada en FEDRO (2009), la evaluación de amenazas para carreteras incluye dos etapas. La primera etapa, llamada “identificación de la amenaza”, consta de los siguientes pasos:

- Obtener, examinar y analizar las fuentes de información actual.
- Analizar sucesos históricos.
- Llevar a cabo análisis geológicos, geomórficos, hidrogeológicos e hidrológicos de la situación actual.
- Formular escenarios básicos (denominados “escenarios de formación de amenazas”).
- Evaluar el canal de agua y las medidas existentes.

La segunda etapa, llamada “análisis de impacto”, consta de los siguientes pasos:

- Calcular la probabilidad y el alcance de los sucesos posibles.
- Crear la representación de los resultados e informes.

Los mapas que surgen del análisis pueden mostrar la clasificación de la amenaza. Como ejemplo del criterio de intensidad, en la tabla 2 se muestra la clasificación de intensidad de acuerdo con la metodología FEDRO.

Tabla 2 Criterio de intensidad para el proceso de inundación

Proceso de amenaza	Intensidad débil	Intensidad media	Intensidad fuerte
Inundación	$h < 0,5\text{m}$ or $v \times h < 0,5\text{m}^2/\text{s}$	$0,5 < h < 2\text{m}$ or $0,5 < v \times h < 2\text{m}^2/\text{s}$	$h < 2\text{m}$ or $v \times h < 2\text{m}^2/\text{s}$
Depósito de flujo de detritos	—	$h < 1\text{m}$ or $v < 1\text{m}/\text{s}$	$h < 1\text{m}$ or $v < 1\text{m}/\text{s}$
Erosión de diques			$d < 2\text{m}$

Fuente: FEDRO 2009.

Nota: h = profundidad del agua o espesor de depósitos; v = velocidad del agua; d = espesor promedio de la erosión.

En la metodología FEDRO, la probabilidad espacial de acaecimiento se determina, caso por caso, para cada fuente de proceso, intervalo de recurrencia y campo del mapa de intensidad. En este proceso, se identifica el área o la extensión de la sección de carretera afectada por un suceso peligroso en comparación con toda la zona que puede verse potencialmente afectada por ese proceso de amenaza para un escenario determinado.

Análisis de susceptibilidad

Versini, Gaume y Andrieu (2010a) presentan una metodología de evaluación de la susceptibilidad de la carretera basada en los tres pasos siguientes:

1. Identificación del conjunto de todas las secciones de carretera que pueden verse expuestas a inundaciones. En la metodología propuesta, los puntos expuestos a la inundación son de tres tipos diferentes: cruces de ríos, puntos bajos de acumulación y puntos contiguos a los ríos que pueden quedar sumergidos cuando el caudal del río se sale de su cauce. La identificación de todos los puntos de la red vial que pertenecen a una de esas categorías se basa en el análisis de la información del SIG.
2. Identificación de las características específicas de las secciones de carretera.
3. Definición del índice de susceptibilidad.

Un aspecto clave en la metodología es la conexión entre la susceptibilidad de una carretera a las inundaciones y las dimensiones de las estructuras que atraviesan un río (puentes u obras de desagüe) y, más específicamente, la conveniencia de la abertura (sección transversal) de una estructura y los caudales que puede producir la cuenca hidrográfica río arriba durante inundaciones (Versini, Gaume y Andrieu, 2010a). Versini, Gaume y Andrieu (2010a) proponen comparar dos valores de caudal para su caso de estudio en Francia: la capacidad teórica máxima de caudal a superficie libre a través de la estructura que atraviesa (Q_C), que puede calcularse con la fórmula de Manning-Strickler, y el caudal teórico del período de retorno de 10 años (Q_{10}) para la cuenca hidrográfica río arriba, basado en una fórmula con amplia aceptación adaptada a las pequeñas cuencas de Francia. Con estas dos variables, se calcula la tasa Q_{10}/Q_C que se utiliza en el análisis de susceptibilidad. Sin embargo, Versini, Gaume y Andrieu (2010) descubrieron que la altitud de la carretera, la pendiente local y el área de la cuenca eran los factores más importantes para identificar las secciones de carretera vulnerables.

Enfoque de puntos azules

Un enfoque ampliamente utilizado es el análisis de puntos azules. Los puntos azules son áreas propensas a inundaciones en la red vial (Michael, Høegh y Søren, 2010). Un punto azul es una ubicación de la red vial que puede inundarse en determinadas circunstancias. Los puntos azules solo hacen referencia a la causa probable de la inundación y no a las consecuencias, por lo tanto, la identificación de estos puntos, por sí misma, no significa que el riesgo de inundación en ese sitio sea inaceptable (Buren y Buma, 2012).

El concepto de puntos azules es una cadena de procedimientos para analizar, adaptar y proteger sistemáticamente la red vial de las inundaciones. Este concepto implica la ejecución de métodos informáticos en computadoras personales de oficina, seguida de inspecciones y acciones específicas en el campo. El punto de partida es un método de identificación que puede utilizarse a escala regional para encontrar puntos azules. Dependiendo de la gravedad de los posibles conflictos entre un punto azul y la carretera, el nivel de investigación puede expandirse para analizar la vulnerabilidad de puntos azules individuales a las lluvias o, incluso, hacer un paso adicional de la modelización numérica detallada de los procesos hidráulicos. Los últimos procedimientos del concepto de puntos azules son inspecciones en sitios locales determinados, seguidos de las acciones apropiadas. Estas acciones pueden incluir, por ejemplo, la mejora de los sistemas de drenaje o mejoras en la monitorización de los niveles en las corrientes de agua. El concepto de puntos azules se diseñó para utilizarse en carreteras grandes e importantes en entornos no urbanos (Hansson, Hellman y Larsen, 2010)

El método de puntos azules se divide en los tres niveles siguientes (Hansson, Hellman y Larsen, 2010):

- **Nivel 1.** El primer nivel puede definirse como la investigación, en la que se identifican todas las depresiones en el material cartográfico. Para esto, se permite la caída de la lluvia sobre una superficie modelo del terreno y se impide al mismo tiempo la infiltración en el suelo y la evaporación en la atmósfera. Por lo tanto, cada gota de lluvia fluye a lo largo de la superficie del terreno hasta llegar a un volumen de agua libre acumulada en una depresión. Si estos volúmenes son superiores a 10 m³ y están cerca de una carretera, se consideran amenazas y se incluyen en el siguiente análisis.
- **Nivel 2.** El segundo nivel es el cálculo de la vulnerabilidad a las lluvias para cada depresión encontrada en el nivel 1. El cálculo se realiza con la presunción de que no hay drenaje de agua de las depresiones y de que la impermeabilidad de la cuenca es del 20, el 40, el 50, el 60, el 80 y el 100 %. De esta manera, se puede trazar un mapa que muestre la cantidad necesaria de precipitación para llenar los terrenos bajos.
- **Nivel 3.** El tercer nivel consiste de un modelo hidrodinámico 2D-1D de embalses superficiales y depresiones que se utiliza para encontrar surcos, cuencas y estanques en un área. Se tiene en cuenta el cálculo del caudal de agua en la superficie y en los sistemas de drenaje, lo que da como resultado cálculos más precisos de la amenaza de inundación.

Además, la amenaza de inundación causada por el aumento del nivel del mar se esquematiza incrementando el nivel del mar para registrar la distancia tierra adentro a la que llega el agua de mar. Los diques actúan como barreras siempre y cuando el nivel del agua no exceda el límite superior del dique.

La amenaza de inundación debido al aumento del nivel del agua en ríos puede calcularse de la misma manera que el del nivel del mar. El nivel del agua en un río puede aumentar a un nivel determinado y puede verse la incidencia de dicho aumento tierra adentro (Hansson, Hellman y Larsen, 2010).

Por lo general, hay muchos puntos azules a lo largo o cerca de un tramo de carretera, y el análisis de nivel 2 está probablemente justificado en la mayoría de los casos, si no en todos. El análisis de nivel 2 se centra en señalar las depresiones más peligrosas.

Dos depresiones de geometría semejante (volumen y forma) no plantean necesariamente el mismo problema. Es crucial determinar la cuenca para cada depresión a fin de estimar el volumen de agua disponible para llenar la depresión. Una cuenca grande para una depresión pequeña supone una mayor amenaza que una cuenca pequeña para una depresión grande. La profundidad de la precipitación, en milímetros necesarios para llenar la depresión, puede calcularse dividiendo el volumen de la depresión por el área de la cuenca.

En conclusión, las depresiones cercanas a una carretera que pueden llenarse con precipitaciones relativamente moderadas deben ser las primeras en abordarse para su inspección y para aplicar medidas preventivas (Hansson, Hellman y Larsen, 2010).

Los beneficios de la implementación de los análisis de nivel 3 son que se tienen en cuenta los caudales de agua en la superficie y en los sistemas de drenaje, lo que permite proporcionar un cálculo más preciso. El nivel 3 es una herramienta excelente para utilizar cuando se busca una solución que incluya más detalles sobre los sistemas (por ejemplo, la capacidad de drenaje y de almacenamiento) y cuando se establecen planes de emergencia (Hansson, Hellman y Larsen, 2010).

En los cuadros 2 y 3 se muestran ejemplos de la metodología de puntos azules aplicada en Holanda y Dinamarca, respectivamente.

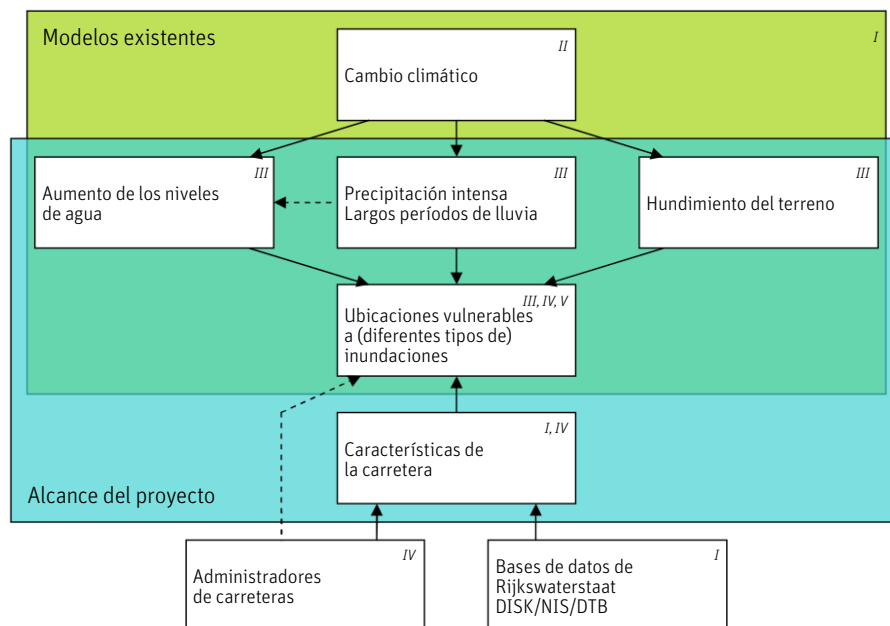
Cuadro 2. Puntos azules en Holanda

La metodología aplicada en Holanda para identificar los puntos azules se muestra en la figura B2.1. Se reúne una cantidad considerable de datos para identificar los puntos azules. Estos datos están relacionados con la carretera, el cambio climático y con resultados de modelización existentes. Para prever el cambio climático futuro, el análisis determina qué cambio climático se debe abordar en el proyecto. El cambio climático se tiene en cuenta para generar los peores escenarios para 2050 para varias formas de cambio climático. Para los análisis, se utilizan tanto como sea posible los conocimientos y los resultados de modelización existentes. En la primera fase del análisis, este conocimiento se combina con la información de la carretera y los escenarios de cambio climático para obtener un primer entendimiento de los puntos azules potenciales. Sobre la base de la ubicación y la altura de la carretera, se identifican las ubicaciones donde la altura del agua es superior a la altura de la carretera. Posteriormente, se utiliza información sobre la construcción de las carreteras para identificar otros puntos vulnerables, así como las ubicaciones donde la altura del agua no excede la altura de la carretera.

Los resultados de la primera fase se basan en cálculos aproximados de modelos existentes y, a veces, en suposiciones e información general sobre la carretera. La calibración se llevó a cabo comparando los resultados de la fase 1 con la experiencia de los administradores de carreteras, que se conoció mediante entrevistas a tales administradores en diferentes distritos. La calibración incluyó también la verificación de puntos azules potenciales que se identificaron en la primera fase, así como la determinación de puntos azules aún no identificados.

Los puntos azules potenciales identificados no son necesariamente los puntos vulnerables reales en las secciones de la carretera. Por ejemplo, puede haber instalaciones para prevenir las inundaciones, o bien el diseño de la carretera puede ser muy resistente. La última fase del análisis se centra en los puntos azules potenciales identificados en los pasos anteriores para filtrar de estos los puntos no vulnerables. El resultado de este último análisis es una lista de los puntos azules vulnerables más probables. Estos pueden analizarse luego para verificar si son puntos azules verdaderos.

Figura B2.1 Metodología aplicada en Holanda para la identificación de puntos azules



Cuadro 3. Puntos azules en Dinamarca

Los tres niveles de análisis son los siguientes:

Nivel 1: Detección mediante un análisis del terreno. Se identifican todas las depresiones; se presupone que la escorrentía superficial en la cuenca es del 100 % (es decir, el agua de lluvia no se infiltra en el suelo) (fotografía B3.1). Se identifican terrenos bajos donde hay peligro de inundación debido al aumento del nivel del mar. Se utilizan diversos valores de niveles del mar. Se incluyen los diques para que no ocurra una inundación detrás de los diques a menos que el nivel de agua exceda la altura de estos. En este nivel, no se tienen en cuenta las pendientes en las corrientes de agua.

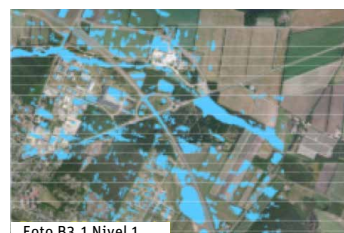


Foto B3.1 Nivel 1



Foto B3.2 Nivel 2



Foto B3.3 Nivel 3

Nivel 2: Vulnerabilidad a las lluvias de depresiones individuales. Se calculan las rutas de flujo y las áreas de las cuencas para cada punto azul. Este es un cálculo simple a partir de las áreas que contribuyen. Se traza un mapa con la cantidad necesaria de precipitación para llenar los terrenos bajos. En este nivel, se presupone que no hay drenaje de agua de las depresiones. El análisis de vulnerabilidad a las lluvias se realiza con una impermeabilidad del área de la cuenca del 20, el 40, el 50, el 60, el 80 y el 100 % (fotografía B3.2).

Nivel 3: Modelo hidrodinámico de los embalses superficiales y depresiones. En este nivel, se proporciona una predicción de inundación con variable temporal. Tiene una combinación 2D-1D entre la superficie (terreno, canales y estanques) y sistemas de drenaje (tuberías) (fotografía B3.3).

Después de señalar todos los puntos azules en la red vial en el nivel 2, a veces es necesario minimizar los números para avanzar en la evaluación.

Se puede minimizar mediante un análisis de riesgos. En la figura B3.1, se muestra la matriz de un análisis de riesgos simple donde la columna izquierda proporciona la probabilidad de un suceso.

El clima cambiante modifica la probabilidad de algunos extremos climáticos, por ejemplo, de poco frecuente a posible, es decir que los escenarios climáticos ocurrirán con mayor frecuencia. Hoy en día, el clima ha cambiado tanto que algunos sucesos de precipitación con un período de retorno de 100 años han pasado a un período de retorno de 20 a 50 años. Las consecuencias para los usuarios de carreteras y las carreteras propiamente dichas se ilustran en la primera fila de la figura B3.1. El mismo suceso de precipitación puede tener diferentes consecuencias para diferentes tipos de carreteras. La cantidad de usuarios también influye en las consecuencias, por ejemplo, detener a 500 usuarios de la carretera debido a un punto azul no tiene las mismas consecuencias que detener a 5000 usuarios de la carretera.

Figura B3.1 Matriz de análisis de riesgos simple

	Insignificante	Menor	Medio	Mayor	Catastrófico
Seguro	Insignificante		Medio	Mayor	
Probable	Insignificante	Menor	Medio	Mayor	
Posible	Insignificante	Menor	Medio	Mayor	
Poco frecuente	Insignificante	Menor	Medio	Mayor	Catastrófico
Improbable	Insignificante	Menor	Medio	Mayor	Catastrófico

a) Se identifican todas las depresiones; se presupone un 100 % de escorrentía de la cuenca y que no hay drenaje en la depresión.

b) Análisis de vulnerabilidad a las lluvias con impermeabilidad del 20 % en el área de la cuenca.

c) Los surcos, las cuencas y los estanques en un área de riesgo se calculan mediante modelos 1D-1D y 1D-2D.

Nota: La probabilidad está en la columna izquierda, y las consecuencias, en la parte superior.

ANÁLISIS DE RIESGO

En la forma más amplia, el riesgo R puede definirse como $R = H \times C$, donde H es la probabilidad de un suceso amenazante (amenaza), y C son las consecuencias relacionadas con H . Las consecuencias C son un producto del valor de los elementos en riesgo E y su vulnerabilidad V , de modo que la ecuación de riesgo se convierte en $R = H \times E \times V$. La vulnerabilidad V es un factor entre 0 y 1, indica la gravedad de la pérdida prevista para la amenaza H y se expresa como una fracción del valor total de E . En el contexto de la vulnerabilidad de la red, pueden incluirse valores monetarios de segmentos de carretera (calzada, guardarraíl, etc.) como referencia a la vulnerabilidad estructural de los elementos en riesgo. La amenaza H puede expresar la probabilidad de acaecimiento de un fenómeno potencialmente dañino en un período y un área dados (Meyer *et al.*, 2014).

La mayoría de los métodos de cálculo de riesgos utilizan los llamados “valores de tránsito estático” para evaluar el riesgo. El número de vehículos en una sección de carretera se define por un número promedio de vehículos por unidad de tiempo (diaria o anual, por ejemplo, tránsito medio diario anual) y se basa en la suposición de que todos los vehículos viajan a la misma velocidad. Generalmente, se calculan dos tipos de riesgo: (i) riesgo del objeto, que es la probabilidad de que un conductor sufra la muerte entre el número total de personas que atraviesan el área peligrosa, y (ii) riesgo individual, que es la probabilidad de que un conductor que pasa N veces por día por un área peligrosa sufra la muerte (Voumard *et al.*, 2013).

Las ecuaciones de riesgo para redes viales se muestran en la tabla 3.

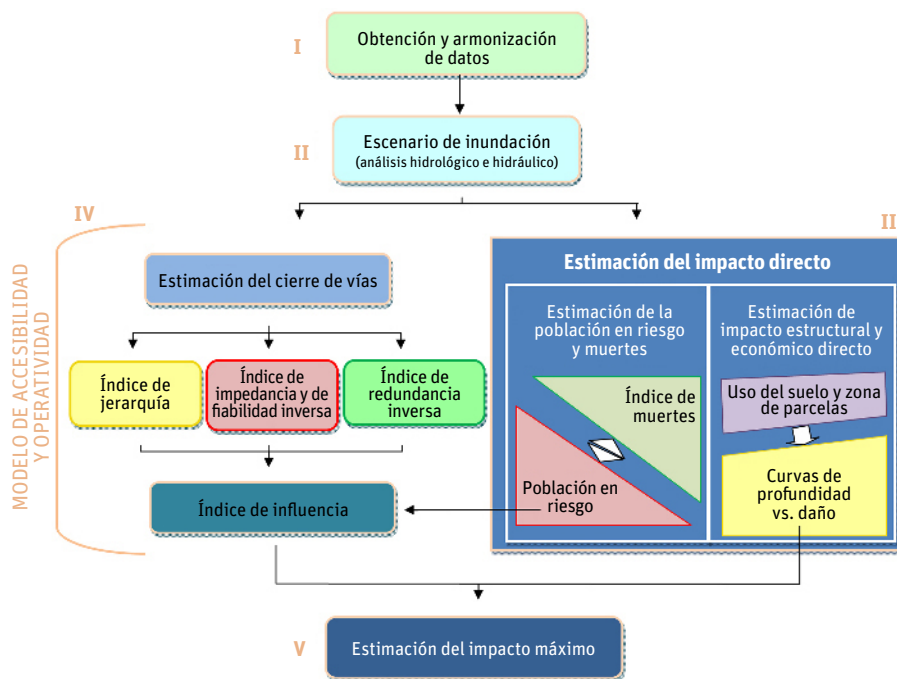
Tabla 3 Ecuaciones de riesgo

$R = \sum_{i=1}^N H \cdot Exp_i \cdot V \cdot W$	<p>R es el riesgo [muerte año] o [USD año] con n objetos, H es la amenaza [año], Exp_i es la exposición del objeto, es decir, la probabilidad de que un vehículo choque en el área peligrosa, V es la vulnerabilidad del objeto, y W es la pérdida total potencial de personas o costos ([muertos] o USD)].</p>
$R_{ob} = F_e \cdot P_s \cdot N_v \cdot \lambda \cdot \beta$	<p>El riesgo del objeto en una carretera donde R_{ob} es el riesgo del objeto [muerte año], F_e es la frecuencia de acaecimiento de un suceso [año], P_s es la proporción de la sección peligrosa que se ve afectada cuando ocurre una amenaza, λ es la probabilidad de muerte cuando un vehículo sufre daños a causa de una amenaza, β es la ocupación de vehículos promedio [personas/vehículo], y N_v es el número equivalente de vehículos permanentemente expuestos en el área peligrosa:</p> $N_v = \frac{N_{v_tot}}{f} \cdot \frac{l}{v}$ <p>donde N_{v_tot} es el número promedio de vehículos por día [vehículos día], l es la longitud de la sección peligrosa [m], v es la velocidad promedio de los vehículos [km/h], y f es un factor de conversión para transformar la velocidad de [km/h] en m/día. F_e y P_s representan H, donde P_s permite que la amenaza en una sección de la carretera se expanda. N_v es la suma de exposiciones (Exp_i), λ es la vulnerabilidad V, y β son las pérdidas W.</p>
$R_{ind} = \frac{R_{ob} \cdot X}{N_{v_tot} \cdot \beta}$	<p>Riesgo individual, donde X es la cantidad de tiempo en la que una persona transita diariamente por secciones peligrosas de la carretera [día].</p>
$R_{ob} = F_e \cdot P_s \cdot N_v \cdot \lambda \cdot \beta = F_e \cdot P_s \cdot \frac{t_{cum}}{t_{sim}} \cdot \lambda \cdot \beta$	<p>Riesgo del objeto dinámico con notación como en las ecuaciones antes mencionadas, donde t_{cum} es el tiempo acumulado de los vehículos observados en el área peligrosa, y t_{sim} es el tiempo de simulación de un modelo de riesgo dinámico.</p>

Los datos de amenaza y de vulnerabilidad que se utilizan en las ecuaciones que se muestran en la tabla 3 pueden obtenerse de la aplicación de las metodologías descritas en las secciones anteriores. Un ejemplo del uso de estos enfoques matemáticos para el cálculo del riesgo de inundaciones en la red vial se presenta en Meyer *et al.*, (2014). El método se enfoca en los gastos en cargas de tránsito adicionales resultantes del cierre de vías y en el valor funcional de la red de tramos. El producto del volumen de tránsito [vehículos día], distancia excesiva [km] y período de cierre [días] proporciona la carga de tránsito promedio adicional total por el cierre de vías [vehículos × km]. Suponiendo que el período de cierre característico es de 1 día, la multiplicación de la probabilidad de fallas del tramo [1 año] por la carga de tránsito adicional da como resultado el riesgo anual del tramo relacionado con inundaciones [vehículos × km por año].

El uso de SIG desempeña un papel importante en la mayoría de las metodologías actuales. Por ejemplo, Albano *et al.* (2014) propusieron un marco integrado en un SIG para estimar los daños directos e indirectos de una inundación. El objetivo es comprender las fortalezas y debilidades de un área urbana determinada incluidas las carreteras principales, secundarias y locales, los puentes, etc. La metodología propuesta por Albano *et al.* (2014) se muestra en la figura 6. Los índices de accesibilidad se utilizan (véase la sección “Vulnerabilidad”) en combinación con la estimación de impacto directo para obtener un estimado del efecto máximo.

Figura 6 Marco para estimar los daños directos e indirectos de una inundación

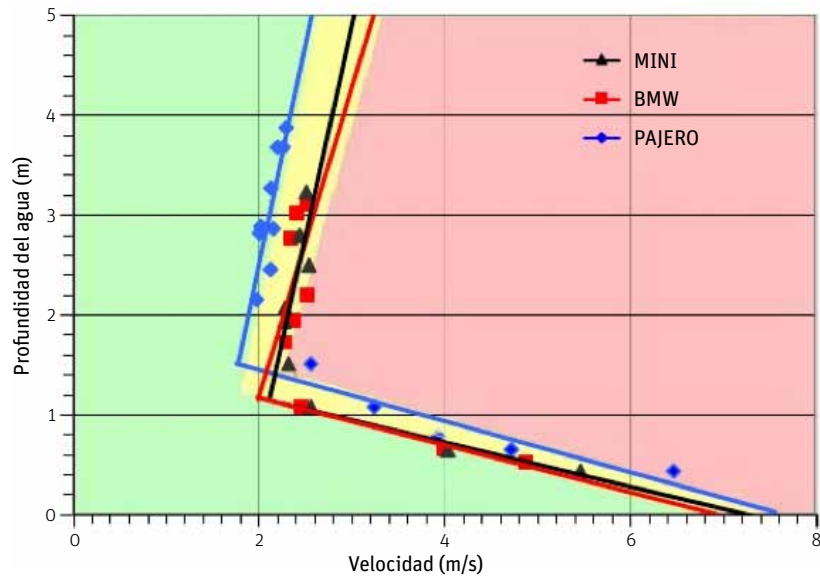


Fuente: Albano *et al.* 2014.

La metodología ilustrada en la figura 6 permite el análisis de la respuesta ante emergencias. El cierre de vías provocado por crecidas, estimado sobre la base de los valores de velocidad y profundidad del agua, puede causar daños y, por lo tanto, puede alterar las operaciones de viajes de emergencia en condiciones normales. El análisis de las rutas de las actividades de viajes de emergencia puede proporcionar la posibilidad de estimar la operabilidad de las estructuras de emergencia estratégicas y

destacar las debilidades (por ejemplo, el área en riesgo más inaccesible o una carretera de conectividad estratégica que esté más dañada). Si los vehículos en cualquier calle son arrastrados por el caudal de agua, la carretera es inaccesible. La metodología utiliza las curvas envolventes desarrollada por Teo *et al.* (2012), como se muestra en la figura 7. Las curvas se muestran en tres zonas de color (verde, amarillo y rojo), y la estabilidad hidráulica para cada vehículo idealizado puede identificarse fácilmente por color. La zona estable se muestra en verde (a la izquierda en la figura), la zona de transición en amarillo (en el medio de la figura), y la zona inestable en rojo (a la derecha de la figura). Todos los vehículos en la zona roja del gráfico son arrastrados por el caudal de agua; por lo tanto, por ejemplo, los vehículos pueden bloquear un vehículo de emergencia durante acciones de rescate.

Figura 7 Valores umbral críticos de inestabilidad hidráulica para vehículos determinados



Fuente: Teo *et al.* 2012.

Como se muestra en la figura 6, se estiman los siguientes índices:

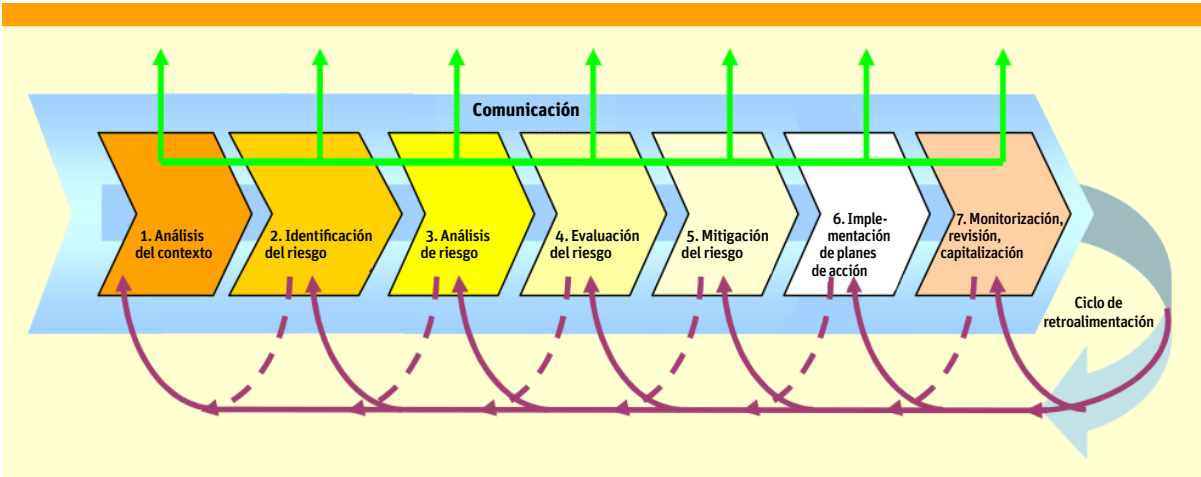
- El índice de fiabilidad inversa destaca la fiabilidad de la distancia de viaje de la ruta. La fiabilidad de la distancia de viaje considera la probabilidad de que un viaje entre el par origen-destino pueda completarse correctamente por el distancia más corta posible para el funcionamiento normal de las conexiones del sistema.
- El índice de impedancia es el grado de inaccesibilidad de un área que requiere rescate.
- El índice de jerarquía es un estimado de la importancia estratégica de arcos individuales. Un tramo de red es fundamental si la pérdida o el deterioro considerable del tramo reduce de manera significativa la accesibilidad a la red o a nodos determinados.
- El índice de redundancia inversa indica el número de conexiones alternativas potenciales entre un arco y otros relacionados con este considerados en la fase de emergencia. Por lo tanto, el índice proporciona información sobre el número de arcos disponibles y no disponibles en el caso de inundaciones para los servicios de emergencia si el arco está inutilizable.

La metodología combina esos índices para producir un índice de influencia que toma en cuenta el papel de cada elemento en el sistema en la fase de emergencia. Por último, la estimación de las consecuencias económicas directas se vincula con el impacto sistémico indirecto en el manejo de emergencias a través de un índice de impacto máximo (para obtener detalles sobre este análisis, véase Albano *et al.*, [2014]).

La metodología RIMAROCC propone el uso del análisis multicriterio (Bles *et al.*, 2010). En la figura 8, se muestra el marco para esta metodología y se describe el proceso cíclico que mejora continuamente la capacidad y capitaliza la experiencia. El proceso comienza con un análisis del contexto general, en el que se establecen los criterios de riesgo, y finaliza con un paso de reflexión donde se documentan las experiencias y los resultados y se ponen a disposición de la organización.

Los pasos y subpasos de la metodología RIMAROCC se muestran en la tabla 4. En el primer paso, se definen los objetivos —así como los parámetros externos e internos que deben tenerse en cuenta—, el alcance y los criterios de riesgo para los pasos restantes. El segundo paso implica la identificación de fuentes de riesgo, áreas de impacto de sucesos no deseados (incluidos cambios en las circunstancias) y sus causas y potenciales consecuencias. El tercer paso, el análisis de riesgo, implica desarrollar un entendimiento de los riesgos. El análisis de riesgo proporciona información para la evaluación de riesgos y sirve como base para decidir si el riesgo debe tratarse, así como para seleccionar las estrategias y los métodos de tratamiento del riesgo más apropiados. El cuarto paso, la evaluación de riesgos, implica la comparación del nivel de riesgo encontrado durante el proceso de análisis con criterios de riesgo establecidos cuando se consideró el contexto. Sobre la base de esta comparación, se puede considerar la necesidad de tratamiento. La mitigación del riesgo es el quinto paso, que implica la identificación, la valoración y la selección de una o más opciones para la modificación de los riesgos inaceptables. En el sexto paso, se desarrolla el plan de acción en detalle, se abordan las responsabilidades de implementación, se asignan los recursos, y se seleccionan las medidas de funcionamiento. Debido a que la gestión de riesgos es un proceso de aprendizaje, el séptimo paso apunta a observar y revisar las acciones implementadas y a capitalizar el conocimiento obtenido gracias a los sucesos climáticos y a la implementación de los planes de acción. Si las condiciones cambian, la replanificación comienza en este paso (Bles *et al.*, 2010).

Figura 8 Marco de la metodología RIMAROCC



Fuente: Bles *et al.* 2010.

Tabla 4 Pasos y subpasos de la metodología RIMAROCC

Pasos clave	Subpasos
1. Análisis del contexto	1.1 Establecer el contexto general. 1.2 Establecer un contexto específico para una escala determinada de análisis. 1.3 Establecer los criterios de riesgo y los indicadores adaptados para cada escala determinada de análisis.
2. Identificación del riesgo	2.1 Identificar fuentes de riesgo. 2.2 Identificar vulnerabilidades. 2.3 Identificar consecuencias posibles.
3. Análisis de riesgo	3.1 Establecer cronología y escenarios de riesgo. 3.2 Determinar el impacto del riesgo. 3.3 Evaluar los acaecimientos. 3.4 Proporcionar una perspectiva general del riesgo.
4. Evaluación del riesgo	4.1 Evaluar aspectos cuantitativos con un análisis apropiado (CBA u otros). 4.2 Comparar riesgos climáticos con otros tipos de riesgos. 4.3 Determinar qué riesgos son aceptables.
5. Mitigación del riesgo	5.1 Identificar opciones. 5.2 Valorar opciones. 5.3 Negociar con agencias de financiación. 5.4 Formular un plan de acción.
6. Implementación de planes de acción	6.1 Desarrollar un plan de acción para cada nivel de responsabilidad. 6.2 Implementar planes de acción de adaptación.
7. Monitorear, replanificar y capitalizar	7.1 Monitorización y revisión periódicos. 7.2 Replanificar en caso de obtener nuevos datos o de una demora en la implementación. 7.3 Capitalización sobre la base de la experiencia con los sucesos climáticos y el progreso de la implementación.

Fuente: Bles *et al.* 2010.

Un paso crucial en la metodología RIMAROCC es identificar los criterios, los indicadores y las categorías de evaluación de riesgos que se utilizarán. Estos aspectos luego se transforman en una matriz de riesgo y se utilizan en un análisis multicriterio. Los criterios deben corresponder al alcance y a la escala del sistema en estudio.

Debido a que las redes viales son utilizadas por diferentes actores desde una perspectiva económica y social, la metodología RIMAROCC especifica una obtención recomendada de datos —que debe adaptarse a la escala y a los objetivos de cada estudio específico— y que incluye datos sociales, económicos y políticos para establecer el contexto del análisis. La obtención de datos y el análisis posterior requieren la participación de varias partes interesadas, lo que, por lo general, requiere un trabajo interinstitucional intenso. La obtención de datos incluye, entre otros, lo siguiente (Bles *et al.*, 2010):

- **Datos del contexto externo.** Estos son datos del contexto social y cultural, político, legal, normativo, financiero, tecnológico y económico, así como del contexto del entorno natural y competitivo, en los ámbitos internacional y nacional; impulsores y tendencias clave que tienen un impacto en los objetivos de las autoridades de carreteras; y relaciones con las percepciones y los valores de las partes externas interesadas.
- **Datos del contexto interno.** Estos son datos sobre gobierno, estructura, roles y responsabilidades de las organizaciones; políticas y objetivos, y las estrategias en curso para conseguirlos; capacidades,

entendidas como recursos y conocimiento (por ejemplo, capital, tiempo, personas, procesos, sistemas y tecnologías); relaciones con partes internas interesadas y con la cultura de la organización, así como sus percepciones y valores; sistemas de información, flujos de información y procesos de toma de decisiones (formales e informales); estándares, pautas y modelos adoptados por las autoridades de carreteras; y la forma y el alcance de las relaciones contractuales.

Los contextos internos y externos son muy importantes en la evaluación de las consecuencias de los sucesos que involucran factores de riesgo para el análisis multicriterio. Las consecuencias se clasifican como directas (interrupción o perturbación del sistema, las actividades o la infraestructura de las carreteras) e indirectas (impactos humanos y socioeconómicos). Los impactos indirectos se relacionan con las consecuencias del suceso climático para el bienestar de los usuarios (incluidos el impacto psicológico, el estrés y el cansancio), la seguridad (victimas), la economía local o regional (pérdidas económicas), entre otros. En algunos casos, se requieren estudios específicos a fin de establecer los costos sociales y económicos para la sociedad.

De acuerdo con la metodología RIMAROCC, el impacto del riesgo puede determinarse en las siguientes categorías (Bles *et al.*, 2010):

- Integridad de las personas (usuarios y empleados), es decir, personas muertas o heridas.
- Daño a la infraestructura, es decir, costo de restauración.
- Pérdidas operativas para los administradores de carreteras (ingresos, calidad del servicio, imagen) y para los usuarios (pérdida de tiempo, costos adicionales del uso de vehículos).
- Daño al medioambiente (imagen y deterioro).
- Consecuencias económicas y sociales para la nación, la región o el área de influencia (impacto en las elecciones de modalidad, impacto en la accesibilidad a los territorios locales y el rol del transporte en el sistema económico global).
- También debe determinarse el costo de las soluciones paliativas.

REDUCCIÓN DEL RIESGO

La reducción del riesgo para un segmento específico de una red vial implica influenciar el acaecimiento, la frecuencia o la intensidad de los desastres, y reducir la vulnerabilidad de un segmento determinado. En el caso de una disminución en la probabilidad de acaecimiento de un desastre natural, se utiliza la monitorización para poder emitir advertencias en forma oportuna, se realizan modificaciones para el control de inundaciones en el lecho de corrientes de agua, y se lleva a cabo una plantación adecuada de cubierta forestal, entre otras medidas (Bil *et al.*, 2014).

La reducción de la vulnerabilidad de un segmento de carretera puede incluir lo siguiente:

1. **Aumento de la resistencia de un segmento de carretera.** Los segmentos de carretera amenazados por un desastre natural deben modificarse para aumentar su resistencia física. Para esto, se pueden llevar a cabo ajustes de construcción. Algunos ejemplos incluyen convertir comunicaciones en diques, crear cimientos de carretera más profundos en las pendientes y mejorar las estructuras de drenaje. La reducción de la vulnerabilidad a veces se realiza junto con la reducción de otra amenaza. Por ejemplo, las medidas contra inundaciones también pueden reforzar la carretera original (Bil *et al.*, 2014).
2. **Optimización de una red vial.** Es preferible asegurar que las desviaciones puedan utilizarse en caso de una falla. Bil *et al.* (2014) proporcionan un ejemplo de algoritmos de optimización.
3. **Mantenimiento.** El personal de administración de carreteras tiene la responsabilidad de organizar inspecciones y tareas de mantenimiento de forma adecuada, y debe trabajar con los datos obtenidos a fin de evaluar si es necesario rediseñar los sistemas de drenaje actuales y también determinar un plan de acción específico para las inspecciones y el mantenimiento. Las actividades relacionadas con la información deben centrarse en lo siguiente (Hansson, Hellman y Larsen, 2010):
 - información de amenaza y vulnerabilidad;
 - antecedentes del sitio;
 - sistema de drenaje actual;
 - viabilidad de los sistemas de monitorización (alerta temprana);
 - preservación de la información en una base de datos.
4. **Monitorización.** Las estaciones meteorológicas locales y, por ejemplo, la medición de los niveles de agua en un estanque de retención o en una obra de desagüe pueden proporcionar información valiosa sobre la forma en la que el sistema responde a condiciones climáticas específicas, como lluvias torrenciales. Los cambios en la respuesta a lo largo del tiempo también proporcionan buenas pistas respecto de cuando se necesita mantenimiento. Los sistemas de monitorización pueden incluir lo siguiente (Hansson, Hellman y Larsen, 2010):
 - Estaciones meteorológicas locales.
 - Sensores de nivel de agua en pozos de inspección, tuberías subterráneas, obras de desagüe, estanques de retención, corrientes de agua y embalses. Las lecturas del nivel de agua pueden

convertirse directamente en caudal de agua si se determina una curva de caudal para el sitio de la medición.

- Videocámaras.

Se recomienda enfáticamente la creación de una base de datos en la que, por ejemplo, se pueda almacenar la siguiente información (Hansson, Hellman y Larsen, 2010):

- notas de inspección, listas de comprobación, fotos de la situación y otros comentarios sobre el sitio;
- información sobre los trabajos de mantenimiento y reparación;
- daños en la carretera y el drenaje;
- crecidas;
- dimensiones inadecuadas.

5. **Alerta temprana de inundaciones.** El objetivo de los sistemas de alerta temprana de inundaciones es proporcionar a las personas con puestos de responsabilidad algo de tiempo para considerar las medidas adecuadas antes de que comiencen los verdaderos problemas. Prever el estado de una red vial durante una inundación puede ser útil para evitar que el tránsito utilice carreteras que corren riesgos y para identificar las rutas de acceso más seguras a las áreas afectadas para los servicios de rescate (Versini, Gaume y Andrieu, 2010a). En este caso, la causa del problema suele ser una tormenta con precipitaciones intensas, la fusión rápida de grandes cantidades de nieve en primavera o un gran caudal de río. Es necesaria una cooperación estrecha con institutos meteorológicos e hidrológicos para recibir advertencias sobre los próximos problemas.

Un sistema de alerta temprana puede consistir en lo siguiente:

- un sistema de notificación de alertas meteorológicas;
- recuperación y obtención de datos de los sitios monitorizados;
- evaluación de riesgos basada en las alertas meteorológicas y en condiciones climáticas del sitio;
- en el caso de riesgo grave, la presentación de información a los usuarios de carreteras sobre rutas alternativas, por ejemplo, mediante señales, radio o tecnología de la información adecuada;
- inspección y preparación del sitio para condiciones duras;
- disposición de las señales y luces de advertencia con información adecuada.

Versini, Gaume y Andrieu (2010b) presentan un ejemplo de un sistema de alerta temprana de inundaciones para una red vial, para el que se definen niveles de advertencia a partir de la distribución de los períodos de retorno de las inundaciones y caudales simulados a partir de un modelo hidrometeorológico distribuido.

COMENTARIOS FINALES

Las redes viales son infraestructura vital. Por lo tanto, la correcta incorporación de la información de riesgo en los procesos de planificación y operación de las redes viales es crucial. Las redes viales y las amenazas de inundación interactúan de modo tal que las carreteras no solo pueden sufrir daños por inundaciones, sino que también pueden aumentar las condiciones peligrosas. Por lo tanto, es sumamente importante considerar la interacción entre carreteras e inundaciones durante los procesos de planificación y diseño a fin de integrar la planificación y el diseño de carreteras con la gestión de riesgos de inundaciones.

La vulnerabilidad de las redes viales es un campo activo de investigación, y existen varios enfoques actuales para evaluar la vulnerabilidad. En este informe se presentaron técnicas de análisis multicriterio, análisis de vialidad e índices de accesibilidad. La elección del método de análisis depende del objetivo, la escala y los datos disponibles; sin embargo, el objetivo principal de todos los métodos es identificar dónde y cómo pueden ser particularmente graves las interrupciones de las redes viales.

El enfoque que debe utilizarse en el análisis de amenazas de inundación depende de la escala, el tipo de inundación, el objetivo del análisis y los datos disponibles. En este informe, se presentó una cantidad no exhaustiva de ejemplos para ilustrar algunos métodos utilizados actualmente para el análisis de amenazas de inundación con foco en las redes viales. La complejidad puede variar desde una modelización hidrológica e hidrodinámica detallada a técnicas más simples de análisis de susceptibilidad para identificar las áreas potencialmente problemáticas. La modelización hidrológica e hidrodinámica ofrece la ventaja de proporcionar información detallada para fines de planificación y diseño, pero tiene la desventaja de que requiere muchos datos. El análisis de susceptibilidad proporciona la posibilidad de abordar áreas más grandes con una cantidad limitada de datos.

En este informe, se presentaron diferentes enfoques para la evaluación de riesgos. Estos incluyen ecuaciones del riesgo, el uso de índices basados en SIG y el uso del análisis multicriterio propuestos en la metodología RIMAROCC. Dada la alta complejidad de las redes viales y los riesgos asociados, el análisis de riesgo puede ser tan complejo como sea necesario e incorporar aspectos como daños a la infraestructura, pérdidas operativas, daño al medioambiente e impactos económicos y sociales.

REFERENCIAS

- Albano, R., A. Sole, J. Adamowski, and L. Mancusi. 2014. "A GIS-Based Model to Estimate Flood Consequences and the Degree of Accessibility and Operability of Strategic Emergency Response Structures in Urban Areas." *Natural Hazards and Earth Systems Sciences* 14: 2847-65. doi:10.5194/nhess-14-2847-2014. <http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/14/2847/2014/>.
- Balijepalli, C., and O. Oppong. 2014. "Measuring Vulnerability of Road Network Considering the Extent of Serviceability of Critical Road Links in Urban Areas." *Journal of Transportation Geography* 39: 145–55. doi:10.1016/j.jtrangeo.2014.06.025. http://eprints.whiterose.ac.uk/82511/1/Analysis_of_Vulnerability_of_Road_Network_v2c_whiterose_version.pdf.
- Benedetto, A., and A. Chiavari. 2010. "Flood Risk: A New Approach for Roads Vulnerability Assessment." *WSEAS Transactions on Environment and Development* 6. <http://www.wseas.us/e-library/transactions/environment/2010/89-839.pdf>.
- Berdica, K. 2002. "TraVIS for Roads: Examples of Road Transport Vulnerability Impact Studies." Royal Institute of Technology, Stockholm. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:9237/FULLTEXT01.pdf>.
- Bil, M., J. Sedonik, J. Kubecek, R. Vodak, and M. Bilova. 2014. Road Network Segments at Risk: Vulnerability Analysis and Natural Hazards Assessment. 1–18. <http://www.population-protection.eu/prilohy/casopis/eng/20/87.pdf>.
- Bles, T., Y. Ennesser, J.-J. Fadeuilhe, S. Falemo, B. Lind, M. Mens, M. Ray, and F. Sandersen. 2010. *Risk Management for Roads in a Changing Climate: A Guidebook to the RIMAROC Method*.
- Brabharan, P., L. M. Wiles, and S. Freitag. 2006. *Natural Hazard Road Risk Management Part III: Performance Criteria*. <http://nzta.govt.nz/resources/research/reports/296/docs/296.pdf>.
- Buren, R. Van, and J. T. Buma. 2012. Investigation of the Blue Spots in the Netherlands National Highway Network.
- CEDR (Conference of European Road Directors). 2012: *Adaptation to Climate Change*. Oslo.
- Cova, T., and S. Conger. 2004. "Transportation Hazards." *Handbook of Transportation Engineering* 1–50. <http://geog.utah.edu/~cova/cova-conger-hte-2004.pdf>.
- Dawod, G. M., M. N. Mirza, K. A. Al-Ghamdi, and R. A. Elzahrany. 2014. "Projected Impacts of Land Use and Road Network Changes on Increasing Flood Hazards Using a 4D GIS: A Case Study in Makkah Metropolitan Area, Saudi Arabia." *Arabian Journal of Geosciences* 7 1139–56. doi:10.1007/s12517-013-0876-7.
- Douven, W.J.a.M, M. Goichot, and H.J. Verheij. 2009. "Best Practice Guidelines for the Integrated Planning and Design of Economically Sound and Environmentally Friendly Roads in the Mekong Floodplains of Cambodia and Viet Nam," synthesis report of the "Road and Floods" project. *Mekong River Commission, Off. Secretariate Phnom Penh*, 35: 143. <http://www.mrcmekong.org/assets/Publications/technical/Tech-No35-Roads-and-Floods.pdf>.
- FEDRO (Federal Roads Office of Switzerland). 2009: *Natural Hazards on National Roads: Risk Concept*. Berne. www.astra.admin.ch.

- Hansson, K., F. Hellman, and M. Larsen. 2010. The Blue Spot Concept. 1–34.
- Jenelius, E., and L. G. Mattsson. 2014. "Road Network Vulnerability Analysis: Conceptualization, Implementation and Application." *Computers, Environment and Urban Systems*. https://people.kth.se/~jenelius/JM_2013.pdf.
- Jones, J. A., F. J. Swanson, B. C. Wemple, and K. U. Snyder. 2000. "Effects of Roads on Hydrology, Geomorphology, and Disturbance Patches in Stream Networks." *Conservation Biology* 14: 76–85. doi:10.1046/j.1523-1739.2000.99083.x. http://myweb.facstaff.wvu.edu/wallin/envr435/jones_etal_2000.pdf.
- Lal, P. N., and V. Thurairajah. 2011. *Making Informed Adaptation Choices: A Case Study of Climate Proofing Road Infrastructure in the Solomon Islands*.
- Luathep, P., P. Suwanno, P. Taneerananon, and C. Engineering. 2013. "Identification of Critical Locations in Road Networks Due to Disasters." 9. <http://eastis.info/on-line/proceedings/vol9/PDF/P42.pdf>.
- Meyer, N. K., W. Schwanghart, O. Korup, and F. Nadim. 2014. "Roads at Risk: Traffic Detours from Debris Flows in Southern Norway." *Natural Hazards and Earth Systems Sciences Discussion* 2: 6623–51. doi:10.5194/nhessd-2-6623-2014. <http://www.nat-hazards-earth-syst-sci-discuss.net/2/6623/2014/>.
- Michael, R. A., N. Høegh, and F. Søren. 2010. "Development of a Screening Method to Assess Flood Risk on Danish National Roads and Highway Systems [Développement d'une méthode d'analyse pour évaluer le risque d'inondation sur les réseaux routiers et autoroutiers danois]. 1–10.
- Suarez, P., W. Anderson, V. Mahal, and T. R. Lakshmanan. 2005. "Impacts of Flooding and Climate Change on Urban Transportation: A Systemwide Performance Assessment of the Boston Metro Area." *Transportation Research Part D Transportation Environment* 10: 231–44. doi:10.1016/j.trd.2005.04.007. http://ced.berkeley.edu/faculty/ratt/readings/ClimateChnage_Sea_LevelRise-references/Suarez_et_al_2005.pdf.
- Susilawati, and M. A. P. Taylor. 2008. "An Accessibility Approach in Assessing Regional Road Network Vulnerability." *31st Australasian Transportation Research Forum* 475–93.
- Tacnet, J.-M., and E. Mermet. 2012. "Analysis of Importance of Road Networks Exposed to Natural Hazards." *Proceedings of the AGILE 2012 International Conference on Geographic Information Science* 24–27. http://www.agile-online.org/Conference_Paper/CDs/agile_2012/proceedings/posters/Poster_Tacnet_Analysis_of_importance_of_road_networks_exposed_to_natural_hazards_2012.pdf.
- Taylor, M. a P., S. V. C. Sekhar, and G. M. D'Este. 2006. "Application of Accessibility Based Methods for Vulnerability Analysis of Strategic Road Networks." *Networks and Spatial Economics* 6: 267–91. doi:10.1007/s11067-006-9284-9. http://lyle.smu.edu/emis/cmml5/Ibarra/DeskTop/PhD_Journals_Used/vulnerability_app_access_road_Taylor_2006.pdf.
- Teo, F. Y., J. Xia, R. A. Falconer, and B. Lin. 2012. "Experimental Studies on the Interaction between Vehicles and Floodplain Flows." 37–41. doi:10.1080/15715124.2012.674040. <http://dx.doi.org/10.1080/15715124.2012.674040>.
- UNISDR (United Nations International Strategy for Disaster Reduction). 2009: *Terminology on Disaster Risk Reduction*. Geneva, Switzerland. http://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologyEnglish.pdf. Accessed May 8, 2014.

- VDOT, UVA, VCTIR, HRPDC, and HRTPO (Virginia Department of Transportation, University of Virginia, Virginia Center for Transportation Innovation and Research, Hampton Roads Planning District Commission, and Hampton Roads Transportation Planning Organization). 2011. *Assessing Vulnerability and Risk of Climate Change Effects on Transportation Infrastructure: Hampton Roads Virginia Pilot*.
- Versini, P. -a., E. Gaume, and H. Andrieu. 2010a. "Assessment of the Susceptibility of Roads to Flooding Based on Geographical Information: Test in a Flash Flood Prone Area (the Gard Region, France)." *Natural Hazards and Earth Systems Sciences* 10: 793–803. doi:10.5194/nhess-10-793-2010. <http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/10/793/2010/nhess-10-793-2010.pdf>.
- 2010b. "Application of a Distributed Hydrological Model to the Design of a Road Inundation Warning System for Flash Flood Prone Areas." *Natural Hazards and Earth Systems Sciences* 10: 805–17. doi:10.5194/nhess-10-805-2010. <http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/10/805/2010/nhess-10-805-2010.pdf>.
- Voumard, J., O. Caspar, M. H. Derron, and M. Jaboyedoff. 2013. "Dynamic Risk Simulation to Assess Natural Hazards Risk along Roads." *Natural Hazards and Earth Systems Sciences* 13: 2763–77. doi:10.5194/nhess-13-2763-2013. <http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/13/2763/2013/nhess-13-2763-2013.pdf>.



GRUPO BANCO MUNDIAL
Desarrollo Social, Urbano y Rural y Resiliencia



Financiado por



GFDRR
Global Facility for Disaster Reduction and Recovery



Australian Government
Department of Foreign Affairs and Trade