



INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

Resiliencia en el transporte de carga: revisión de conceptos e identificación de modelos

Eric Moreno Quintero

Publicación Técnica No. 681
Sanfandila, Qro.
2022

ISSN 0188-7297

Esta investigación se realizó en el Laboratorio Nacional Conacyt de Sistemas de Transporte y Logística (SiT-LOG), dentro de la Coordinación de Transporte Integrado y Logística del Instituto Mexicano del Transporte, por el Dr. Eric Moreno Quintero.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna TI-19/21 “Resiliencia en el transporte de carga: revisión de conceptos e identificación de modelos”.

Se agradece la evaluación del material y las sugerencias aportadas por el Dr. Carlos Martner Peyerlongue, Coordinador de Transporte Integrado y Logística, así como la revisión y los atinados comentarios del Dr. Gastón Cedillo Campos, responsable técnico del SiT-LOG.

Contenido

	Página
Índice de figuras.....	v
Índice de tablas.....	vii
Sinopsis.....	ix
Abstract.....	xi
Resumen Ejecutivo	xiii
Introducción.....	1
1. El concepto de resiliencia.....	5
1.1 Políticas públicas y resiliencia.....	9
2. Resiliencia en el campo del transporte.....	15
2.1 Definición de resiliencia en diversas áreas	17
2.2 Resiliencia en el transporte de carga	20
2.3 La cuestión de la inversión en resiliencia.....	22
3. Métodos para estimar resiliencia.....	25
3.1 Algunas medidas usadas en la práctica.....	25
3.1.1. Probabilidades de eventos disruptivos.....	26
3.1.2. Vulnerabilidad	27
3.1.3. Consecuencias.....	28
3.1.4. Criticidad	29
3.2 La metodología RAMCAP	32
4. Métricas e indicadores para resiliencia	35
4.1 Curvas de recuperación de funcionalidad	37

4.2 Algunos indicadores y métricas de resiliencia.....	41
4.3 Un indicador de resiliencia basado en recuperación de funcionalidad	44
Conclusiones.....	51
Bibliografía	57

Índice de figuras

Figura 3.1. Matriz criticidad-vulnerabilidad para priorizar refuerzo de resiliencia	31
Figura 4.1. Esquema del triángulo de resiliencia.....	35
Figura 4.2. Etapas de una disrupción significativa en la cadena de suministro	36
Figura 4.3. Gráfica general de recuperación de funcionalidad	38
Figura 4.4. Función de recuperación lineal	40
Figura 4.5. Función de recuperación exponencial.....	40
Figura 4.6. Función de recuperación trigonométrica	41
Figura 4.7. Índice de resiliencia referido a la curva de recuperación	45
Figura 4.8. Accidente en Carretera 57 del 30/nov/21 y la recuperación	46
Figura 4.9. Accidente en carretera 57 del 30/nov/21. Una posible curva de recuperación de funcionalidad	47
Figura 4.10. Curva de recuperación de funcionalidad. Ajuste con Excel a una función logarítmica	47
Figura 4.11. Métricas relativas a los niveles de funcionalidad.....	49

Índice de tablas

Tabla 1.1. Usos del término resiliencia en varios campos.....	6
Tabla 2.1. Características comparadas. Transporte de pasajeros y de carga ..	16
Tabla 2.2 Ideas básicas de resiliencia para el sistema de transporte de carga	22
Tabla 3.1. Perfiles de evaluación de criticidad según audiencia objetivo y resultado deseado.....	30
Tabla 4.1. Ejemplos de indicadores y métricas de agencias norteamericanas .	43
Tabla C.1. Algunas definiciones de resiliencia relacionadas con sistemas de transporte	52
Tabla C.2. Estrategias AASHTO para construir o reforzar la resiliencia en sistemas de transporte	54

Sinopsis

En los inicios del siglo XXI, en el transporte de carga se han visto fuertes alteraciones derivadas de causas naturales (clima extremo, sismos, etc.) o humanas (terrorismo, huelgas, etc.). La Pandemia de COVID en 2019, con impactos inusitados, afectó sustancialmente la salud y la actividad económica del país. La falta de experiencia ante tal pandemia, que requería medidas masivas para la prevención y la distribución de insumos, fue un factor relevante en algunas respuestas ineficientes a la problemática.

Estas experiencias han motivado a la investigación en el transporte a extender el análisis tradicional del riesgo, hacia nuevos temas como la resiliencia y la sostenibilidad. La resiliencia, en general, significa la capacidad de un sistema de recuperarse y volver a la normalidad luego de una perturbación súbita y desmesurada.

Este trabajo hace una revisión amplia del concepto de resiliencia, enfatizando su relación con el transporte, y da una definición propia. La intención es orientar la discusión metodológica para diseñar estrategias y acciones útiles en la recuperación de sistemas de transporte afectados por interrupciones inesperados y desmesuradas. Se resumen también, algunas métricas y estrategias usadas en la práctica para reforzar la resiliencia en el transporte, de uso potencial en el contexto nacional.

Abstract

At the beginning of the 21st century, freight transport has seen strong alterations coming from natural causes (extreme weather, earthquakes, etc.) or human causes (terrorism, strikes, etc.). The COVID Pandemic in 2019, with unusual impacts, substantially affected the country's health and economic activity. The lack of experience in the face of such a pandemic, which required massive measures for the prevention and distribution of supplies, was a relevant factor in some inefficient responses to the problem.

These experiences have motivated to the transport research to extend traditional risk analysis to new topics such as resilience and sustainability. Resilience, in general, means the ability of a system to recover and return to normal after a sudden and disproportionate disturbance.

This work makes a broad review of the concept of resilience, emphasizing its relationship with transportation, and gives its own definition. The aim is to guide the methodological discussion to design strategies and useful actions in the recovery of transportation systems affected by unexpected and disproportionate disruptions. It also summarizes some metrics and strategies utilized in practice to reinforce resilience in transport, of potential use in the national context.

Resumen ejecutivo

En las últimas décadas del siglo XX y en lo que va del presente siglo, varios sistemas de transporte han sufrido diversos impactos en su operación derivados de eventos naturales extremos (terremotos, inundaciones, etc.) o actividad humana (sabotaje, terrorismo, bloqueos, accidentes navieros, etc.), en un contexto donde el evento disruptivo surge inesperadamente y con magnitud desproporcionada.

En 2019 surgió la Pandemia de COVID-19 que se extendió mundialmente y generó impactos que no se habían visto antes; con fuertes impactos económicos, afectaciones en salud y sus servicios asociados, y muchos impactos más ya conocidos. Como consecuencia, la demanda de muchos servicios se redujo dramáticamente, como fue el transporte aéreo de pasajeros, y la distribución de carga se modificó notablemente, enfrentando escasez de recursos como vehículos, operadores o contenedores en el movimiento intermodal.

La falta de experiencia para enfrentar semejante pandemia fue un factor fundamental que determinó algunas respuestas poco eficientes a la problemática, como se observó, por ejemplo, durante la escasez de contenedores en el transporte marítimo, causado por el desfase de la producción en Asia y los sistemas productivos de Europa y América en 2020 (T21, 2021). El fenómeno COVID-19 y los desafíos que plantea han motivado a la investigación en el transporte a reflexionar sobre la necesidad de ampliar el enfoque tradicional para manejar los eventos disruptivos, que considera el análisis del riesgo y la seguridad vial, para mirar hacia nuevos temas como la *resiliencia* y la sostenibilidad.

El término *resiliencia*, en general, se refiere a la capacidad de un sistema o componente de recuperarse al afrontar una perturbación de gran escala, y regresar a su operación normal. Existen diversidad de definiciones de *resiliencia*, en campos tan diversos como: Ecología, enfocada en los ecosistemas que se recuperan de alguna devastación inesperada; Psicología, interesada en la recuperación de la salud mental de una persona que ha sufrido un trauma severo; Ingeniería, en relación a la recuperación del estado físico de los materiales que han sufrido fuerzas desmedidas de deformación; y algunas definiciones más en otras disciplinas.

En este trabajo se hace una revisión amplia del concepto de resiliencia, enfatizando los enfoques hacia los sistemas de transporte, y se propone una definición propia, con la intención de que esta definición pueda ser punto de partida en las discusiones para el desarrollo de metodologías encaminadas a implementar estrategias y acciones útiles en la recuperación de la funcionalidad de sistemas de transporte que han sido afectados por eventos disruptivos inesperados y de magnitud desproporcionada.

El capítulo 1 inicia revisando el concepto de resiliencia desde su etimología misma, para diferenciar con claridad sus interpretaciones posteriores. Varias definiciones del término encontradas en diversos campos: Ecología, Ciencias Sociales, Tecnología e Ingeniería.

Particularmente para ingeniería, se define la resiliencia para sistemas de infraestructura como *la eficacia de un sistema de infraestructura para anticipar, absorber, adaptarse y/o recuperarse con rapidez de un evento disruptivo potencial*, y para el sistema de transporte de carga, como *la aptitud del sistema de transporte de carga para absorber y reducir los impactos de las interrupciones. Esta aptitud tiene tres dimensiones relevantes: la infraestructura, las agencias de gestión y los usuarios del sistema.*

En este capítulo también se analiza la relevancia del concepto de resiliencia para las políticas públicas. Los distintos niveles de gobierno, responsables de atender las interrupciones bruscas e inesperadas de la operación en diversos sistemas, han mostrado un interés cada vez mayor en definir y utilizar el concepto de resiliencia para robustecer sus sistemas de respuesta.

Así, por ejemplo, en México el Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred), publicó en 2018 “La Resiliencia en la Gestión Integral del Riesgo”, que describe la gestión integral del riesgo como las acciones dirigidas a identificar, analizar, evaluar, controlar y reducir los riesgos, considerando su carácter multifactorial en un proceso continuo de construcción. El documento adopta la definición de resiliencia de la Ley General de Protección Civil (Cenapred, 2018):

Resiliencia: Es la capacidad de un sistema, comunidad o sociedad potencialmente expuesta a un peligro para resistir, asimilar, adaptarse y recuperarse de sus efectos en un corto plazo y de manera eficiente, a través de la preservación y restauración de sus estructuras básicas y funcionales, logrando una mejor protección futura y mejorando las medidas de reducción de riesgos. (LGPC; Art. 2, fracc. XLVIII)

Definiciones del término de agencias gubernamentales británicas y norteamericanas también se comentan en el capítulo 1.

El capítulo 2 examina el uso del concepto de resiliencia en el campo del transporte. Comenzando con una comparación de las características que diferencian al transporte de carga del de pasajeros, se plantea la identificación de vulnerabilidades con base a estas características particulares.

Enseguida se revisan las definiciones del término resiliencia en diversas áreas, y se identifican los cuatro atributos deseables en el sistema de transporte que permiten mejorar la resiliencia, a saber (Cimellaro et al, 2010):

1. Robustez. Es la capacidad de los sistemas de resistir cierto nivel de tensión sin experimentar pérdida de funcionalidad.

2. Inventiva. Es la capacidad de identificar problemas, establecer prioridades y movilizar recursos disponibles cuando hay amenazas que puedan provocar una interrupción brusca del sistema.
3. Redundancia. Es la capacidad de disponer de rutas alternas en el sistema con las que se puedan redirigir los servicios para tener operación continua.
4. Rapidez. Es la capacidad de acatar las prioridades y alcanzar los objetivos del sistema a tiempo, para reducir pérdidas y evitar futuras interrupciones.

Un aspecto interesante encontrado en el capítulo 2, es que más allá de las consideraciones ya conocidas de respuesta a los eventos disruptivos asociados al cambio climático, ya empieza a adoptarse un enfoque holístico para tratar las disrupciones inesperadas y de magnitud desproporcionada:

Cuando surge un evento de este tipo para el transporte de carga, sea por causas naturales (inundaciones, huracanes, terremotos, etc.) o humanas (huelgas de operadores, sabotajes, escasez de equipo de arrastre, etc.), el enfoque de resiliencia siempre plantea la secuencia siguiente:

- a) Que el sistema afectado pueda resistir en alguna medida el impacto,
- b) Que pueda recuperar la funcionalidad y
- c) Que logre volver al nivel de servicio original.

Esa secuencia es la misma, independientemente del tipo de causa que provoca la disrupción, por lo que la definición de resiliencia para el transporte de carga no debería referirse a un tipo de causa. Esta reflexión es afín con la propuesta para gestión del riesgo propuesta por la AASHTO de 2017, de desarrollar protocolos generales aplicables a cualquier evento disruptivo.

Con base en la discusión previa sobre la resiliencia y sus varias interpretaciones en otros campos, en este trabajo se propone la siguiente definición.

Definición. *Resiliencia del sistema de transporte de carga es la capacidad conjunta de sus componentes: infraestructura, vehículos y organización, para resistir hasta cierto grado el impacto de cualquier disrupción súbita y desmesurada, adaptarse al cambio y recuperar la operación normal en un tiempo acorde a la magnitud del impacto. La resiliencia, al ser una capacidad, tiene como límite la destrucción del sistema por el impacto disruptivo.*

En la definición, “cualquier disrupción” incluye amenazas a la infraestructura física y a la operación derivadas de fuerzas naturales y también por acciones humanas como sabotaje, terrorismo, ataques a la ciberseguridad, o accidentes graves.

El capítulo 2 concluye revisando los aspectos relevantes del concepto de resiliencia que pueden ayudar a la toma de conciencia en la asignación de recursos para invertir en la construcción o refuerzo de la resiliencia en sistemas de transporte, y que es muy necesaria cuando los recursos financieros escasean.

El capítulo 3 revisa métodos para estimar resiliencia, identificando algunas medidas que se han reportado en la práctica y que cubren cuatro aspectos esenciales a considerar cuando surge un evento disruptivo:

1. La probabilidad de eventos disruptivos por causas naturales (clima, terremoto, ciclón, etc.) a la que también se le llama “exposición”;
2. La vulnerabilidad -también llamada “sensibilidad”- del sistema de transporte a daño severo o interrupciones;
3. Las consecuencias de un nivel particular de daño o interrupción, usualmente referidas como la suma de los costos de los dueños de la infraestructura o sistema y los costos de los usuarios; y
4. La criticidad o relevancia de la infraestructura o el sistema, en referencia a la utilización y otras medidas que reflejan la importancia de un activo, nodo, red o sistema en términos económicos y sociales más amplios.

Para concluir, el capítulo 3 comenta el uso de la metodología RAMCAP: (*Risk Analysis and Management for Critical Asset Protection* (Análisis y Gestión del Riesgo para Protección de Activos Críticos) originalmente desarrollada por la American Society of Mechanical Engineers (ASME), como un procedimiento completo, consistente y objetivo para evaluar el riesgo para diversos tipos de activos e infraestructuras y posibles peligros (National Academies of Sciences, 2021).

La metodología RAMCAP y su más reciente versión en el software RAMCAP Plus es un proceso de gestión de la resiliencia y de riesgos de todo tipo para protección de infraestructuras críticas. Su objetivo es identificar y dar prioridad a las inversiones necesarias para proteger las infraestructuras críticas a nivel nacional, buscando evitar eventos disruptivos y su impacto, así como fortalecer la resiliencia para recuperar con rapidez el funcionamiento después de las interrupciones.

RAMCAP considera todos los peligros previsible, incluyendo desastres naturales, terrorismo, sabotaje, dependencias de las cadenas de suministro, eventos de contaminación de productos y proximidad a sitios peligrosos. Es un enfoque general, diseñado específicamente para ser usado por el personal y la administración de los activos de infraestructura, con un mínimo de capacitación o requerimientos de experiencia externa. Resulta particularmente eficaz cuando se adapta a un sector específico, como puede ser el de la energía, el de suministro de agua o los ambientes universitarios.

El capítulo 4 hace una revisión de métricas e indicadores para resiliencia que se han usado en la práctica.

Ya que la resiliencia en el sistema de transporte reduce la probabilidad de sufrir interrupciones, la magnitud de los impactos y el tiempo para la recuperación, el enfoque hacia la medición se basa en dos aspectos relevantes del sistema: la funcionalidad y la recuperación posterior al evento disruptivo.

Una forma de visualizar la resiliencia del sistema de transporte es estimar su funcionalidad luego de un desastre y medir el tiempo requerido para volver al estado de normalidad. Esto se ha representado gráficamente por el llamado *triángulo de resiliencia* que se ilustra en la figura 4.1 del capítulo 4.

Siguiendo con esta línea de análisis, se comentan las *curvas de recuperación de funcionalidad*, que permiten cuantificar la resiliencia y algunas métricas para el evento disruptivo. Estas curvas muestran el nivel de desempeño o funcionalidad del sistema $f(t)$ a lo largo del tiempo, el cual cambia en el momento de la disrupción a un *nivel mínimo* f_{MIN} que empieza a recuperarse durante un lapso determinado hasta llegar al *nivel objetivo* f_{OBJ} de la recuperación, el cual pudiera ser algo menor que el 100% de funcionalidad inicial, pero de una magnitud que los planificadores consideran aceptable.

Puesto que las curvas de recuperación de funcionalidad miden en cualquier instante de tiempo el porcentaje de desempeño del sistema, cuando el evento disruptivo reduce ese desempeño al *nivel mínimo*, es posible cuantificar el porcentaje de desempeño promedio que se tiene en el periodo de recuperación hasta que se logra el *nivel objetivo* aceptable por los planificadores.

Con este enfoque cuantitativo se ha propuesto el *índice de resiliencia IR*, basado en las curvas de recuperación de funcionalidad como:

$$IR = f_{PROM} = \frac{1}{t_N - t_e} \int_{t_e}^{t_N} f(t) dt$$

t_e = tiempo de inicio de la disrupción; t_N = tiempo de vuelta a la normalidad

Aquí también se hace notar que, al término de la recuperación, el nivel final de funcionalidad del sistema puede ser menor al 100% usual antes de la disrupción, e incluso puede ser que el sistema jamás logre el desempeño que tenía antes de la disrupción.

Un ejemplo de esta situación es el puerto japonés de Kobe. Antes del sismo de 1984, Kobe era el 6º. puerto de contenedores más grande del mundo, en cuanto a movimiento de carga; para 1997, cuando las reparaciones fueron completadas, Kobe había caído al lugar 17, y en 2005 aparecía en el lugar 35 (Cimellaro et al, 2019; Wikipedia, 2022).

Por otra parte, el nivel de recuperación final f_{FIN} también podría ser mayor al 100% de la funcionalidad original, cuando se aprovecha la oportunidad de las actividades de recuperación para actualizar, modernizar o mejorar al sistema original y obtener una mayor funcionalidad que la original.

Luego del capítulo 4, la sección de conclusiones resume los principales hallazgos del trabajo.

Particularmente se hace notar que, en todas las definiciones revisadas, la resiliencia vista como capacidad de recuperarse luego de un evento disruptivo inesperado y de magnitud inusual, implícitamente significa que un sistema resiliente tarde o temprano se recuperará.

En la realidad, sin embargo, la resiliencia siempre tiene una cota, más allá del cual se desvanece cuando el sistema en cuestión ya no se recupera, es decir cuando el impacto logra la extinción total del sistema y lo destruye de modo irreparable. Este aspecto se ha incluido en la definición que se propone para la resiliencia en este trabajo.

Muestra de lo anterior han sido, por ejemplo: el accidente del Transbordador Espacial Challenger, en enero de 1986; el ataque a las Torres Gemelas en Nueva York de septiembre de 2011, o la erupción del volcán submarino en la Isla de Hunga Tonga en el Pacífico Sur en enero de 2022, que destruyó buena parte de esa isla.

Pese a esta observación sobre los límites físicos de los sistemas y el alcance del concepto de resiliencia, el estudio de ésta y las metodologías para mejorarla en los sistemas de transporte son tema de actualidad y gran interés, del cual aún queda bastante por discutir e investigar.

Introducción

La actividad económica del país, se sustenta en las cadenas de suministro y su desempeño logístico, para asegurar el abasto de bienes para la población y el de insumos para la industria y el comercio. En este entorno, el transporte de carga es el elemento imprescindible que conecta físicamente la oferta con la demanda.

Tener una operación segura y confiable del transporte de carga es una condición necesaria que precede al mejoramiento de la eficiencia y la optimización de las operaciones de carga, y de ahí la importancia de la seguridad vial. El enorme interés actual por la seguridad vial se resume en la propuesta de la Asamblea General de la ONU de agosto de 2020 en la cual:

Proclama el período 2021-2030 Segundo Decenio de Acción para la Seguridad Vial, que tendrá por objetivo reducir las muertes y lesiones causadas por accidentes de tráfico por lo menos en un 50 % de 2021 a 2030, y, a este respecto, exhorta a los Estados Miembros a que sigan adoptando medidas hasta 2030 con respecto a todas las metas de los Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionadas con la seguridad vial (ONU, 2020)

México ha seguido los lineamientos del proyecto de la ONU, integrando en el Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes 2020 – 2024, la estrategia prioritaria de mejorar la seguridad vial en la Red Carretera Federal.

Sin embargo, a pesar de su relevancia para el bienestar social y la conservación de infraestructura, la seguridad vial no es el único objetivo deseable para una operación confiable del transporte de carga.

En el contexto de la logística y de los impactos en la confiabilidad ocasionados por eventos naturales extremos (terremotos, inundaciones, etc.) o por actividades humanas (sabotaje, terrorismo, bloqueos, etc.), en 2019 surgió la Pandemia de COVID-19 con un impacto que no se había visto en mucho tiempo; con enormes afectaciones en la actividad económica, en la salud de la población, en el acceso a servicios de salud y muchos más ya conocidos. La falta de experiencia para enfrentar una pandemia como esta fue un factor relevante que determinó algunas respuestas no muy adecuadas a la problemática.

El fenómeno COVID-19 y los desafíos planteados a la comunidad logística, ha motivado a reflexionar cómo la investigación sobre seguridad y confiabilidad en el transporte, que tradicionalmente ha abordado temas de análisis de riesgo o de seguridad vial, ha incursionado en nuevos tópicos como la resiliencia y la sostenibilidad.

El término resiliencia, de modo muy amplio, se ha referido a la capacidad de un sistema de recuperarse luego de una perturbación de gran escala, como son desastres naturales o incidentes provocados por la actividad humana. Se ha utilizado con significados relativamente parecidos en Ingeniería, Ecología, Psicología, Cadena de Suministro y otras áreas.

El notable interés que el concepto de resiliencia ha generado tanto en la academia como en la industria en varias áreas de investigación al inicio del siglo XXI ha generado varios estudios sobre resiliencia en el transporte, adoptando diversos enfoques. Como consecuencia de esto han surgido distintas maneras de definir y describir la resiliencia en sistemas de transporte.

En una visión del transporte relacionada con su infraestructura, J-P Rodrigue propone la definición siguiente:

*La eficiencia de una red de transporte también está relacionada a su **resiliencia**, que es su capacidad de soportar interrupciones mientras mantiene un nivel de servicio y su conectividad. (Rodrigue, J.P., 2020).*

La definición es muy concisa, pero no es claro si supone que se puede dar una interrupción total del servicio, lo que en la realidad ha ocurrido en varios casos.

En otra iniciativa, Weiland, Strong y Miller ofrecen la siguiente descripción de un sistema resiliente:

Un sistema de transporte resiliente es aquel en el cual los activos críticos no están expuestos a riesgos extremos o, en caso que lo estén, existe suficiente capacidad para mitigar los impactos de un impacto extremo (Weiland, S., Strong, A. and Miller, B.M., 2019).

El artículo de Weiland et al, expone además un problema que es común para la puesta en práctica de cualquier tipo de planeación en sistemas de transporte: *la carencia de pautas para incluir la perspectiva de resiliencia en la planeación del transporte*; su referencia es al sistema de transporte estadounidense:

La legislación vigente requiere que se tome en cuenta la resiliencia, pero no da guía alguna de cómo incluirla en el proceso de planeación del sistema de transporte (Weiland, S., Strong, A. & Miller, B.M., 2019).

En el contexto de la cooperación internacional, en 2018, la XXXII *North American Transportation Statistics Interchange (NATSI)* donde México participa con Estados Unidos y Canadá, estableció el *Freight Transportation Working Group (FTWG)* que reunió a los participantes relacionados con transporte carga en los tres países (Moreno, E. y Gradilla, L., 2018).

Dentro del plan estratégico del FTWG de NATSI se especificó la necesidad de medir el desempeño del transporte terrestre de carga en corredores relevantes

en cada país. De ahí surgió la propuesta de revisar los conceptos de *fluidez, resiliencia y vulnerabilidad*, de los cuales sólo ha habido avances en el primero.

El interés de los tres países en trabajar el tema de resiliencia en particular, se ha reforzado por los impactos de la Pandemia de COVID-19, y se espera más colaboración en ese tema.

La variedad de enfoques y definiciones de resiliencia en el transporte hallada en la literatura, plantea realizar una revisión crítica del concepto en las diversas áreas donde se utiliza, para aprovechar lo que sea pertinente para el transporte de carga, y que sirva de apoyo a la planeación del transporte nacional.

El IMT, en su misión de *proveer soluciones al sector transporte y logístico en México, que aporten a su seguridad, sustentabilidad y competitividad*, desarrolló esta investigación sobre resiliencia en el transporte de carga, para tener un esquema de definiciones de resiliencia, variantes, métricas y posibles índices útiles para la planeación del transporte de carga, y que sean la base de un desarrollo propio adecuado a la realidad del país.

Esta línea de investigación es afín al Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes 2020-2024, en las Acciones Puntuales siguientes (SCT, 2020):

1.1.6 Actualizar los sistemas de gestión de los activos carreteros como mecanismo de preservación del patrimonio vial.

1.1.8 Incorporar e integrar la gestión de riesgos de desastres para preservar el patrimonio vial de la Red Carretera Federal.

Para el IMT, este proyecto extiende la experiencia de sus investigadores en el tema de resiliencia y planeación del sistema de transporte de carga en México y permitirá actualizar las líneas de investigación relacionadas.

1. El concepto de resiliencia

Este trabajo examina el término *resiliencia* desde sus inicios reportados en la literatura, hasta su referencia actual acerca de la recuperación física y operativa de sistemas de transporte que, luego de impactos severos y abruptos, han reducido sustancialmente su funcionamiento.

La idea más general sobre resiliencia se asemeja al mito del ave fénix de la mitología griega. El Oxford English Dictionary (OED) describe el mito así:

En la mitología clásica: es un ave parecida a un águila, pero con un suntuoso plumaje rojo y dorado, que se dice vive quinientos o seiscientos años en los desiertos de Arabia, antes de quemarse a sí misma y reducirse a cenizas sobre una pira funeraria encendida por sol, y que abanica con sus propias alas, solamente para resurgir de sus cenizas con juventud renovada, para vivir un nuevo ciclo. (OED, 2021)

Es de esta idea general de afrontar eventos desastrosos para resurgir y continuar con experiencia aumentada, así como de detalles particulares encontrados en diversos campos, que este trabajo busca aclarar el significado de resiliencia en el transporte, para tener elementos útiles que sustenten su planeación.

El Diccionario de la lengua española de la Real Academia Española (RAE) define la resiliencia como sigue (RAE, 2021).

resiliencia

Del ingl. resilience, y este der. del lat. resiliens, -entis, part. pres. act. de resilīre 'saltar hacia atrás, rebotar', 'replegarse'.

1. f. Capacidad de adaptación de un ser vivo frente a un agente perturbador o un estado o situación adversos.

2. f. Capacidad de un material, mecanismo o sistema para recuperar su estado inicial cuando ha cesado la perturbación a la que había estado sometido.

La Academia Mexicana de la Lengua (AML) da esta descripción (AML, 2021).

[...] ¿Qué significa la palabra resiliencia?

La palabra resiliencia se usa para referirse a la capacidad que tienen los cuerpos de recuperar su estado físico después de haber sido sometidos a la acción de alguna fuerza. A partir de este significado, también hace referencia a la capacidad de los seres humanos para sobreponerse a acontecimientos dolorosos, traumáticos o desestabilizadores.

La descripción de la AML extiende la idea de recuperación a los seres humanos; extensiones hacia otras áreas de conocimiento han surgido de modo parecido.

La tabla 1.1 resume brevemente el significado de resiliencia en diversos campos, obtenido de una búsqueda desambiguación del término (Wikipedia, 2021).

Tabla 1.1 usos del término resiliencia en varios campos

Campo	Significado
Ecología	Resiliencia ecológica, la capacidad de un ecosistema de recuperarse de una perturbación.
	Resiliencia climática, la capacidad de los sistemas de recuperarse de los cambios climáticos.
	Resiliencia del suelo, la capacidad de un suelo de mantener un estado saludable en respuesta a influencias desestabilizadoras.
Ciencias sociales	Resiliencia en el arte, la peculiaridad del trabajo artístico de mantenerse relevante a lo largo del tiempo.
	Resiliencia organizacional, la habilidad de un sistema para enfrentar los cambios en su medio ambiente y continuar en funciones.
	Resiliencia psicológica, la capacidad de un individuo de adaptarse frente a condiciones adversas.
	Resiliencia en la cadena de suministro, la capacidad de una cadena de suministro de persistir, adaptarse, o transformarse ante el cambio.
	Resiliencia urbana, la capacidad adaptativas de los sistemas urbanos complejos para administrar el cambio, el orden y el desorden a lo largo del tiempo.
Tecnología/ ingeniería	Resiliencia (ingeniería y construcción), la capacidad de los edificios y de la infraestructura de absorber embestidas sin sufrir colapso total.
	Resiliencia (ciencia de materiales), la capacidad de un material de absorber energía cuando es deformado por un esfuerzo, y liberar esa energía cuando cesa ese esfuerzo.
	Resiliencia (redes), la capacidad una red de computadoras de mantener el servicio ante la presencia de fallas.
	Resiliencia (sistemas de infraestructura), la eficacia de un sistema de infraestructura para anticipar, absorber, adaptarse, y/o recuperarse con rapidez de un evento disruptivo potencial.

Fuente: Elaboración propia con información de Wikipedia (2021)

En todos los casos, la idea general de resiliencia en cada campo, se refiere a la capacidad que tenga el objeto afectado por un cambio brusco e inesperado, de mantenerse en la normalidad o de regresar a ella en un tiempo razonable.

El Stockholm Resilience Centre de la Universidad de Estocolmo en Suecia da una de las definiciones más generales y concisas sobre resiliencia, aplicable a muchos sistemas: “*Resiliencia es la capacidad de poder enfrentar el cambio y continuar desarrollándose*” (Stockholm Resilience Centre, 2022).

McAslan (2010) hace notar el interés que la idea de resiliencia ha despertado en los medios académicos, profesionales y de política gubernamental, por su aplicabilidad a las distintas problemáticas de interés para estos grupos:

El concepto de resiliencia es atractivo para los que hacen políticas, para los profesionales y para los académicos. Sugiere una habilidad de algo o de alguien para recuperarse y regresar a la normalidad luego de haber confrontado una amenaza anormal, alarmante y con frecuencia inesperada. El término se ha usado para cuestiones de seguridad a fin de comprender cómo los gobiernos, las autoridades locales y los servicios de emergencia pueden responder de la mejor manera a las amenazas del terrorismo, los desastres naturales, las pandemias y otros desafíos disruptivos (McAslan, A. 2010).

McAslan identificó la introducción de la palabra *resiliencia* en la lengua inglesa a principios del siglo XVII, derivada del latín *resiliere* que significa rebotar o hacer retroceder (refiriendo la 10ª. edición del *Concise Oxford Dictionary*). No encontró evidencias del uso del término resiliencia en el ámbito académico sino hasta 1818, en un trabajo de Tredgold, que describe una propiedad de la madera para explicar por qué ciertos tipos de maderos resisten cargas severas y repentinas sin romperse.

Durante la década de 1850, Robert Mallet usó el concepto de resiliencia como una forma de medir y comparar el esfuerzo en los materiales para construir barcos de la Armada Real. Con este antecedente, Mallet desarrolló la medida que se conoce como *módulo de resiliencia*, una manera de evaluar la capacidad de los materiales de resistir condiciones severas. Mallet lo definió como la energía necesaria para romper un material como resultado de una fuerza que se aplica. En 1856 Mallet envió un reporte al Almirantazgo británico, en el que usó el concepto para explicar el alargamiento permanente de los cañones de bronce, por el fuerte contraste entre la gran expansión que sufre el cañón y la pequeña capacidad de recuperación elástica (resiliencia) que éste tiene.

El módulo de resiliencia se usó también para evaluar el uso de materiales adecuados para edificios públicos y hogares. El Instituto Británico de Ingenieros Civiles aceptó esa nueva medida incluyendo el módulo de resiliencia definido por Mallet, en su *Manual de Ingeniería Civil de 1867*. Actualmente, la Mecánica de Materiales define el módulo como “la capacidad de un material de absorber y liberar energía, dentro del rango elástico” (McAslan, A. 2010).

En el contexto de las cadenas de suministro, Falasca et al (2008) definen *resiliencia* como una extensión del concepto tradicional de *resistencia* que se refiere a las medidas y acciones encaminadas a fortalecer el desempeño de la infraestructura y las operaciones para reducir pérdidas ocasionadas por desastres, enfatizando que

la resistencia realza la importancia de los elementos de mitigación *antes de un desastre*, mientras que la resiliencia se enfoca en las mejoras en adaptabilidad y desempeño de la cadena de suministro posterior al desastre, a fin de lograr reducir las probabilidades de interrupciones, sus impactos y el tiempo necesario para la recuperación de la cadena..

Pérez y Garnica (2015) señalan el significado que el término resiliencia tiene en la ingeniería civil, según el idioma de la literatura consultada. Tanto en español como en francés, la resiliencia se entiende como “[...] *la capacidad de un material de recobrar su forma original después de someterse a una presión deformadora [...]*”, mientras que en la literatura anglosajona se refiere a “[...] *la tendencia a volver un estado original o el tener poder de recuperación. En Norteamérica se define como la propiedad que tiene una pieza mecánica para doblarse bajo carga y volver a su posición original cuando ésta ya no actúa.*” (Pérez, N, y Garnica, P., 2015)

En el campo de la Ecología y del medio ambiente, el primero en definir de manera formal el concepto fue Crawford Hotelling, en su artículo *Resiliencia y Estabilidad de Sistemas Ecológicos* de 1973, donde define la resiliencia de un ecosistema como la capacidad de éste para absorber los cambios y seguir existiendo (National Academy of Sciences, 2021, p. 60). En su análisis, Hotelling compara la idea de resiliencia con la de estabilidad, entendida ésta como la capacidad del sistema de regresar a su estado de equilibrio luego de una perturbación temporal, y concluye que tanto resiliencia como estabilidad son dos propiedades de gran importancia para los ecosistemas.

Algunos ecologistas, como Richard Klein, cuestionaron el trabajo de Hotelling observando que, para un ecosistema, la idea de regresar a un estado de equilibrio inicial pudiera no ser aplicable, ya que éstos evolucionan con el tiempo en respuesta a las influencias externas que los afectan.

De estos primeros trabajos surgieron varias perspectivas del concepto de resiliencia en Ecología, llegando en ciertos casos a considerar como objeto de estudio a sistemas socio-ecológicos que incluyen al medio ambiente, a la población humana y a su cultura. Ejemplo de esta postura es la organización *Resilience Alliance*, una red global interdisciplinaria de científicos y profesionistas que colaboran para estudiar la dinámica de los sistemas socio-ecológicos (McAslan, A. 2010).

Estudios de la conducta humana también han usado el concepto resiliencia para evaluar qué tan bien las personas encaran situaciones traumáticas. Los primeros trabajos fueron en niños, pero el enfoque se extendió al estudio de la capacidad de los adultos de manejar situaciones anormales, en particular en ambientes bélicos, desastres naturales o incluso siniestros como los accidentes de tráfico.

Aunque en el campo de la conducta humana también hay variedad de definiciones, dos temas que parecen ser de aceptación general son: la adaptabilidad y la disfunción transitoria. La adaptabilidad se refiere a la disposición y el deseo de un individuo de adaptarse a una situación adversa; los individuos adaptables tienen

más probabilidad de reducir sus riesgos al exponerse a eventos disruptivos, que los individuos no adaptables. La disfunción transitoria significa la aceptación de que, al encarar un evento anormal y disruptivo, un individuo inevitablemente será disfuncional por algún tiempo, y después regresará a su funcionamiento normal.

El concepto de resiliencia se ha extendido también a entes colectivos, como comunidades y organizaciones.

La noción de resiliencia usada en comunidades humanas tiene más complejidad, ya que participan individuos, familias y colectividades que interactúan entre ellos y con el medio ambiente. Muchos de los estudios en esta área se enfocan en las formas de reducir la vulnerabilidad de las comunidades, tales como el acceso a la información y el conocimiento, la integración de redes de apoyo, el cultivo de valores comunitarios compartidos, y la capacidad y disposición de las comunidades para adaptarse. El concepto de resiliencia en comunidades depende de la interacción social y de la actividad colectiva, las cuales se fundamentan en redes de relaciones, actitudes de reciprocidad, confianza y normas sociales (McAslan, A. 2010).

En iniciativa privada, la noción de resiliencia fue primeramente asociada con la necesidad empresarial de responder con rapidez a un ambiente de negocios cambiante. Hamel y Välikangas, en su artículo *The Quest for Resilience* publicado en el Harvard Business Review en 1973, señalaron que las organizaciones exitosas serían aquellas que entendieran la naturaleza dinámica de su ambiente de negocios (competidores, tecnología, financiamiento, impuestos, política gubernamental, y las necesidades y expectativas de sus clientes), y que a la vez fueran capaces y estuvieran dispuestas para adaptarse a cambios considerables y repentinos de su ambiente (McAslan, A. 2010).

1.1 Políticas públicas y resiliencia

En muchos países, las políticas en distintos niveles de gobierno, se han interesado en incluir el término resiliencia dentro de los planes para atender interrupciones bruscas de la operación de diversos sistemas, y su correspondiente recuperación.

Confirmando esta tendencia, McAslan (2010) destaca el hecho de que el gobierno británico ha revisado sus leyes de contingencias civiles, doctrinas y planes, enfocándose en el concepto de resiliencia. En el campo del transporte, por ejemplo, el *Department for Transport* británico, en una revisión del concepto de resiliencia en redes de transporte enfrentadas a eventos climáticos extremos, define la resiliencia como (Department for Transport, 2014):

Resiliencia en el contexto de este Reporte puede ser descrita como la capacidad de la red de transporte para soportar los impactos del clima extremo, operar frente a tal evento climático y recuperarse rápidamente de sus efectos. Como tal, adoptamos la perspectiva de que la resiliencia frente al clima extremo se maneja en tres niveles:

- *Se trata de aumentar la resiliencia física de los sistemas de transporte frente a eventos climáticos extremos, de modo que cuando éstos se presenten, las personas y las cargas continúen moviéndose.*
- *Sería muy difícil y prohibitivamente caro asegurar una resiliencia física total, por lo que, en segundo lugar, igualmente se trata de asegurar procesos y procedimientos para restaurar las rutas en los servicios a la normalidad tan rápido como sea posible una vez que los eventos de clima extremo hayan desaparecido.*
- *En tercer lugar, como parte de esto, es esencial asegurar la comunicación clara y efectiva para pasajeros y usuarios del transporte con el fin de que el impacto de la disrupción sobre la población y los negocios sea mínimo.*

En la definición anterior, resulta claro que no puede asegurarse en la práctica una inmunidad total ante los eventos climáticos extremos, de modo que habrá algunas afectaciones; sin embargo, se hace énfasis en promover la restauración de manera eficiente y lo más pronto posible.

Una cuestión relevante en el reporte británico es la del nivel de resiliencia adecuado en una red de transporte, considerando la intensidad de la demanda y su temporalidad. Por ejemplo, en una carretera con gran demanda incluso una hora de interrupción del tráfico por condiciones climáticas extremas, puede afectar a miles de usuarios, mientras que el cierre temporal de un ramal ferroviario que tiene rutas alternas es menos disruptivo, aun cuando el cierre continúe por varios días. De esta manera, se sugiere que el nivel de resiliencia se relacione con la intensidad de uso, la existencia de alternativas y la importancia económica de la ruta o del servicio.

En los Estados Unidos, el interés por discutir la resiliencia en sistemas de transporte tomó un nuevo ímpetu luego de los ataques de septiembre de 2011 en Nueva York, lo que motivó al Congreso, al Departamento de Seguridad Interior, a otras agencias federales y estatales, así como a la Academia Nacional de Ciencias, a examinar el tema y resolver una variedad de tópicos alrededor de la seguridad en el transporte.

En 2012, la Academia Nacional de Ciencias norteamericana, publicó el informe: *Disaster Resilience: A National Imperative (National Research Council, 2012)*, donde señala de manera realista que no hay persona o lugar que sea inmune a desastres o a las pérdidas consecuentes. Brotes epidémicos, terrorismo, tensiones sociales o catástrofes financieras que surjan a la par de desastres naturales, pueden generar consecuencias de gran impacto para la nación y sus comunidades. Esta circunstancia enfrenta a las comunidades a decisiones difíciles de tomar en aspectos fiscales, sociales, culturales y ambientales, en la búsqueda de las mejores formas de garantizar una seguridad básica y una calidad de vida aceptable contra peligros, ataques deliberados y desastres.

Según la Academia norteamericana, reducir los impactos de los desastres de las comunidades requería invertir en la mejora de la resiliencia. Es así que en el reporte mencionado se definió la resiliencia como: *la capacidad de prepararse y planear para, absorber, recobrase de, y adaptarse más exitosamente a los eventos*

adversos. Conclusión de esta definición fue que, una resiliencia mejorada permite anticiparse con más eficacia a los desastres y tener una planeación mejorada para reducir las pérdidas resultantes –en vez de la práctica de esperar a que un evento ocurra para pagar sus consecuencias posteriormente.

En 2015, el *Transportation Research Board* estableció su sección de Resiliencia de Sistemas de Transporte, y en 2017 publicó el reporte *Transportation Systems Resilience. Preparation, Recovery, and Adaptation (Resiliencia en sistemas de transporte. Preparación, Recuperación y Adaptación)* en el cual menciona como objetivo de esta nueva sección, la promoción de discusión entre los interesados, la difusión de resultados de investigación, y la identificación de temas de investigación prioritarios en el área de sistemas de transporte y servicios antes, durante y después de los períodos de intensificación del estrés, de interrupciones de los servicios, y de las necesidades de la población a fin de incrementar la resiliencia y mejorar la comunicación entre las partes interesadas.

Ryan Martinson, colaborador en este reporte, menciona como una de las posibles definiciones de resiliencia:

Resiliencia es la capacidad de las familias, comunidades, y naciones para absorber y recuperarse de impactos, mientras se adaptan positivamente y transforman sus estructuras y medios de vida frente para las tensiones de largo plazo, el cambio y la incertidumbre.

Martinson subraya la importancia de distinguir entre estabilidad y resiliencia. Así, mientras que un sistema estable implica tener una constancia relativa a lo largo del tiempo, un sistema resiliente puede ser muy inestable. Oscilaciones en el corto plazo, disrupciones periódicas o ciclos de buen desempeño, clímax y colapso, podían ser las condiciones normales de un sistema, cuya resiliencia actúa para restablecerlo. Recíprocamente, un sistema estable podría ser no resiliente (Transportation Research Board, 2017).

En 2017, la AASHTO (American Association of State Highways and Transportation Officials) publicó el reporte “UNDERSTANDING TRANSPORTATION RESILIENCE: A 2016–2018 ROADMAP”. El informe indica que antes de 1995, el término resiliencia era desconocido en el ámbito del transporte, y que se usó por primera vez cuando investigadores y diseñadores de políticas dedicados al tema de terremotos comenzaron a aplicar el término resiliencia a comunidades y a sus infraestructuras vitales (agua, comunicaciones, electricidad, transporte, etc.), en la búsqueda de formas de mitigar los impactos de los sismos. (AASHTO, 2017)

La AASHTO señala cómo varias agencias dieron sus definiciones de resiliencia, que resultaron similares, pero no del todo congruentes. Dos definiciones mencionadas en el reporte, y que contienen elementos aplicables al transporte son:

- El AASHTO’s Special Committee on Transportation Security and Emergency Management (SCOTSEM), define resiliencia como: “la capacidad de prepararse y planear para, absorber, recuperarse de, o adaptarse más

exitosamente a eventos adversos”. Esta definición es la misma que propuso la Academia Nacional de Ciencias norteamericana.

- La Administración Federal de Carreteras (FHWA), definió la resiliencia como: “la capacidad de anticiparse, prepararse para y adaptarse a condiciones cambiantes y afrontar, responder a, y recuperarse rápidamente de los eventos disruptivos”.

Un punto de vista interesante en el reporte es considerar que, siendo las respuestas de un sistema de transporte a las interrupciones muy similares, independientemente de sus causas, los profesionales de la gestión de riesgo decidieron desarrollar protocolos generales aplicables a cualquier evento disruptivo, para el despliegue de las actividades de respuesta y de emergencia ante un incidente.

En la XXXII reunión de la North American Transportation Statistics Interchange (NATSI) de 2018, foro trinacional en el que participan Canadá, Estados Unidos y México para el intercambio de datos, metodologías y estándares de la estadística del transporte, se identificó la necesidad de revisar la noción de resiliencia en el transporte para lograr una definición estándar en los tres países. La discusión del tema se difirió por causa de la pandemia Covid-19, que limitó al foro a sólo atender sesiones virtuales para continuar los trabajos. Aun así, en 2020 el Grupo de Trabajo de Transporte de Carga, integrante del Intercambio, incluyó entre sus metas discutir el concepto de resiliencia y buscar formas para medirla (Moreno y Gradilla, 2018).

En México, algunas agencias gubernamentales han generado planes diversos de prevención y de respuesta teniendo como concepto central la noción de resiliencia.

En 2018, el Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred), difundió el documento “La Resiliencia en la Gestión Integral del Riesgo”, que describe la gestión integral del riesgo como las acciones dirigidas a identificar, analizar, evaluar, controlar y reducir los riesgos, considerando su carácter multifactorial en un proceso continuo de construcción. El documento adopta la definición de resiliencia de la Ley General de Protección Civil (Cenapred, 2018):

Resiliencia: Es la capacidad de un sistema, comunidad o sociedad potencialmente expuesta a un peligro para resistir, asimilar, adaptarse y recuperarse de sus efectos en un corto plazo y de manera eficiente, a través de la preservación y restauración de sus estructuras básicas y funcionales, logrando una mejor protección futura y mejorando las medidas de reducción de riesgos. (LGPC; Art. 2, fracc. XLVIII)

En 2020, la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp), publicó los resultados del *Proyecto Resiliencia*, realizado con apoyo del Fondo Mundial para el Medio Ambiente (Global Environment Facility, GEF) y del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2020).

Este proyecto declaró como objetivo reducir los impactos adversos del cambio climático sobre la biodiversidad global relevante y las comunidades humanas, y en

su desarrollo definió la resiliencia como "la capacidad de un sistema social o ecológico para absorber perturbaciones, manteniendo la misma estructura básica y los modos de funcionamiento, la capacidad de auto-organización y la capacidad de adaptarse al estrés y al cambio". El proyecto se aplicó en 7.8 millones de hectáreas de 17 áreas federales protegidas, sobre 12 ecorregiones con tres ambientes: terrestre, costero y marino. Dado el enfoque centrado en el cambio climático, este proyecto advierte que los impactos de este cambio son cada vez más repentinos y con eventos extremos cada vez más frecuentes, lo que sugiere trabajar en sistemas de alerta temprana para lograr intervenciones rápidas y oportunas (Conanp, 2020).

Algunos trabajos recientes del IMT han usado del término resiliencia en temas de transporte no relacionados con la ciencia de materiales.

Gradilla (2014), en un estudio sobre el autotransporte federal de pasajeros, describe la resiliencia como la capacidad de los sistemas complejos de afrontar el estrés de manera adaptativa. Esta capacidad, a su vez, la clasifica como *dura* o *blanda*. *Resiliencia dura* cuando se refiere a los atributos físicos del sistema, y *resiliencia blanda* cuando se refiere a la capacidad de gestión de riesgos y de respuesta del sistema. Este trabajo también identifica medidas para la mejora de la resiliencia.

Para la resiliencia dura se recomiendan, por ejemplo: simplificar los diseños de infraestructura, para facilitar el mantenimiento y la reconstrucción; tener planes de tramos alternativos para aumentar la redundancia, o planificar la integración de un sistema multimodal con otros modos de transporte. Para la resiliencia blanda, algunas sugerencias son: mejorar los sistemas de comunicación y de alerta temprana para los usuarios y aumentar la redundancia de los sistemas de comunicación, integrando, por ejemplo, la telefonía satelital.

Bustos et al. (2017), en un trabajo sobre el riesgo en las cadenas de suministro de importación de graneles agrícolas por puertos en México, describen la resiliencia en la cadena de suministro como la capacidad de ésta de resistir las disrupciones y recuperar su capacidad operativa al cese de las mismas. Adoptando un marco conceptual para la resiliencia de las cadenas de suministro, propuesto por Ponomarov y Holcomb, se identifican tres fases de la resiliencia en la cadena suministro: la preparación, la respuesta y la recuperación.

La diversidad de campos que han usado el término resiliencia, y la variedad de definiciones, reflejan las necesidades de atención a diversos intereses en los distintos campos de aplicación.

Las diferencias vistas, sin embargo, tienen varios rasgos comunes, como: la capacidad de afrontar un evento extremo y recuperarse del mismo; el estar preparado para enfrentar amenazas o impactos extraordinarios en términos de su escala, forma o duración; la capacidad y la disposición de adaptarse a un ambiente cambiante y a veces amenazante; el tener la firmeza y el compromiso para sobrevivir; y la disposición de las comunidades y las organizaciones de adherirse a una causa común y un conjunto de valores compartidos (McAslan, 2010).

En los capítulos siguientes se explorará el uso del concepto de resiliencia en los sistemas de transporte y algunas métricas detectadas para cuantificar esta cualidad en estos sistemas.

2. Resiliencia en el campo del transporte

El transporte se puede describir básicamente como el movimiento de personas y de cargas en el espacio geográfico, usando tres modos principales: el terrestre, que incluye carretera y ferrocarril; el marítimo y el aéreo. En el movimiento de personas y de cargas algunas empresas atienden la infraestructura y otras se ocupan de los movimientos vehiculares y su organización.

Estas empresas se relacionan con otras que les proveen vehículos, combustible, materiales de construcción, etc., así como con el mercado laboral que les ofrece operadores, administradores, y otros profesionistas y también con la autoridad competente en relación a permisos, reglamentos de operación, pago de impuestos, respeto del medio ambiente, etc.

El transporte es un servicio cuya producción, a diferencia de la de bienes, no se puede almacenar para uso posterior; así que el transporte debe utilizarse a la par que se produce, o de lo contrario se pierde (Rus, Campos y Nombela, 2003). Así, por ejemplo, los asientos vacíos en un autobús interurbano que parte a su destino no pueden almacenarse para ser vendidos en un futuro.

Tanto en el transporte de carga como en el de pasajeros, los traslados se realizan sobre diversas infraestructuras, utilizando vehículos apropiados según el caso, consumiendo el mismo combustible y con operadores de habilidades semejantes. Sin embargo, se tienen diferencias importantes en los dos tipos de movimiento. La Tabla 2.1 resume estas diferencias en relación con las etapas de generación de viajes, distribución y elección de modo del modelo clásico de planeación del transporte, más el aspecto del costo generalizado del transporte (Moreno, E., 2006).

Una primera comparación posible es sobre la naturaleza de lo que se mueve. Mientras que los pasajeros pueden decidir sobre su destino, su ruta o el modo de transporte para realizar su viaje, la carga por sí misma no decide nada de esto.

Los pasajeros tienen cierta flexibilidad para cambiar su destino de viaje (por ejemplo, en un viaje para ir de compras); la carga, en contraste, no puede cambiar de destino, y usualmente tampoco de ruta. Los viajes de pasajeros generalmente son de ida y de regreso, los viajes de carga son sólo de ida y generan el movimiento de regreso de un vehículo vacío.

En las terminales de pasajeros, estos se mueven independientemente hacia los vehículos para abordarlos, y atienden las indicaciones de cambios de último momento para proseguir su viaje.

En las terminales de carga, los embarques no se mueven solos, requieren operaciones de carga/descarga tanto en el origen como en el destino; en estas operaciones intervienen varios actores: el conductor del camión, los operadores de la terminal, los servicios de aduanas e inspección, etc.

Tabla 2.1 Características comparadas. Transporte de pasajeros y de carga

	Aspecto	Transporte de pasajeros	Transporte de carga
GENERACIÓN	Propósito:	Trabajo, escuela, compras, etc.	a) Servicio público de transporte de carga b) Privado
	Terminales:	Requiere mínima asistencia en abordar, descender y conectar a otros modos.	Requiere diversas instalaciones, equipos y personal para carga y descarga. Las conexiones intermodales son relativamente especializadas por tipo de carga.
	Actores:	El pasajero.	Productores, consumidores, cargadores, transportistas, proveedores logísticos, autoridades carreteras.
		Un gran número de decisores; cada uno aportando una parte muy pequeña de la demanda.	Varios decisores, menos que en el caso de pasajeros, pero algunos de ellos controlando importantes fracciones de la demanda.
Unidades de medida:	Pasajeros, automóviles.	a) Por la carga: toneladas, metros cúbicos b) Por el vehículo: camiones, remolques c) Por el valor económico de las cargas d) Por vehículos ligeros equivalentes	
DISTRIBUCIÓN	Flujo del tráfico:	Usualmente hay viaje de ida y viaje de regreso.	a) Usualmente la carga no regresa b) Requiere minimizar el retorno de vehículos vacíos
		Hay flexibilidad para cambiar de destino (p. ej. los viajes por compras o diversión)	Usualmente no hay flexibilidad para cambiar el destino
ELECCIÓN DE MODO	Actores:	Los pasajeros.	Frecuentemente, el embarcador.
	Factores de decisión:	a) Relativos a utilidad: tiempo de viaje, costo, confort, etc. b) Relativos al pasajero: edad, sexo, ingreso, etc.	a) Relativos a la carga: peso, tamaño del embarque, embalaje, fragilidad, calidad de perecedero, etc. b) Relativos al cargador: política de inventario, ubicación de instalaciones, prácticas de carga. c) Relativos al consignatario: ubicación y requerimientos de descarga, política de inventarios. d) Relativos al modo: tarifa, velocidad, riesgo de daño, frecuencia.
		Valor del tiempo (VDT)	a) Basado en el ingreso del viajero b) VDTs de caminata y espera parecen ser mayores al del tiempo a bordo del vehículo
COSTO GENERALIZADO	Factores:	a) Tiempo a bordo del vehículo b) Tiempo de caminata c) Tiempo de espera d) Tiempo de transbordos e) Tarifa f) Costos en terminal	a) Desembolso monetario b) Tiempo puerta-a-puerta c) Variabilidad del tiempo de viaje d) Tiempo de espera hasta la entrega e) Probabilidad de pérdida o daño a la carga

Fuente: *Análisis comparativo de la modelación del autotransporte: carga vs pasajeros*. Moreno, E. (2006).

Estas características del transporte de carga sugieren una manera de identificar aspectos vulnerables del sistema de carga que, al enfrentar una interrupción inusual y brusca, provocan una reducción importante del servicio. La identificación de la vulnerabilidad del sistema de carga, es útil para evaluar su capacidad de enfrentar interrupciones súbitas y de gran magnitud, así como el subsiguiente retorno a la normalidad.

Bajo esa perspectiva, considerando que la carga no se mueve por sí misma, la súbita escasez o carencia de personal encargado de operaciones puede afectar seriamente al sistema; igualmente, una suspensión brusca del retorno de vehículos vacíos, necesario para continuar los ciclos de carga, puede afectar gravemente al sistema de transporte.

Un par de ejemplos recientes de esto son: la huelga de estibadores en puertos españoles de junio/2017 (La Vanguardia, 2017), o la escasez de contenedores vacíos en el comercio internacional provocado por la recuperación de China luego de la pandemia de Covid-19 (T21, 2021). Estos fueron incidentes en los que se requirieron diversos actores coordinados para gestionar las cargas, los vehículos y las terminales para lograr el restablecimiento de los flujos.

2.1 Definición de resiliencia en diversas áreas

Cuando se empieza a discutir la idea de resiliencia, es común que se confunda con la idea de resistencia. En relación con la resiliencia en los individuos, McAslan (2010) observa que tener resiliencia no significa evitar la disfunción o la tensión; así, el hecho de que un individuo no sufra disfunción o tensión ante un evento disruptivo más bien sugiere resistencia, no resiliencia. Tener resiliencia implica aceptar que habrá disfunción y tensión temporales, después de lo cual se volverá a la situación de normalidad.

Para Tamvakis y Xenidis (2012), añadir la idea de resiliencia al diseño ingenieril busca asegurar la operación de los sistemas de transporte en cierto nivel de servicio, tanto en condiciones normales como extremas y, además, que el sistema pueda responder a un evento disruptivo inusual, recuperarse del impacto y volver a la operación normal. El enfoque de estos autores difiere del concepto clásico de reforzar la durabilidad del sistema para poder soportar impactos extremos cuando éstos ocurran. La perspectiva de la resiliencia más bien introduce aspectos dinámicos del comportamiento del sistema, desde que es impactado y se adapta al cambio, hasta que vuelve a la operación normal; la perspectiva clásica, en cambio, es estática.

Cimellaro et al (2010) desarrollan un marco de referencia para cuantificar la resiliencia respecto al impacto de un sismo. Con un enfoque ingenieril definen resiliencia como la capacidad de un sistema (edificio, puente, planta eléctrica, etc.) de mantener su funcionalidad o desempeño a lo largo de un período llamado tiempo

de control, que usualmente corresponde a la vida útil de la infraestructura. En este marco, definen el tiempo de recuperación como el período necesario para recuperar la funcionalidad de un sistema a un nivel aceptable, cercano al funcionamiento normal o mejor que éste. El tiempo de recuperación se considera una variable aleatoria con alta incertidumbre, pues incluye el tiempo de reconstrucción del sistema y el tiempo de interrupción del servicio; aunque este tiempo de recuperación es menor que el tiempo de control del sistema.

En referencia a colaboraciones con investigadores del Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (MCEER) de la Universidad de Buffalo., N.Y., Cimellaro et al (2010) sugieren cuatro atributos deseables en un sistema, mediante los cuales la resiliencia de éste puede ser mejorada:

1. Robustez. Es la capacidad de los sistemas de resistir cierto nivel de tensión sin experimentar pérdida de funcionalidad.
2. Inventiva. Es la capacidad de identificar problemas, establecer prioridades y movilizar recursos disponibles cuando hay amenazas que puedan provocar una interrupción brusca del sistema.
3. Redundancia. Es la capacidad de disponer de rutas alternas en el sistema con las que se puedan redirigir los servicios para tener operación continua.
4. Rapidez. Es la capacidad de acatar las prioridades y alcanzar los objetivos del sistema a tiempo, para reducir pérdidas y evitar futuras interrupciones.

De esta descripción, los autores señalan la fuerte interrelación entre inventiva y redundancia; así, disponer de recursos y de inventiva puede generar redundancias que no existían. Paradójicamente, la creciente tendencia del uso de la tecnología en casos de emergencia, ha llevado a una gran dependencia de estas herramientas, de modo que si, la tecnología falla o se destruye, la capacidad de respuesta flaquea.

Un reciente caso de esta dependencia fue la caída simultánea del servicio de WhatsApp, Instagram y Facebook de octubre de 2021. La falla ocurrió el lunes 4/oct/2021 alrededor de las 16:00 GMT, y el servicio retornó unas 6 horas más tarde. La plataforma digital Downdetector estimó que en todo el mundo hubo cerca de 10.6 millones de reportes de la falla, y el número estimado de usuarios afectados fue de 3,500 millones aproximadamente. Además de la desconexión de familias y amigos, los pequeños negocios que usan redes sociales para interactuar con su clientela se enfrentaron a la posibilidad de fuertes pérdidas por el evento (BBC, 2021).

Flintsch, Evans y Rossigny (2021) en un trabajo sobre resiliencia y gestión de activos carreteros, *señalan que el enfoque necesario para acrecentar la resiliencia de las redes carreteras, debe ser holístico, tomando en cuenta cualquier posible riesgo y sus impactos, para poder determinar respuestas adecuadas.* También sugieren considerar las interdependencias con otros modos de transporte, y los efectos en cascada o de amplificación, para lograr una visión lo más amplia posible de cualquier tipo de amenaza que pueda afectar al sistema carretero. Como ejemplo de efectos amplificadores, Flintsch et al hacen notar que los eventos disruptivos

como inundaciones, terremotos o derrumbes, siguen afectando a las redes carreteras en la situación actual, en la que se enfrenta a la pandemia COVID-19, lo que ha generado mayores complicaciones a los administradores de la infraestructura, a los operadores del transporte y a la sociedad.

Cuando surge un evento disruptivo inesperado y de impacto inusitado para el transporte de carga, sea por causas naturales (inundaciones, huracanes, terremotos, etc.) o humanas (huelgas de operadores, sabotajes, escasez de equipo de arrastre, etc.), el enfoque de resiliencia siempre plantea la secuencia siguiente:

- a) Que el sistema afectado pueda resistir en alguna medida el impacto,
- b) Que pueda recuperar la funcionalidad y
- c) Que logre volver al nivel de servicio original.

Esa secuencia es la misma, independientemente del tipo de causa que provoca la disrupción, por lo que la definición de resiliencia para el transporte de carga no debería referirse a un tipo de causa. Esta reflexión es afín con la propuesta para gestión del riesgo en el reporte de la AASHTO de 2017, citado en el capítulo 1, de desarrollar protocolos generales aplicables a cualquier evento disruptivo.

Igualmente, Bueno-Solano & Cedillo-Campos (2014) en una revisión de enfoques de manejo del riesgo de varios investigadores del tema comentan cómo ante la imposibilidad de prever todo tipo de amenaza potencial a la cadena de suministro, y aún menos determinar la probabilidad de su materialización, consideran que es mejor enfocar el esfuerzo en evaluar los impactos que generan las disrupciones de la cadena, ya que una amplia variedad de eventos disruptivos incluyendo desastres naturales, y ataques terroristas, tienden a tener los mismos efectos en la cadena.

Así, mientras que la pregunta “¿resistente a qué...?” tiene sentido para el transporte de carga, la pregunta “¿resiliente a qué...?” no está claramente planteada.

El uso del concepto de resiliencia en distintos campos de aplicación que se revisaron en el capítulo 1, puede dar la impresión de que hay gran diversidad en los enfoques y significados del término. McAslan (2010) señala que pese a la variedad de esquemas que definen un concepto de resiliencia, éstos tienen varias características en común. En general, en todos los esquemas que definen la idea de resiliencia se tienen:

- a) Amenazas y eventos inusuales en cuanto a forma, magnitud o temporalidad.
- b) Resultados positivos esperados, basados en la posibilidad de absorber el impacto, adaptarse a la situación y regresar al estado de operación normal.
- c) Una preparación para los eventos disruptivos, pues la capacidad de enfrentar, absorber y recobrase del evento requiere planes de prevención y protocolos de actuación para el momento de emergencia.
- d) Capacidad de adaptación, para cambiar el modo de operación habitual, buscar alternativas y enfrentar el impacto.

- e) Acumulación de experiencia, a partir de la disposición a aprender, ya sea de vivencias propias o del análisis objetivo de incidentes ocurridos a otros, y de la difusión de hallazgos, conclusiones y recomendaciones.
- f) Interdependencia con otros sistemas y organizaciones, debida a la globalización de las redes de transporte, lo que plantea la conveniencia de tener respuestas colectivas y coordinadas para enfrentar el impacto de eventos disruptivos globales.

Estas coincidencias son un buen punto de partida para la discusión del concepto de resiliencia en el transporte de carga.

2.2 Resiliencia en el transporte de carga

Para aclarar el uso de las ideas de resiliencia en el sistema de transporte de carga, es conveniente reconocer una estructura básica para esta actividad. El sistema de transporte de carga en general, tiene tres dimensiones que explican las interacciones entre diversos los diversos actores para el propósito de mover cargas de orígenes a destinos:

- a) La infraestructura del sistema de transporte de carga
- b) Los usuarios de la infraestructura.
- c) Las organizaciones involucradas en el movimiento de carga.

La resiliencia del sistema de transporte de carga resulta de la interacción dinámica entre las entidades organizativas, las empresas usuarias y la infraestructura física.

La infraestructura es el elemento físico fundamental del sistema de transporte de carga; comprende las redes que utilizan diversos modos que se interconectan y sobre las cuales se mueven las cargas para satisfacer las demandas de la actividad económica. La resiliencia en la infraestructura se entiende como la aptitud de la red de transporte, dada su capacidad de ofrecer kilómetros de vías disponibles, de facilitar el movimiento de carga bajo condiciones de flujo restringido provocadas por una interrupción como la inaccesibilidad de una carretera o un puente. La resiliencia intrínseca en la infraestructura depende directamente de su diseño, calidad de su construcción y robustez de la red. (Ta et al, 2009).

Los usuarios de la infraestructura, aunque no son responsables de promover la resiliencia del sistema, influyen en ésta con su operación de traslado de cargas. Los usuarios esperan que las agencias gubernamentales y sus concesionarios brinden infraestructura adecuada y funcional, y a su vez estas agencias esperan que los usuarios utilicen la infraestructura de modo que apoyen su buen funcionamiento.

Así, por ejemplo, en el transporte carretero, se requiere que los camiones fijen adecuadamente las cargas en plataforma, que respeten las restricciones de pesos, dimensiones y las velocidades máximas para evitar accidentes. Asimismo, es

conveniente que en los periodos de congestión las empresas puedan reprogramar o diferir los embarques no urgentes para aliviar el tráfico en las horas pico. La adecuada interacción entre las empresas transportistas y las agencias responsables de la infraestructura puede dar beneficios a ambas partes y mejorar la resiliencia del sistema de transporte.

La resiliencia de las empresas transportistas a su vez, está influenciada por las acciones de las agencias gubernamentales responsables de la infraestructura. La respuesta de una agencia de transporte a una interrupción puede tener impactos en las empresas transportistas que resulten mayores a los de la interrupción misma. Las políticas gubernamentales tanto federales como estatales en relación a controles aduanales, revisiones sanitarias, combate al contrabando de drogas o prevención de actos de terrorismo pueden afectar a la capacidad de las empresas para mover mercancías.

En las tareas de preparación para estos escenarios de interrupción, las empresas transportistas podrían aumentar su eficacia en la rápida difusión de información relevante, difiriendo la toma de decisiones, posponiendo las entregas no urgentes y aumentando la confiabilidad en las cadenas de suministro considerando proveedores alternos, medidas todas encaminadas a mejorar la resiliencia de las empresas.

Para las agencias gubernamentales responsables del sistema de transporte, una estrategia para la resiliencia debería incluir una comunicación efectiva dentro de las propias agencias, así como con otras organizaciones involucradas con el sistema de transporte (por ejemplo, auxilio turístico en camino, patrulla de caminos, ambulancias, etc.).

La difusión oportuna de información precisa sobre el estado del sistema fundamenta tanto la capacidad de la organización para ser receptiva, flexible y adaptable, como la resiliencia general del sistema de transporte de carga.

La resiliencia de la entidad administradora fomenta la resiliencia general del sistema de transporte de carga, lo que sugiere que las propiedades de resiliencia a nivel organizacional deberían, por lo tanto, incluir propiedades que puedan cuantificar acciones y comportamientos que promuevan el intercambio de información y respalden la calidad y oportunidad de la información y la exitosa difusión externa de la información.

En la Tabla 2.2 se resumen las ideas básicas de resiliencia para los componentes principales del sistema de transporte de carga (Ta, et al, 2009).

Tabla 2.2 Ideas básicas de resiliencia para el sistema de transporte de carga (adaptado de Ta et al, 2009)

Resiliencia de:	Definición
La infraestructura	<i>Es la aptitud de la red de transporte para seguir moviendo carga frente a una interrupción ya sea por reducción de la capacidad, un bloqueo total o una falla en los sistemas que dan información de la infraestructura.</i>
Las empresas transportistas	<i>Es la capacidad de las empresas para mover carga de manera eficiente y oportuna en un escenario de interrupción de la infraestructura.</i>
Las entidades organizadoras	<i>Es la capacidad de las entidades que gestionan la infraestructura de cumplir con las prioridades y lograr las metas de manera oportuna y eficiente para minimizar las pérdidas.</i>
El sistema de transporte de carga	<i>Es la aptitud del sistema de transporte de carga para absorber los impactos y reducir las consecuencias de las interrupciones. Esta aptitud tiene tres dimensiones relevantes: infraestructura, agencias de gestión y usuarios del sistema.</i>

Fuente: Structuring a Definition of Resilience for the Freight Transportation System. Ta, C. et al., 2009).

Con base en la discusión previa sobre la resiliencia y sus varias interpretaciones en otros campos, en este trabajo se adopta la siguiente definición.

Definición. *Resiliencia del sistema de transporte de carga es la capacidad conjunta de sus componentes: infraestructura, vehículos y organización, para resistir hasta cierto grado el impacto de cualquier interrupción súbita y desmesurada, adaptarse al cambio y recuperar la operación normal en un tiempo acorde a la magnitud del impacto. La resiliencia, al ser una capacidad, tiene como límite la destrucción del sistema por el impacto disruptivo.*

En esta definición, “cualquier evento” incluye amenazas a la infraestructura física y a la operación ocasionadas por fuerzas naturales y también las generadas por acciones humanas como sabotaje, terrorismo, ataques a la ciberseguridad, o accidentes graves.

2.3 La cuestión de la inversión en resiliencia

Considerar las dificultades que limitan a un sistema de transporte para que opere normalmente y genere los beneficios esperados, es un primer paso para discutir el tema de resiliencia.

Weilant et al (2019) en su trabajo sobre resiliencia, encuestaron a diversas personas involucradas en aspectos del transporte, pudiendo identificar varios desafíos que limitan la capacidad del sistema de transporte para operar con normalidad, *enfaticando aquellas interrupciones ante las cuales es deseable que el sistema de transporte sea resiliente*; entre estos desafíos se incluyen:

- a) Interrupciones y riesgos de los eventos de clima extremo, como inundaciones, vientos huracanados, ciclones, incendios forestales, etc.
- b) Riesgos físicos ambientales, como derrumbes, erosión o deslave de tierras; cortes en la infraestructura, y
- c) Otras amenazas inducidas por la actividad humana, como sabotaje, terrorismo o ataques a la ciberseguridad y las comunicaciones.

Otros desafíos se ubicaron en la planeación y su implementación, tales como:

- a) El financiamiento ausente o limitado.
- b) La escasez o falta de datos para la planeación.
- c) La falta de coordinación y de acuerdo sobre prioridades entre los distintos niveles de gobierno.
- d) La rotación o reemplazo de personal en los equipos de planificación y de gobierno.
- e) Lentitud en la adopción de las nuevas prácticas.
- f) Ausencia de planeación enfocada a todo tipo de riesgo, y
- g) Una infraestructura pública subdesarrollada.

Por otra parte, las encuestas señalaron factores que podrían apoyar a la construcción de la resiliencia del sistema de transporte, como:

- a) Una campaña nacional de concientización sobre la importancia de la resiliencia en el transporte.
- b) Coordinación entre los sectores económicos relacionados (energía, defensa, fiscal, etc.) para la planeación del transporte con estrategias de corto, mediano y largo plazo.
- d) Políticas y requerimientos claros para asegurar que la planeación, su implementación y los informes que se generen se entiendan y apliquen de la misma manera en todas las organizaciones involucradas con el transporte.
- e) Cursos de capacitación a funcionarios y tomadores de decisiones para mejorar su comprensión de la conectividad entre los sistemas de transporte y los activos que se consideran críticos.
- f) Convenios de intercambio de datos entre agencias de transporte.
- g) Financiamiento dirigido a construir, mantener o mejorar la resiliencia.
- h) Proyectos para aumentar la redundancia en la infraestructura.

Un aspecto importante a considerar para las mejoras a la resiliencia del transporte de carga, es que la natural estructura de red que tiene el sistema implica que la finalidad de las inversiones en resiliencia sea reducir la dependencia de activos individuales, o reducir la exposición al riesgo de los activos, para poder contener los efectos en cascada en toda la red.

De este modo, la inversión en resiliencia debería mejorar la operación de la red tanto en condiciones normales como en los lapsos de interrupción, y evitar la propagación de las fallas en la red de transporte cuando se produzca alguna interrupción (Weilant et al, 2019).

Generar, fortalecer o ampliar la resiliencia en un sistema de transporte sin duda, requiere de planeación e inversiones. En las discusiones del tema, es común que los planificadores del transporte tengan ya identificados y medidos los riesgos que pueden afectar a su sistema, así como las potenciales fuentes de financiamiento para enfrentar estos riesgos.

Sin embargo, reconocer la relevancia de la resiliencia en el transporte, no es tan común. Ryan Martinson, en su colaboración del reporte Circular Number E-C226 publicado por el Transportation Research Board (2017), señala que:

La resiliencia es algo que puede ser muy difícil de ver, a menos que sea excedida y el sistema colapse. Ya que la resiliencia no resulta obvia si no se tiene una visión global del sistema, la gente sacrifica la resiliencia por la estabilidad, por la productividad, o por alguna otra propiedad del sistema que sea reconocible de inmediato.

De esta manera, cuando se habla de aumentar o mejorar la resiliencia, puede resultar difícil subrayar la relevancia de esto, ya que involucra costos para reducir riesgos que todavía no ocurren, en contraste con la reducción de costos que pueden observarse y medirse regularmente.

En referencia a las medidas para fortalecer la resiliencia de la cadena de suministro, Sheffi and Rice (2005) hacen notar que:

La resiliencia, a su vez, puede conseguirse ya sea creando redundancia o aumentando la flexibilidad. Si bien alguna redundancia es parte de cada estrategia de resiliencia, eso es puro costo con beneficios limitados, a menos que sea utilizada durante una interrupción.

Es por esto, que la identificación y uso de métricas adecuadas para medir la resiliencia es fundamental. En el capítulo 3 se trata de este tema.

3. Métodos para estimar resiliencia

La definición que se ha dado en este trabajo al concepto de resiliencia para el transporte de carga, se ha basado en una revisión amplia del concepto en otros campos y en algunos enfoques de organizaciones relacionadas con el transporte.

Percibir la importancia de tener un sistema de carga resiliente para afrontar con éxito amenazas futuras graves e imprevisibles, no resulta fácil para aquellos involucrados en el sistema, que a diario enfrentan problemas que demandan solución a la brevedad, y con los que invierten tiempo y recursos. Y si bien puede requerirse una campaña de concientización entre todos los interesados en el transporte de carga para reconocer el valor de la resiliencia, al menos parece haber consenso en que la resiliencia que pudiera tener el transporte de carga en su estado actual, debería ser mejorada. Así, surge la cuestión de la medición.

Medir la resiliencia del transporte de carga, con indicadores que reflejen aspectos de su desempeño es esencial por varias razones:

- a) Hacen falta mediciones para identificar las prioridades en las necesidades de mejora
- b) Se requiere un conjunto de medidas para monitorear el progreso en las mejoras, y
- c) Las comparaciones de costo-beneficio asociadas a mejoras de la resiliencia no podrían hacerse sin mediciones de la misma.

Entonces, comenzando con un escenario base de referencia para el sistema de transporte, y con un monitoreo regular del desempeño del sistema, se puede comenzar a hacer cambios que mejoren la resiliencia.

Ahora bien, la medición de un concepto que ha sido complicado definir, no es sencilla, pues se requiere que haya acuerdo general en las métricas propuestas, y también disponibilidad de datos y tal vez algoritmos para calcular dichas métricas. (National Research Council, 2012).

3.1 Algunas medidas usadas en la práctica

Aun cuando no es sencillo tener una medida única y directa de la resiliencia en un sistema de transporte, en los diversos métodos que algunas agencias relacionadas con el transporte han utilizado, se encuentran elementos comunes pensados para

evaluar la resiliencia -por lo general referida a eventos climáticos- y una probabilidad de éxito de las estrategias y acciones para mejorarla.

Estos elementos tienen métodos analíticos y métricas propuestas que cubren cuatro aspectos esenciales:

5. La probabilidad de eventos disruptivos por causas naturales (clima, terremoto, ciclón, etc.) a la que también se le llama “exposición”;
6. La vulnerabilidad -también llamada “sensibilidad”- del sistema de transporte a daño severo o interrupciones;
7. Las consecuencias de un nivel particular de daño o interrupción, usualmente referidas como la suma de los costos de los dueños de la infraestructura o sistema y los costos de los usuarios; y
8. La criticidad o relevancia de la infraestructura o el sistema, en referencia a la utilización y otras medidas que reflejan la importancia de un activo, nodo, red o sistema en términos económicos y sociales más amplios.

3.1.1 Probabilidades de eventos disruptivos

La estimación de probabilidades de eventos disruptivos, es necesaria para generar escenarios potenciales en el análisis de resiliencia. La estimación de probabilidades usualmente usa datos históricos de la frecuencia de ocurrencia de los diferentes eventos disruptivos, para calcular las probabilidades empíricas y luego ajustar a alguna distribución teórica utilizando pruebas estadísticas de bondad de ajuste, típicamente Ji-cuadrada, Kolmogorov-Smirnov o Anderson-Darling con niveles de significación de 5% o menores.

Una vez logrado un ajuste estadístico adecuado para las distribuciones de probabilidad que modelan los eventos disruptivos, pueden plantearse los escenarios que se desea valorar, y en cada uno de ellos se puede estimar el valor esperado de los impactos, conociendo la probabilidad calculada con la distribución que se ha ajustado.

Entre las distribuciones que se han usado para modelar el comportamiento de inundaciones, lluvias extremas o intensidad de viento, están las de la familia de valores extremos generalizados, que incluye las distribuciones Gumbel, Weibull y Fréchet (Shukla, R. K., Trivedi, M. and Kumar, M., 2010; Nkongho A. A. and E. Joseph, 2016).

Asimismo, está la distribución Log Pearson Tipo III, que se ha utilizado para modelar inundaciones y frecuencias de terremotos (USDA, 2007; Wikipedia, 2021b; Rizwan, S.A., Khan, A. and Debaj, S. A., 2000).

En otros ejemplos: Baldeh et al (2016) utilizan un proceso homogéneo de Poisson para modelar el patrón de llegada de desbordamientos derivados de aguas

pluviales; Rehman, K; Burton, P.W. and Weatherill, G.A. (2018) se basan en una distribución Gumbel y en simulación Monte Carlo para evaluar probabilísticamente el riesgo sísmico en Pakistán, en referencia a la aceleración sísmica estimada, mientras que Önoz, B. and Bayazit, M. (1995) analizando un total de 1,819 pares lugar-año de datos de flujos de inundaciones de 19 estaciones en todo el mundo, encuentran que la distribución Gumbel es la que mejor ajusta a los datos, en comparación con otras distribuciones ensayadas.

La medición de frecuencias de ocurrencia de eventos disruptivos varía según su naturaleza; así, las disrupciones por inundación se miden en probabilidades de ocurrencia anual, mientras que las de los terremotos se reportan en ocurrencias por cada 10,000 años.

También es conveniente adoptar alguna escala de la severidad de la disrupción, por ejemplo, como ocurre con los ciclones, que se catalogan en varios niveles, desde Depresión Tropical localmente destructiva, hasta Huracán Categoría 5, desastrosamente destructivo. Adicionalmente, para tener un enfoque amplio para el análisis de resiliencia y su planeación, conviene estandarizar la medición de las probabilidades de todos los eventos disruptivos en la misma escala de frecuencias.

El National Institute of Standards and Technology (NIST, 2016) norteamericano ha propuesto usar tres categorías para un horizonte de análisis de 50 años:

- a) Rutina
- b) Diseño y
- c) Extremo.

El nivel de rutina es para peligros que tienen 50% o más probabilidad de ocurrir en los próximos 50 años; el nivel de diseño es para eventos disruptivos que tienen un 10% de ocurrir en ese periodo de 50 años y el nivel extremo es para los eventos disruptivos con entre 2 y 3% de probabilidad de ocurrir en el periodo citado.

Cada uno de estos niveles está ligado a una meta de desempeño. Los riesgos de rutina tienen disrupciones mínimas. Los riesgos de diseño deben planearse en el contexto de los estándares necesarios de edificación y construcción de infraestructura, y los riesgos extremos deben preverse en el contexto de la protección de la vida, las labores de rescate y los periodos de recuperación significativos (National Academies of Sciences, 2021).

3.1.2 Vulnerabilidad

Según Garbolino et al (2013), el término *vulnerabilidad* viene del latín *vulnerabilis* (que se traduce al español como *vulnerable* –Pimentel, 2017), con el significado de susceptible de ser dañado o herido, y sostiene que este término muy usado en las ciencias naturales y médicas, ha ido apareciendo gradualmente en el estudio de los riesgos naturales y tecnológicos.

Con un enfoque territorial, Garbolino cita la descripción de D'Ercole y Metzger sobre vulnerabilidad territorial, observando que, *dentro de cualquier área de valor estratégico, existen elementos identificables con propensión a generar y diseminar sus vulnerabilidades a toda el área, generando interrupciones que comprometen o suspenden la operación normal del sistema de interés*. De esta manera se propone la idea de enfocarse en la identificación y localización de los principales elementos vulnerables, independientemente del tipo de riesgo de interrupción que pueda afectarlos, ya que estos son los elementos esenciales para el desempeño normal del área considerada (Garbolino et al, 2013).

Si bien para el concepto de vulnerabilidad de un sistema de transporte no hay hasta ahora una definición de aceptación universal, la idea básica se refiere a la propensión del sistema a sufrir reducciones en su desempeño a causa de un evento disruptivo.

Mattson & Jenelius (2015) citan la definición de Berdica como una de las más referidas en la literatura, describiendo a la vulnerabilidad como: *una susceptibilidad hacia eventos que producen reducciones sensibles en el nivel de servicio de la red de transporte*. Y hacen notar que esta definición puede aplicarse a cualquier modo de transporte.

La vulnerabilidad depende de la escala y el alcance del evento disruptivo, así como de la ubicación, el diseño y el estado en que esté el activo o la infraestructura en cuestión. La vulnerabilidad de los activos de infraestructura o del servicio de transporte mismo, puede reducirse con inversiones que robustezcan al sistema y atenúen los efectos del daño provocado por las interrupciones, considerando incluso relocalizar los activos físicos. Al evaluar la vulnerabilidad del sistema de transporte se pueden identificar los activos con mayor riesgo, para dar prioridad a análisis más detallados del riesgo o de las medidas de mitigación.

3.1.3 Consecuencias

Los impactos directos o indirectos que tienen los eventos disruptivos en el sistema de transporte (nodos, tramos, infraestructura, servicio, etc.) se miden por las consecuencias de dichos impactos. Estas consecuencias son tanto para los propietarios del sistema de transporte como para sus usuarios. Así, con una carretera que ha sido afectada por deslaves provocados por inundaciones, el propietario (podría ser el Estado) incurre en costos de reparación, reconstrucción y restablecimiento de la circulación, mientras que los usuarios (automóviles, camiones, autobuses) sufren los costos de mayor tiempo de viaje por las desviaciones, retrasos en las entregas de carga o viajes perdidos. Consecuencias más graves podrían incluir personal o viajeros heridos o fallecidos en el evento disruptivo. Consecuencias indirectas o derivadas del evento disruptivo pueden ser los impactos en las comunidades vecinas debido a la movilidad y a la accesibilidad reducidas, las entregas fallidas o retrasadas de mercancías y también la suspensión de actividad económica o social.

3.1.4 Criticidad

La criticidad de una infraestructura, nodo de una red o de un sistema de transporte se refiere a tener la condición de crítico, en el sentido de la relevancia de su rol en el sistema de transporte. Así, la criticidad es la relevancia del elemento del sistema de transporte considerado en términos de lo que cuesta a los usuarios, a los dueños/responsables de los activos y a la sociedad en general, cuando dicho elemento pierde funcionalidad.

Los elementos y activos de la infraestructura de mayor interés son aquellos que tienen una relevancia central para la vida económica de la región, los que proporcionan acceso a servicios de salud, de educación y a centros laborales, y que en general dan soporte a valores sociales y culturales importantes en el área considerada. La criticidad de cualquiera de estos elementos del sistema de transporte resulta entonces, una medida de la importancia de su función en el sistema.

La inclusión de estos elementos en una evaluación de criticidad necesariamente refleja los objetivos de los tomadores de decisiones quienes en último término darán las recomendaciones para dicha evaluación; por ello es necesario definir tanto la finalidad de la evaluación de criticidad como la audiencia objetivo a la que interesa esa evaluación.

Así, por ejemplo, mientras que los tomadores de decisiones de un área municipal centran su interés en los activos e infraestructura de alto desempeño y de utilización masiva en todos los modos de transporte, para el tomador de decisiones de una agencia específica (p. ej. una línea férrea, un aeropuerto) el interés se centra en los activos que la agencia posee y opera para atender a una demanda particular (FHWA, 2014).

La Tabla 3.1 muestra un ejemplo de cuatro hipotéticos estudios sobre criticidad en sistemas de transporte con diferentes objetivos, donde se ve cómo el tipo de audiencia objetivo y el resultado deseado perfilan de manera distinta los detalles de evaluación de la criticidad.

Tabla 3.1 Perfiles de evaluación de criticidad según audiencia objetivo y resultado deseado

Objetivo del estudio	Audiencia objetivo	Resultado deseado	Alcance	Rol de partes interesadas	Criterios de criticidad potencial
Incrementar la conciencia pública sobre el riesgo climático para los activos de transporte	Público en general	Apoyo público para proyectos de adaptación de activos	Limitar el estudio a unos pocos activos de alto perfil entre varios modos	Identificar partes interesadas, incluyendo a no-expertos e involucrarlos en todo el proceso	Activos con la mayor utilización, los que dan acceso centros de trabajo, de salud y de seguridad social.
Iniciar implementación de proyectos de adaptación (en particular diseño de activos de transporte)	Tomadores de decisiones de alto nivel dentro de las agencias de transporte involucradas	Diseño de infraestructura de puentes planeada para características actualizadas de tormenta severa	Limitar el estudio a los activos que la agencia posee y opera; incluyendo posiblemente activos planeados	Involucrar a ingenieros, gerentes de operación y mantenimiento y personal activo en campo, en las reuniones para determinar la criticidad	Activos de transporte de costo elevado, y activos con diseños de larga vida.
Promover una creciente coordinación y comunicación entre las agencias relevantes	Personas contacto en cada agencias y en asociaciones de agencias	Trabajar para compartir la información y aumentar la coordinación en relación a eventos de emergencia	Centrarse en activos de transporte en los que múltiples agencias tienen interés común	Involucrar a ejecutivos de niveles medio y superior de las distintas agencias, en las reuniones para determinar criticidad	Activos de transporte de carácter multimodal o que conviven con otros sistemas relevantes como electricidad, comunicaciones, suministro de agua o rutas de evacuación
Investigar estrategias potenciales de gestión del riesgo	Sector académico y ONGs regionales	Lograr consenso sobre las mejores prácticas para la evaluación del riesgo	Incluir un rango amplio de modos de transporte y sus activos en la evaluación; determinar criticidad en varios activos más que enfocarse en unos cuantos seleccionados	Desarrollar un enfoque que pueda aplicarse en otras regiones	Criterios que puedan aplicarse en distintas regiones en el país, de carácter transversal y que abarquen a un amplio rango de tomadores de decisiones

Fuente: Adaptado de: FHWA.(2014). *Assessing Criticality in Transportation Adaptation Planning*.

La criticidad toma en cuenta impactos de mayor alcance que los de las consecuencias comentadas en el inciso anterior, tales como: afectaciones a las cadenas de suministro por las interrupciones de los flujos de carga; caída de demanda en el sector turismo derivado de disrupciones en los movimientos de pasajeros o efectos de los impactos de las disrupciones sobre las poblaciones económica o socialmente vulnerables.

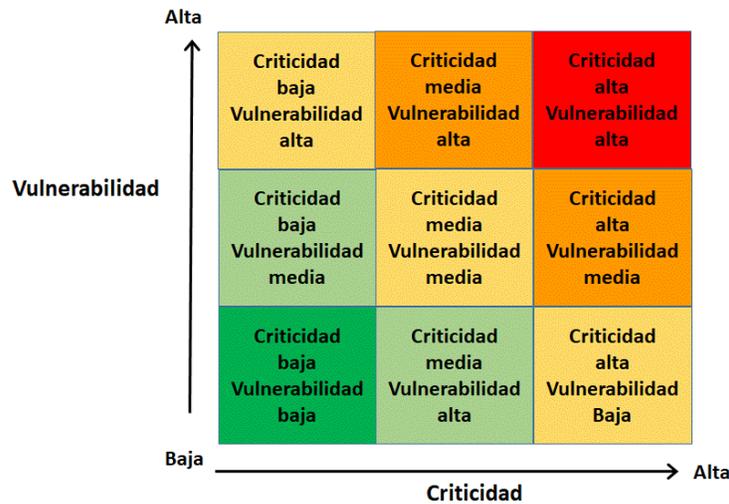
Las medidas de criticidad, análogamente a las del riesgo o la vulnerabilidad, son necesarias para las tareas de priorizar acciones y recursos. Comúnmente, los componentes que integran la medida de criticidad se determinan conjuntamente con el desarrollo del resto del análisis de resiliencia. A este respecto, la administración norteamericana de carreteras, Federal Highway Administration recomienda que las tareas de priorización basadas en la criticidad de los elementos del sistema de transporte se realicen tempranamente en el proceso de planeación, para poder

dirigir los análisis de vulnerabilidad y resiliencia posteriores hacia los elementos más importantes del sistema de transporte (FHWA, 2014).

Puesto que las medidas de criticidad contemplan afectaciones sociales o económicas de amplio alcance, es conveniente que su elección y evaluación se haga consultando la opinión de las partes interesadas en el sistema de transporte, así como de la consulta pública. Un ejemplo de esto es la postura de la agencia norteamericana Hampton Roads Transportation Planning Organization (HRTPO) que da a la criticidad un significado regional, incluyendo entre sus principales componentes de medición, la utilización de la infraestructura, los tiempos de traslado y la accesibilidad a los principales centros de trabajo, destinos turísticos y comunidades de bajos ingresos (National Academies of Sciences, 2021).

La influencia que la vulnerabilidad y la criticidad tienen en la resiliencia permite utilizar estos dos elementos de manera conjunta para guiar la determinación de prioridades en las tareas de refuerzo de la resiliencia.

Una manera gráfica de ver esto es con una matriz como las usadas en el análisis de riesgo, mostrada en la figura 3.1. El eje vertical muestra los niveles de vulnerabilidad y el horizontal los de criticidad, ambos en orden creciente. El código de colores tipo semáforo, señala la intensidad de refuerzo requerido para mejorar la resiliencia en cada combinación. Desde el verde que indica baja intensidad debido a una leve vulnerabilidad en elementos de baja criticidad hasta el rojo que indica un gran esfuerzo para la mejora en elementos muy vulnerables y a la vez muy relevantes para el sistema de transporte.



Fuente: Elaboración propia, basada en National Academies of Sciences (2021).

Figura 3.1 Matriz criticidad-vulnerabilidad para priorizar refuerzo de resiliencia

Así, al evaluar inversiones necesarias para mejorar la resiliencia del sistema de transporte, la prioridad va creciendo desde los que tienen bajos valores tanto en

vulnerabilidad como en criticidad (esquina inferior izquierda, verde) hasta los de valores más altos, los más importantes y vulnerables a la vez (esquina superior derecha, rojo) que requieren el mayor esfuerzo para fortalecer la resiliencia.

3.2 La metodología RAMCAP

El acrónimo RAMCAP hace referencia a la metodología llamada *Risk Analysis and Management for Critical Asset Protection* (Análisis y Gestión del Riesgo para Protección de Activos Críticos) originalmente desarrollada por la American Society of Mechanical Engineers (ASME), como un procedimiento completo, consistente y objetivo para evaluar el riesgo para diversos tipos de activos e infraestructuras y posibles peligros (National Academies of Sciences, 2021).

Este desarrollo surgió como una respuesta de más de 100 ejecutivos de alto nivel del sector privado, a recomendaciones de una conferencia de la Casa Blanca norteamericana en 2002, sobre el tema de la protección a la infraestructura crítica de los Estados Unidos. Estos ejecutivos tuvieron como máxima prioridad construir un método objetivo, consistente y eficiente para evaluar y disminuir riesgos de infraestructura en términos de directamente comparables entre los activos y las infraestructuras de un sector determinado con las de otros sectores.

Los propios ejecutivos reconocieron que no se podía lograr ningún proceso universal que encajara de manera única en toda la gama de sectores con infraestructura crítica, a menos que se hiciera alguna adaptación a cada sector en particular.

La metodología RAMCAP y su más reciente versión RAMCAP Plus es un proceso de gestión de la resiliencia y de riesgos de todo tipo para protección de infraestructuras críticas. Su objetivo es identificar y dar prioridad a las inversiones necesarias para proteger las infraestructuras críticas a nivel nacional, buscando evitar eventos disruptivos y su impacto, así como fortalecer la resiliencia para recuperar con rapidez el funcionamiento después de las interrupciones.

RAMCAP considera todos los peligros previsible, incluyendo desastres naturales, terrorismo, sabotaje, dependencias de las cadenas de suministro, eventos de contaminación de productos y proximidad a sitios peligrosos. Es un enfoque general, diseñado específicamente para ser usado por el personal y la administración de los activos de infraestructura, con un mínimo de capacitación o requerimientos de experiencia externa. Resulta particularmente eficaz cuando se adapta a un sector específico, como puede ser el de la energía, el de suministro de agua o los ambientes universitarios.

Al ser un enfoque con base objetiva, cuantitativo y estandarizado, permite comparar directamente el riesgo, la resiliencia y los beneficios de distintas inversiones en seguridad y resiliencia, para lograr una asignación racional de recursos en cualquier escala, regional o nacional (Brashear and Jones, 2010).

El procedimiento general de análisis RAMCAP tiene siete etapas que incluyen tareas específicas (ASME Innovative Technologies Institute, LLC, 2009):

1. Caracterización de los activos.
 - a. Identificación de activos críticos.
 - b. Identificación de infraestructuras críticas e interdependencias.
 - c. Identificación de contramedidas en uso, códigos y estándares de construcción.
 - d. Identificar consecuencias potenciales.
 - e. Seleccionar objetivos para un análisis más detallado.
2. Caracterización de las amenazas.
 - a. Amenazas de referencia.
 - b. Amenazas terroristas.
 - c. Peligros Naturales.
 - d. Riesgos de dependencia y proximidad.
 - e. Evaluaciones adicionales.
3. Análisis de las consecuencias.
 - a. Estimación de las consecuencias del terrorismo.
 - b. Estimación de las consecuencias de los peligros naturales.
 - c. Estimación de las consecuencias de los peligros de dependencia y proximidad.
4. Análisis de vulnerabilidad.
5. Evaluación de amenazas.
 - a. Estimación de la probabilidad de eventos terroristas.
 - b. Consideraciones generales para los métodos de estimación de probabilidad de RAMCAP Plus.
 - c. Evaluación adicional.
 - d. Resumen de tres enfoques:
 - ✓ Método uno: método de razón numérica
 - ✓ Método dos: comparación de la tolerancia al riesgo con el riesgo de amenazas naturales
 - ✓ Método tres: punto de equilibrio de la inversión
6. Evaluación del riesgo y la resiliencia.
7. Gestión del riesgo y de la resiliencia.
 - a. Decidir qué niveles de riesgo y resiliencia son aceptables.

- b. Definir las contramedidas y opciones de mitigación/resiliencia.
- c. Evaluar cada contramedida y opción de mitigación/resiliencia.
- d. Acumular los beneficios de cada opción.
- e. Estimar los beneficios netos y las relaciones costo-beneficio para cada opción.
- f. Seleccionar entre las opciones y la asignación de recursos.
- g. Implementar, monitorear y evaluar el desempeño de las opciones seleccionadas.
- h. Realizar evaluaciones de riesgos adicionales.

En el procedimiento RAMCAP, el riesgo se calcula con base en la “peor consecuencia plausible” que resultara de daños a activos o infraestructura críticos. Además, se requiere establecer un escenario de la posible amenaza que caracterice el peligro y su magnitud.

El cálculo del riesgo se hace como sigue:

$$\text{Riesgo} = (\text{Probabilidad de amenaza}) \times \text{Vulnerabilidad} \times \text{Consecuencia}$$

- La probabilidad de amenaza corresponde al evento de que un activo dado se encuentre en el escenario de riesgo.
- La vulnerabilidad es la probabilidad de que el activo en cuestión resulte dañado o destruido estando en el escenario de riesgo.
- La consecuencia representa los costos para los dueños del activo y para los usuarios a consecuencia del escenario de desastre.

Respecto de la criticidad, RAMCAP no incluye medidas de este concepto por sí mismo, sino que más bien toma en cuenta impactos económicos de mayor alcance causados por las interrupciones del servicio, los cuales típicamente se manejan en la estimación de la criticidad en cualquier nivel de análisis (National Academies of Sciences, 2021).

4. Métricas e indicadores para resiliencia

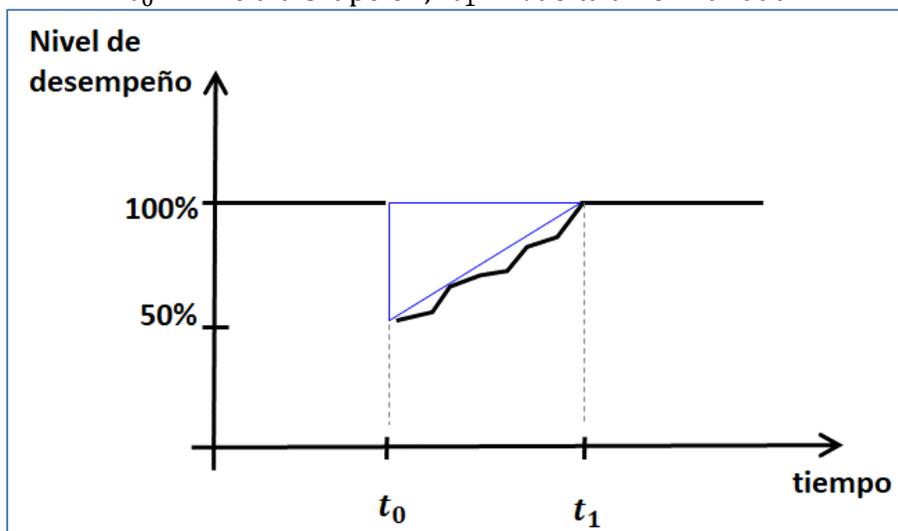
La idea de resiliencia se liga naturalmente al desempeño del sistema de transporte. La resiliencia del sistema reduce la probabilidad de sufrir interrupciones, la magnitud de los impactos y el tiempo para la recuperación. En esta perspectiva dos aspectos del sistema de transporte son relevantes: la funcionalidad y la recuperación posterior al evento disruptivo.

Se puede percibir la resiliencia del sistema de transporte observando su funcionalidad en el tiempo que tardó en recuperar la normalidad luego de una interrupción. Una forma básica que ilustra esto es el *triángulo de resiliencia* (Tierney and Bruneau, 2007) mostrado en la Figura 4.1, donde al tiempo t_0 ocurre una interrupción que reduce el desempeño al 50%, que se recupera gradualmente hasta volver al 100% en el tiempo t_1 . El área del triángulo da idea de la magnitud de la pérdida de funcionalidad (longitud del lado vertical) y del tiempo de recuperación (longitud del lado horizontal), aunque sin información sobre la probabilidad de ocurrencia de la interrupción.

De la gráfica se ve que la tasa de recuperación en porcentaje por unidad de tiempo es la pendiente de la hipotenusa del triángulo, en este ejemplo:

$$\text{Tasa de recuperación} = \text{Pendiente} = \frac{100\% - 50\%}{t_1 - t_0}$$

t_0 = inicia interrupción; t_1 = vuelta a normalidad

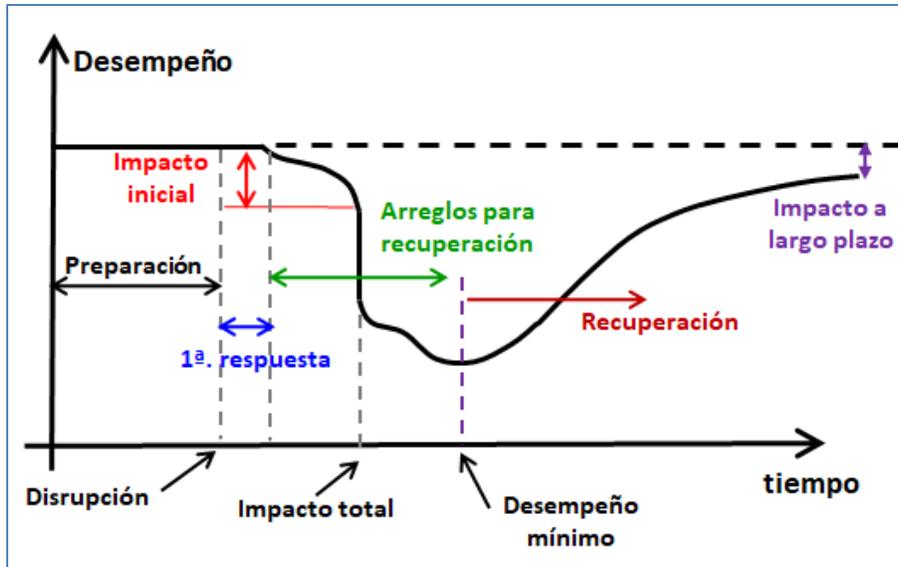


Fuente: Elaboración propia, adaptado de Tierney and Bruneau (2007).

Figura 4.1. Esquema del triángulo de resiliencia.

La Figura 4.1 sugiere que toda acción encaminada a mejorar la resiliencia del sistema debería reflejarse en una disminución del área del triángulo de resiliencia, o a un aumento de la tasa de recuperación, ya sea con estrategias que mejoren la funcionalidad y/o que reduzcan el tiempo de recuperación.

Un antecedente del esquema anterior es la descripción de las etapas básicas de una disrupción significativa en la cadena de suministro propuesta por Sheffi and Rice (2005), mostrada en la Figura 4.2.



Fuente: Elaboración propia, con base en Sheffi & Rice (2005).

Figura 4.2. Etapas de una disrupción significativa en la cadena de suministro.

Las etapas de una disrupción significativa en una cadena de suministro son:

1. Preparación. Es la etapa previa a la disrupción, cuando se tiene noticia de que se aproxima (ciclones, huelgas de operadores, etc.). No siempre se tiene esta etapa, pues algunas disrupciones surgen inesperadamente.
2. Disrupción. Es la etapa que inicia en el momento que la disrupción surge.
3. Primera respuesta. Esta etapa comprende las primeras reacciones de la cadena de suministro ante la disrupción, generalmente con acciones de control, protección de personal y activos, desconexión de sistemas eléctricos, etc.
4. Impacto inicial. Es la primera consecuencia visible de la disrupción, no necesariamente el impacto total de esta.

5. Impacto total. Es el efecto que produce la disrupción en toda su intensidad, reduciendo el desempeño bruscamente, y provocando un deterioro posterior hasta llegar a un desempeño mínimo.
6. Arreglos para la recuperación. Son las acciones encaminadas a remediar la situación, con una planeación mejorada luego de la primera respuesta, aunque en casos en que se tiene la etapa de preparación, podrían iniciarse desde la primera respuestas.
7. Recuperación. Es la etapa que se inicia luego de llegar al nivel mínimo de desempeño, y que gradualmente recobra la funcionalidad de la cadena para regresar a operación normal.
8. Impacto a largo plazo. Este impacto representa la posibilidad de que la cadena de suministro no logre regresar exactamente al nivel de desempeño que tenía antes de la disrupción y que se necesite mucho tiempo para lograrlo.

Estos esquemas que describen el estado de un sistema que sufre una disrupción sustancial, llevan a considerar el análisis de la funcionalidad del mismo utilizando las curvas que muestran el nivel de recuperación conforme avanza el tiempo.

4.1 Curvas de recuperación de funcionalidad

El análisis de resiliencia con énfasis en el desempeño del sistema, puede detallarse más considerando la secuencia de estados observados cuando ocurre un evento disruptivo, con una gráfica llamada curva de recuperación de funcionalidad, que representa los cambios en la funcionalidad del sistema ante un evento disruptivo, conforme pasa el tiempo hasta que recupera la normalidad.

Es importante notar que la funcionalidad del transporte puede medirse de diversas maneras, lo que implica el uso de métricas distintas para tener una descripción completa del servicio que proporciona.

Por ejemplo, en un sistema de puentes fronterizos, los volúmenes de tráfico que cruzan y los tiempos de espera en cola en los puentes pueden evolucionar de manera distinta dando curvas de recuperación de funcionalidad diferentes. Cuando se trata de redes de transporte, es posible que el interés esté en la capacidad de flujo vehicular ya sea de carga o de pasajeros, o el grado de conectividad que mantiene luego de un evento disruptivo.

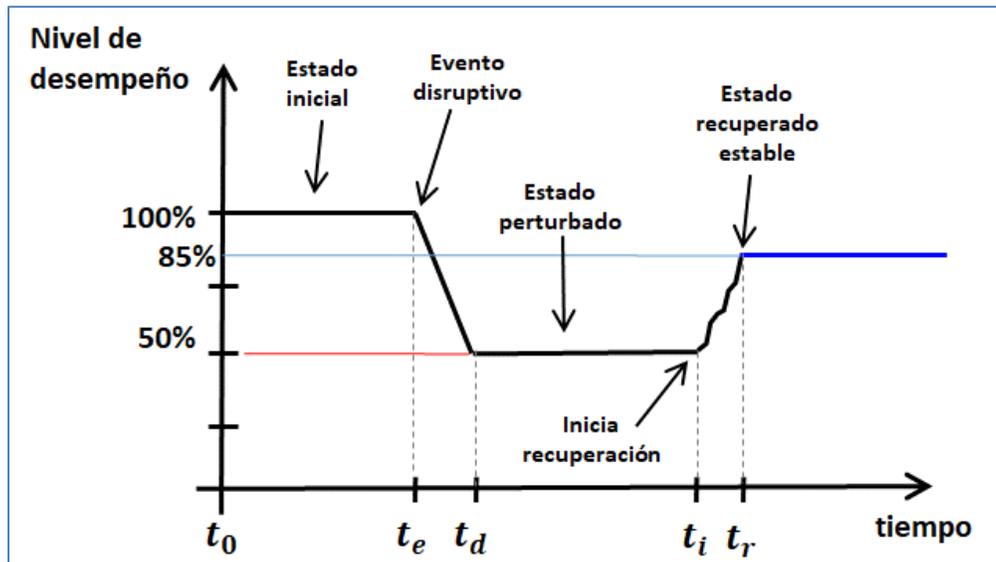
Así, para evaluar la resiliencia en un sistema de transporte puede requerirse de varias curvas de recuperación de funcionalidad, cada una reflejando distintos aspectos de la funcionalidad, con métricas distintas.

La Figura 4.3 muestra una curva de recuperación de funcionalidad del sistema de transporte, iniciando en el tiempo t_0 con 100% de desempeño. En el instante t_e ocurre un evento inesperado que reduce el desempeño y al llegar al tiempo t_d baja

al 50%, que es la máxima interrupción resultante. El desempeño reducido dura hasta el tiempo t_i cuando inicia la recuperación, y continúa hasta el tiempo t_r cuando se tiene un estado recuperado estable, que si bien no es el 100% original, es un nivel aceptable que posteriormente se llevará al 100%.

Las curvas de recuperación de funcionalidad pueden reflejar el desempeño de los componentes del sistema de transporte (infraestructura, flotas vehiculares, etc.), pero para evaluar el desempeño del sistema de transporte en su totalidad hay que tener las curvas de recuperación de funcionalidad de los componentes individuales del transporte, las cuales permitirán la evaluación a nivel sistema.

Las curvas de funcionalidad pueden tener representaciones cuantitativas distintas. En sistemas complejos como es el caso de redes de transporte urbano, suelen ser funciones continuas, lo que permite el modelado matemático, analítico o basado en resultados experimentales.



Fuente: Elaboración propia, adaptado de National Academy of Sciences (2021).

Figura 4.3. Gráfica general de recuperación de funcionalidad.

En componentes de transporte individuales, podría haber solo un reducido número de valores discretos, p. ej., en una plaza de cobro donde se cuenta el número de carriles funcionando, o pueden tenerse valores binarios 1–0 como en un cruce urbano con un semáforo para indicar si el dispositivo funciona (1) o no funciona (0).

Ya que las curvas de recuperación de funcionalidad resumen información sobre la resiliencia, se pueden aplicar para el transporte en una diversidad de tipos de activo, sistemas o subsistemas y clase de interrupciones. Y si bien cuando se mide funcionalidad debe especificarse para cada caso, las métricas asociadas al sistema de transporte pueden definirse de modo general, para hacerlas independientes del evento disruptivo y también independientes del sistema o del modo de transporte,

para que sea posible usarlas en cualquier activo, sistema, modo de transporte o riesgo disruptivo (National Academies of Sciences, 2021).

En la Figura 4.3 se supone funcionalidad inicial de 100%, condición que solo ocurre en diseño de proyecto o en infraestructuras nuevas. En la realidad, el desempeño inicial previo a la disrupción podría ser algo menor al 100% ideal, por razones de envejecimiento de la infraestructura y equipos, o por tareas de mantenimiento regular que reducen en una pequeña cantidad el desempeño original de 100%.

Alternativamente, el desempeño posterior a la disrupción podría ser mayor al desempeño original, p. ej. un valor de 120% de desempeño respecto al original, al aprovechar la oportunidad que brinda la disrupción de resolver problemas preexistentes que no se hubieran abordado.

Sobre posibles formas analíticas de funciones de recuperación de funcionalidad, Cimellaro et al (2019) sugieren tres casos básicos, descritos como sigue.

a) La forma lineal:

$$f(t) = a \left(\frac{t - t_e}{t_r - t_e} \right) + b$$

b) La forma exponencial:

$$f(t) = 1 - a \exp \left[-b \left(\frac{t - t_e}{t_r - t_e} \right) \right]$$

c) La forma trigonométrica:

$$f(t) = a \left[1 + \cos \left(b\pi \left(\frac{t - t_e}{t_r - t_e} \right) + k\pi \right) \right] + c$$

t_r : tiempo de ocurrencia del evento disruptivo

t_r : tiempo de vuelta a la recuperación

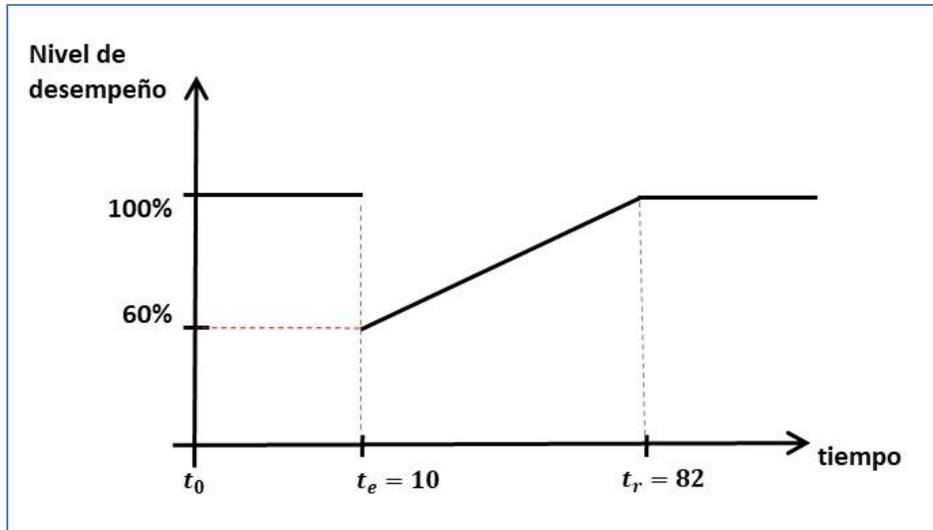
a, b, c : constantes de calibración

k : valor para ajustar la fase del coseno a los puntos empíricos

La calibración suele obtenerse por el método de mínimos cuadrados usando los puntos empíricos observados en la curva a lo largo del periodo de recuperación.

Las Figuras 4.4, 4.5 y 4.6 muestran un ejemplo de cada forma.

La función lineal de recuperación de funcionalidad de la Figura 4.4 muestra en el tiempo $t = 10$ el impacto de un evento disruptivo que reduce el desempeño al 60%. La recuperación inicia gradual y constante hasta el tiempo $t = 82$ donde se vuelve a un 100% en el desempeño.

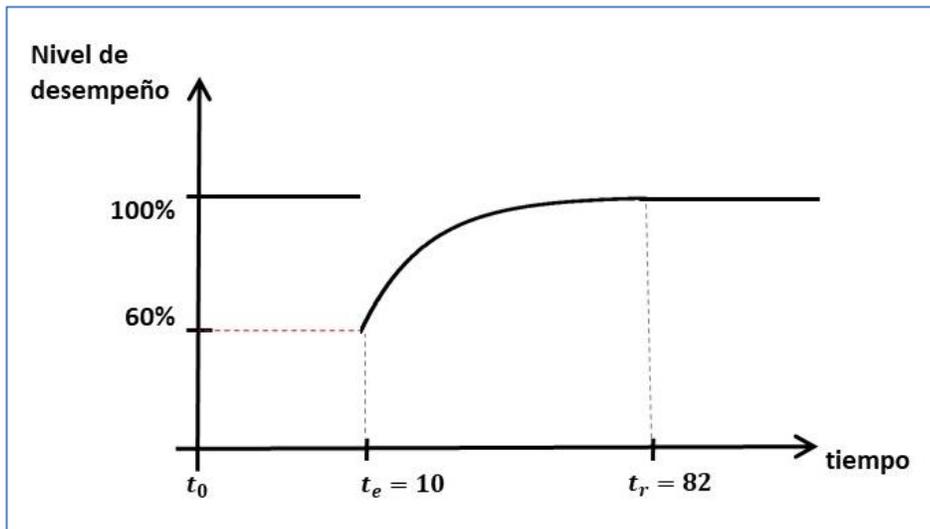


Fuente: Elaboración propia, adaptado de Cimellaro *et al.* (2019).

Figura 4.4. Función de recuperación lineal.

La forma lineal suele usarse cuando se carece de información sobre la disponibilidad de recursos, el nivel de preparación para enfrentar la disrupción o la respuesta social al evento, y supone una recuperación gradual constante.

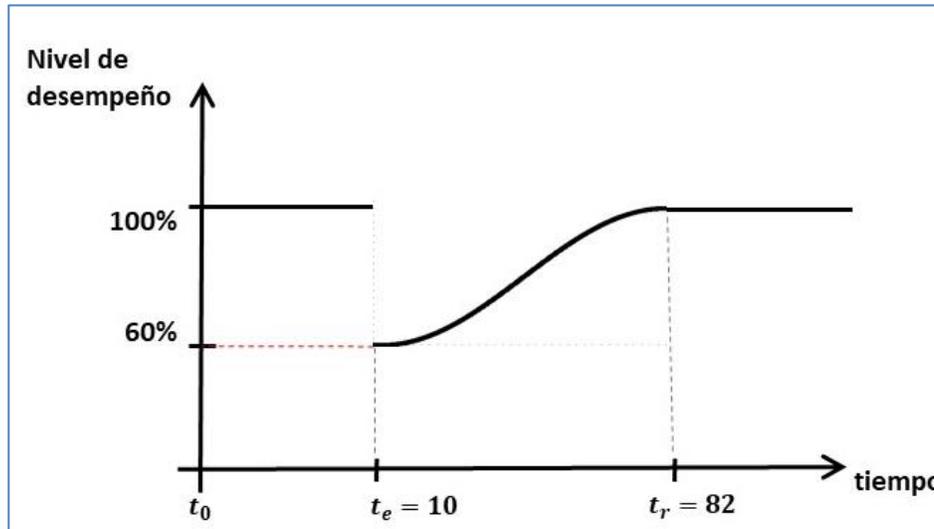
La Figura 4.5 muestra una función exponencial de recuperación de funcionalidad con el mismo inicio de la disrupción y tiempo de recuperación anteriores.



Fuente: Elaboración propia, adaptado de Cimellaro *et al.* (2019).

Figura 4.5. Función de recuperación exponencial.

La función exponencial de recuperación puede modelar el caso en que la respuesta organizacional o social ante el evento es empujada por un flujo inicial de recursos que arranca una recuperación acelerada, para luego reducirse rápidamente a medida que se llega a la recuperación del nivel original.



Fuente: Elaboración propia, adaptado de Cimellaro *et al.* (2019).

Figura 4.6. Función de recuperación trigonométrica.

La función trigonométrica de recuperación de la Figura 4.6 puede modelar el caso donde, al iniciar la disrupción, escasean los recursos o la capacidad de respuesta, pero que, conforme las entidades responsables del sistema se organizan y llega apoyo social, la recuperación se agiliza y rápidamente se vuelve al estado inicial.

4.2 Algunos indicadores y métricas de resiliencia

Para observar la evolución de la resiliencia de los activos del sistema de transporte, es común usar indicadores. Estos indicadores estiman el nivel de resiliencia de los activos o del sistema completo cuando hay una disrupción inusual y desmesurada.

Como ejemplo de esto, las agencias norteamericanas de planeación del transporte, han utilizado ampliamente indicadores para evaluar sus avances en la implementación y mejora de la resiliencia de sus sistemas. Caso típico es la Autoridad del Transporte Metropolitano del Condado de Los Angeles, en California (LACMTA), que tiene un conjunto de indicadores técnicos (enfocados a infraestructura y activos) y organizacionales (enfocados en la agencia y sus relaciones) que cubren la mayoría de aspectos relevantes para la resiliencia.

Los indicadores técnicos consideran:

Robustez y Redundancia de los activos de infraestructura.

Los indicadores organizacionales se consideran:

La Gestión de Información y Comunicaciones; la Planeación y Preparación para Respuesta a todo Riesgo; la Prevención Financiera; las Redes de Relaciones y Personal y el Liderazgo y la Cultura.

Cada indicador considera una calificación que va de 1 a 4, donde 4 es el más alto nivel de resiliencia; estas calificaciones suelen transformarse a porcentajes para un mejor entendimiento del público general.

Así, entre los indicadores técnicos de *redundancia*, LACMTA tiene uno llamado *capacidad de ruta/modo alternativo* donde el puntaje más bajo es la condición “*que la capacidad del modo alterno sea menor al 25% de la del modo interrumpido durante el pico de demanda*” mientras que la puntuación más alta es para la condición “*que el modo alterno, sin afectación tenga más del 75% de la capacidad del modo interrumpido durante el pico de demanda*” (National Academies of Sciences, 2021).

Un dato interesante de los indicadores de LACMTA es que, en su propuesta de 2015, se enfocaban solo en eventos climáticos extremos derivados al cambio climático, mientras que en su versión 2020 adoptaron el enfoque de “todo tipo de riesgo”, considerando que muchas de las acciones requeridas para asegurar la resiliencia contra el cambio climático son las mismas que se necesitan para garantizarla contra cualquier otro peligro; la versión 2020 ya reconoce 11 riesgos de causas naturales y 9 riesgos de causas humanas.

La Tabla 4.1 da un breve resumen de indicadores y métricas usadas en varias agencias norteamericanas de planeación del transporte.

Se muestran los indicadores de salida para su toma de decisiones para mejora de la resiliencia, las mediciones intermedias para calcular los indicadores y los datos requeridos.

Tabla 4.1. Ejemplos de indicadores y métricas de agencias norteamericanas

Agencia	Indicador de Salida	Mediciones intermedias	Datos requeridos
Colorado Department of Transport	Riesgo anual	Probabilidad del riesgo	Probabilidad de derrumbes. Probabilidad de inundaciones. Probabilidad de caída de escombros.
		Vulnerabilidad	Evaluación ingenieril.
		Consecuencias	Costo de reparaciones para Colorado DOT. Días de cierre de carreteras. Longitud de las desviaciones requeridas. Pérdida de salarios de operadores e ingresos de transportistas.
Utah Department of Transport	Valor del riesgo	Probabilidad del riesgo	Probabilidad de derrumbes. Probabilidad de inundaciones. Probabilidad de caída de escombros. Probabilidad de avalancha. Probabilidad de terremoto.
		Consecuencias	Costo de reparaciones para Utah DOT. Longitud de las desviaciones requeridas. Valor del tiempo en hora. Costos horarios de operación vehicular.
Colorado Department of Transport	Nivel de resiliencia	Criticidad	Valor de la carga. Valor del turismo. Índice de Vulnerabilidad Social (SoVI).
		Riesgo anual (ver fila previa)	
Utah Department of Transport	Prioridad del riesgo	Criticidad	Redundancia de la red carretera. Tránsito promedio diario anual. Tráfico de carga promedio diario.
		Valor del riesgo (ver fila previa)	
San Diego International Airport	Vulnerabilidad	Exposición	Número de días de calor extremo al año. Área expuesta a inundaciones. Percentil 95 del riesgo de elevación del nivel del mar.
		Consecuencias	Daño a los activos. Disrupción del servicio. Pérdida de empleos. Consecuencias a la seguridad de la vida. Daño al hábitat de las aves.
Los Angeles (LACTMA)	Indicadores de resiliencia	Robustez/ Redundancia/ Gestión de la información y comunicación	Valoración del diseño y/o la vulnerabilidad. Partes de repuesto y equipamiento. Exhortos y conciencia pública.
		Planeación para toda clase de peligros, preparación y respuesta	Seguimiento a los recursos esenciales.
		Previsiones financieras. Liderazgo y cultura.	Disponibilidad de capital. Toma de decisiones en estado de crisis.
Port Authority of New York & New Jersey	Guías de diseño	Probabilidad del riesgo	Proyección de la elevación del nivel del mar. Proyección del aumento en la precipitación pluvial.
		Vida de servicio de los activos	Proyección del aumento de temperatura. Número de años esperados antes de que se reeemplace el activo.
		Criticidad de los activos	Clasificación de los activos en las categorías de "crítico" y "no-crítico"

Tabla 4.1. (cont.) Ejemplos de indicadores y métricas de agencias norteamericanas

Agencia	Indicador de Salida	Mediciones intermedias	Datos requeridos
New York City	Guías de diseño	Probabilidad del riesgo	Proyección del aumento de la temperatura. Proyección del aumento en la precipitación pluvial. Proyección de la elevación del nivel del mar.
		Consecuencias	Daños a las instalaciones. Daños a comunidades aledañas.
		Vida útil de los activos	Durabilidad de los activos. Facilidad de reemplazo de los activos.
		Criticidad de los activos	Servicios proporcionados. Importancia en caso de emergencia.
Colorado Department of Transport	Beneficios netos de las mejoras a la resiliencia	Riesgo anual sin las mejoras. Riesgo anual con las mejoras. Costo de las mejoras implementadas.	***
Utah Department of Transport	Beneficios netos de las mejoras a la resiliencia	Prioridad en los riesgos (ver fila previa). Costo de las mejoras implementadas.	***
Hampton Roads (HRTPO)	Beneficios netos de las mejoras a la resiliencia	Probabilidad del riesgo	Riesgo de inundaciones.
		Vulnerabilidad	Efectos de las inundaciones, puentes y túneles.
		Consecuencias	Impactos económicos más amplios de las interrupciones del transporte.
New York City	Beneficios netos de las mejoras a la resiliencia	Beneficios directos	Análisis cuantitativos para proyectos de más de \$50 millones de dólares.
		Beneficios indirectos	Análisis cuantitativos para proyectos que no rebasen \$50 millones de dólares.
		Otros beneficios y costos	

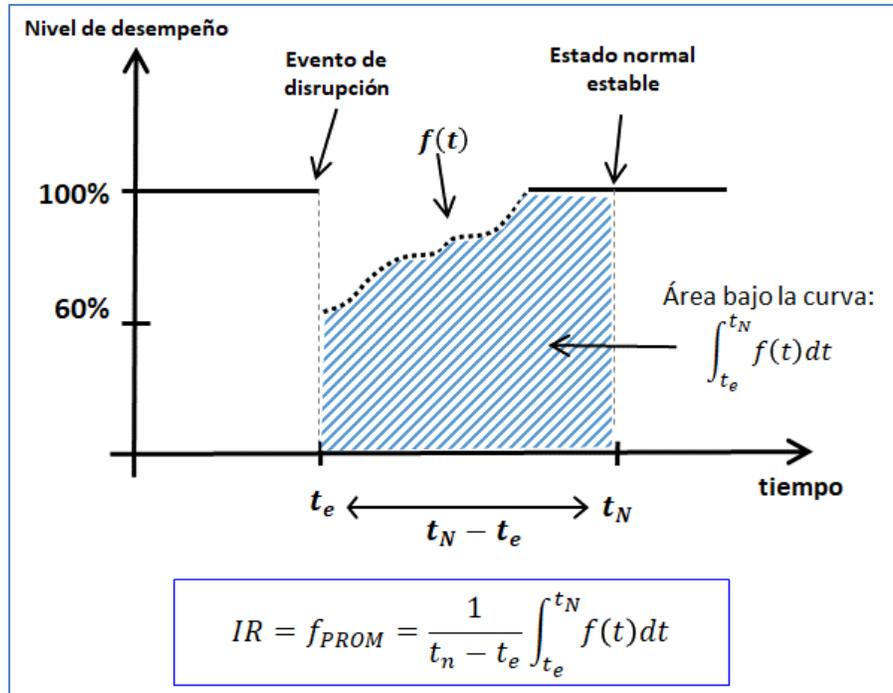
Fuente: Investing in Transportation Resilience: A Framework for Informed Choices, National Academy of Sciences., 2021).

4.3 Un indicador de resiliencia basado en recuperación de funcionalidad

Del enfoque cuantitativo de las curvas de recuperación de funcionalidad del sistema de transporte ha surgido el *índice de resiliencia IR*, definido como el valor promedio de la curva en el intervalo desde el inicio del evento disruptivo t_e hasta un tiempo t_N de funcionamiento normal estable. Cuando la curva de recuperación $f(t)$ es una función continua, su valor promedio f_{PROM} se obtiene integrando dicha función y dividiendo el resultado entre la longitud del intervalo, como ilustra la Figura 4.7:

$$IR = f_{PROM} = \frac{1}{t_N - t_e} \int_{t_e}^{t_N} f(t) dt$$

t_e = tiempo de inicio de la interrupción; t_N = tiempo de vuelta a la normalidad.



Fuente: Elaboración propia, adaptado de National Academies of Sciences (2021).

Figura 4.7. Índice de resiliencia referido a la curva de recuperación.

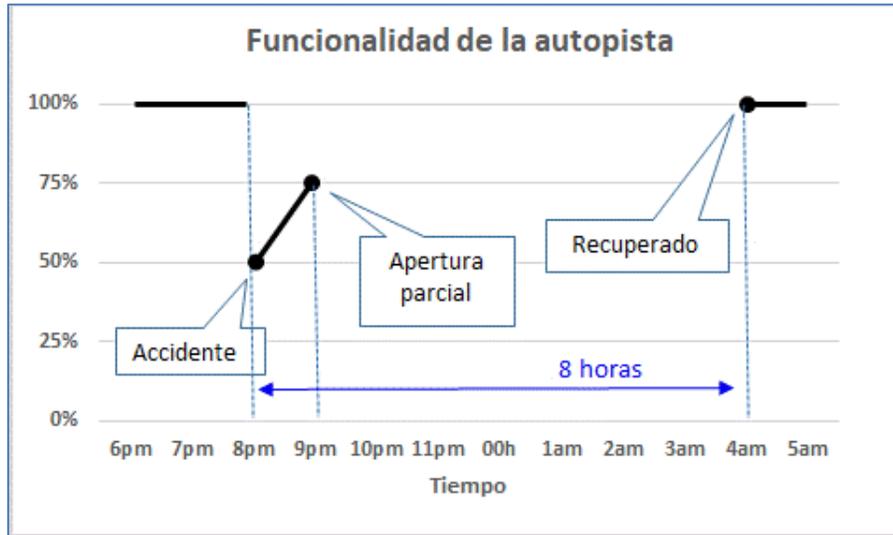
La integral del IR mide el área bajo la curva de recuperación y representa el acumulado de porcentaje de funcionalidad durante el periodo de recuperación, de modo que *el índice de resiliencia es el promedio de la funcionalidad disponible en el periodo de recuperación.*

Un breve análisis de caso

Para calcular el índice de resiliencia IR, se requieren datos del nivel de funcionalidad durante el intervalo de recuperación (curva punteada en la Figura 4.6). Con estos datos, se busca alguna función matemática adecuada para ajustar, generalmente con el método de mínimos cuadrados, y así calcular la integral del índice IR.

Un ejemplo típico de recuperación fue un accidente que obstruyó la Carretera Federal 57, México–Querétaro, el 30/nov/2021 (El Universal Querétaro, 2021). Según el reporte de El Universal, a las 8pm del martes 30/nov/21, una pipa que transportaba leche se volcó en el km 171 de la Carretera Federal 57, en dirección a Ciudad de México, bloqueando esa dirección durante una hora. Luego de ese tiempo se reabrió parcialmente la circulación hacia CDMX, y fue hasta las 4am del viernes 01/dic/2021 que se restableció la circulación normal.

Aunque son muy pocos datos, considerando la funcionalidad de la carretera, se observa que antes de las 8pm operaba al 100%, y en ese instante cayó al 50% pues el flujo hacia CDMX se suspendió totalmente; luego de una hora, se restableció parcialmente, regresando a un 75% de su funcionalidad, y hasta las 4am del día siguiente se recuperó al 100%. La Figura 4.8 ilustra la situación.



Fuente: Elaboración propia, con base en El Universal Querétaro (2021).

Figura 4.8. Accidente en Carretera 57 del 30/nov/21 y la recuperación.

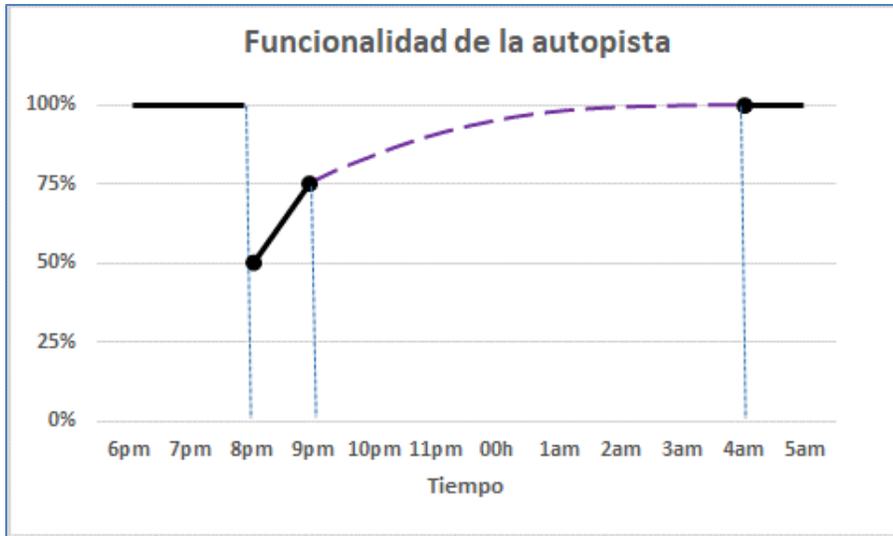
Para calcular el índice de resiliencia IR, se requiere buscar una curva continua que conecte los puntos en el intervalo de recuperación, como se ve en la Figura 4.9.

El índice IR entonces es el porcentaje que el área bajo la curva representa del área del rectángulo con base de 8 horas (duración de la recuperación) y altura 100% que es la funcionalidad original. Este valor es la funcionalidad promedio de la autopista considerando todo el periodo de recuperación.

En este ejemplo, se ajusta fácilmente una curva que pasa por los tres puntos de la gráfica, usando un ajuste de mínimos cuadrados directamente con Excel, como se muestra en la Figura 4.10; la curva resultante es logarítmica con buen valor de R².

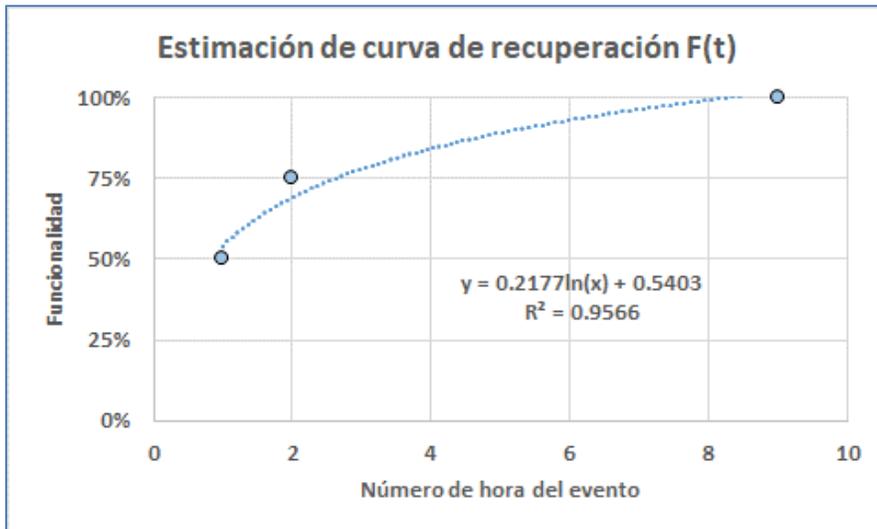
El IR resultante es entonces:

$$IR = \frac{1}{8} \int_1^8 [0.5403 + 0.2177 \ln(x)] dx = 0.734969$$



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.9. Accidente en carretera 57 del 30/nov/21. Una posible curva de recuperación de funcionalidad.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.10. Curva de recuperación de funcionalidad. Ajuste con Excel a una función logarítmica.

Este IR =73.4969% es el valor de la funcionalidad promedio de la autopista con el accidente durante el periodo de recuperación de 8 horas. En este ejemplo no hay información a detalle de la recuperación parcial en la primera hora, ni en el resto del periodo hasta la recuperación total. Con más datos, se podría afinar este cálculo del índice de resiliencia.

En la revisión de literatura, se encontraron como curvas de referencia para la recuperación de funcionalidad, tres tipos: lineal, exponencial y trigonométrica (Cimellaro et al, 2019) comentadas previamente. Los ejemplos numéricos que siguen ilustran cada tipo.

Ejemplos numéricos

Como ejemplo de cálculo del IR, respecto al esquema de la Figura 4.6, se supone un escenario donde ocurre una disrupción en la hora 10, que reduce el nivel de desempeño al 60%. Se inicia el proceso de recuperación y en la hora 82 se logra un estado normal y estable. Entonces: $t_e = 10$, $t_N = 82$. En cada caso, se ajustó la curva correspondiente para que pasara por los puntos del diagrama.

- a) Caso lineal. Suponiendo una recuperación lineal como en la Figura 4.4, la función de recuperación usada en esa gráfica es:

$$f(t) = 0.4 \left(\frac{t - 10}{72} \right) + 0.6$$

El índice de resiliencia resulta:

$$\frac{1}{72} \int_{10}^{82} \left[0.4 \left(\frac{t - 10}{72} \right) + 0.6 \right] dt = 0.8$$

- b) Caso exponencial. Con la función de recuperación de la Figura 4.5, la forma analítica usada para ilustrar el comportamiento es:

$$f(t) = 1 - 0.4 \exp \left[-4.5 \left(\frac{t - 10}{72} \right) \right]$$

El índice de resiliencia resulta:

$$\frac{1}{72} \int_{10}^{82} \left[1 - 0.4 \exp \left[-4.5 \left(\frac{t - 10}{72} \right) \right] \right] dt \approx 0.9121$$

- c) Caso trigonométrico. Con la función de recuperación de la Figura 4.6, la forma analítica que se usó para ejemplificar es:

$$f(t) = 0.6 + 0.2 \left[1 + \cos \left(\pi \left(\frac{t - 10}{72} \right) + 0.93\pi \right) \right]$$

El índice de resiliencia resulta:

$$\frac{1}{72} \int_{10}^{82} 0.6 + 0.2 \left[1 + \cos \left(\pi \left(\frac{t - 10}{72} \right) + 0.93\pi \right) \right] dt \approx 0.7722$$

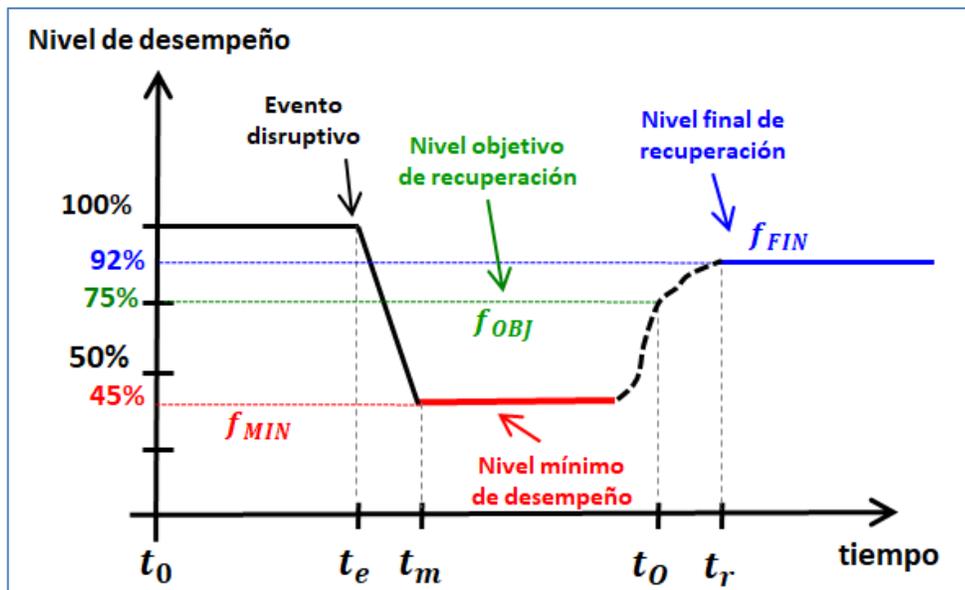
De los IR ejemplificados, el mejor es el caso exponencial con promedio de funcionalidad 0.9121 en el periodo de recuperación, lo que es consistente con un

modelo de reacción rápida ante la disrupción y una recuperación ágil. Le sigue el caso lineal, con un promedio de funcionalidad de 0.8, que supone una reacción dosificada regularmente, cuando no se tiene claridad en la disponibilidad de recursos o apoyos sociales. Finalmente, el caso de la curva trigonométrica con el promedio más bajo de 0.7722, es consistente con el modelo de una reacción lenta o tardía al inicio de la recuperación con un aumento acelerado al final del periodo de recuperación.

Otras métricas referidas a niveles de funcionalidad son: el nivel mínimo de funcionalidad f_{MIN} resultado de la disrupción, el nivel objetivo de recuperación f_{OBJ} que es el nivel que se desea alcanzar con la recuperación, y el nivel final de la recuperación f_{FIN} que es el nivel logrado a más largo plazo cuando el sistema se estabiliza. La figura 4.7 ilustra este comportamiento.

En el tiempo t_e ocurre un evento disruptivo que reduce el desempeño del sistema al 45% en el tiempo t_m . Conforme avanza la recuperación, se alcanza el 75% del desempeño correspondiente al objetivo planteado por los planificadores de la recuperación. Este nivel objetivo depende del criterio de los planificadores y representa un nivel aceptable de operación del sistema de transporte aun cuando no sea del 100%.

A partir del nivel objetivo de la recuperación, la operación del sistema y sus recursos de mantenimiento e inversión lo llevan al nivel final de la recuperación f_{FIN} en el tiempo t_r , que en el ejemplo es el 92% del desempeño original.



Fuente: Elaboración propia, adaptado de National Academies of Sciences (2021).

Figura 4.11. Métricas relativas a los niveles de funcionalidad.

Al término de la recuperación, el nivel final de funcionalidad del sistema puede ser menor al 100% que se tenía antes de la disrupción, e incluso puede ser que el sistema jamás logre el desempeño que tenía antes de la disrupción.

Un ejemplo de esta situación es el puerto japonés de Kobe. Antes del sismo de 1984, Kobe era el 6°. puerto de contenedores más grande del mundo, en cuanto a movimiento de carga; para 1997, cuando las reparaciones fueron completadas. Kobe había caído al lugar 17, y en 2005 aparecía en el lugar 35 (Cimellaro et al, 2019; Wikipedia, 2022).

Finalmente, el nivel de recuperación final f_{FIN} también podría ser mayor al 100% de la funcionalidad original, cuando se aprovecha la oportunidad de las actividades de recuperación para actualizar, modernizar o mejorar al sistema original y obtener una mayor funcionalidad que la original.

Conclusiones

El término *resiliencia*, en su significado más amplio de capacidad de recuperación de un sistema o componente que ha enfrentado una afectación imprevista y desproporcionada, es de gran interés para los sistemas de transporte tanto de carga como de pasajeros. En los últimos años del siglo XX y en lo que va del siglo XXI, los impactos de fenómenos asociados al cambio climático han sido cada vez más agudos y destructivos, despertando un gran interés por construir un marco de referencia sobre resiliencia que ordene las ideas y oriente los desarrollos metodológicos para la aplicación de medidas de recuperación.

En el campo del transporte, los impactos de eventos disruptivos asociados al cambio climático no han sido las únicas causas de la interrupción de las redes de transporte, también se han sumado terremotos, tsunamis, actos terroristas y sabotajes, y en los últimos años, la pandemia de Covid-19 que ha causado estragos que no se habían visto antes. Es por esto que las definiciones de resiliencia que fundamentan la metodología para abordar los impactos de eventos disruptivos, consideran actualmente cualquier tipo de causa, ya sea un fenómeno natural o actividad humana que puedan interrumpir abruptamente al sistema de transporte.

La revisión de la literatura confirma que no existe todavía una definición de resiliencia para el transporte que sea aceptada por unanimidad por los interesados en el tema. En la Tabla C.1 mostrada abajo se resumen las definiciones encontradas que más se acercan al interés por definir la resiliencia para sistemas de transporte.

La definición más breve y concisa encontrada es del Stockholm Resilience Centre de la Universidad de Estocolmo en Suecia. Le sigue en brevedad la que aporta J. P. Rodrigue, en su referencia a la eficiencia en redes de transporte.

En México, el Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred) ha propuesto su definición, con un enfoque más general que abarca sistemas estratégicos para la sociedad y las comunidades.

McAslan, al definir la resiliencia, hace notar la relevancia del concepto para los planificadores gubernamentales y las autoridades que gestionan los servicios de emergencia ante cualquier evento disruptivo que incluye tanto causas naturales como humanas.

Tabla C.1. Algunas definiciones de resiliencia relacionadas con sistemas de transporte

Fuente	Definición
Stockholm Resilience Centre, 2022.	<i>Resiliencia es la capacidad de poder enfrentar el cambio y continuar desarrollándose.</i>
Rodrigue, J.P., 2020.	<i>La eficiencia de una red de transporte también está relacionada a su resiliencia, que es su capacidad de soportar disrupciones mientras mantiene un nivel de servicio y su conectividad.</i>
Weilant, S., Strong, A. and Miller, B.M., 2019.	<i>Un sistema de transporte resiliente es aquel en el cual los activos críticos no están expuestos a riesgos extremos o, en caso que lo estén, existe suficiente capacidad para mitigar los impactos de un impacto extremo.</i>
Ley General de Protección Civil. Art. 2, fracc. XLVIII. Cenapred, 2018.	<i>Resiliencia: Es la capacidad de un sistema, comunidad o sociedad potencialmente expuesta a un peligro para resistir, asimilar, adaptarse y recuperarse de sus efectos en un corto plazo y de manera eficiente, a través de la preservación y restauración de sus estructuras básicas y funcionales, logrando una mejor protección futura y mejorando las medidas de reducción de riesgos.</i>
McAslan, A. 2010.	<i>El concepto de resiliencia es atractivo para los que hacen políticas, para los profesionales y para los académicos. Sugiere una habilidad de algo o de alguien para recuperarse y regresar a la normalidad luego de haber confrontado una amenaza anormal, alarmante y con frecuencia inesperada. El término se ha usado para cuestiones de seguridad a fin de comprender cómo los gobiernos, las autoridades locales y los servicios de emergencia pueden responder de la mejor manera a las amenazas del terrorismo, los desastres naturales, las pandemias y otros desafíos disruptivos.</i>
Ta et al, 2009.	<i>Resiliencia del sistema de transporte de carga. Es la aptitud del sistema de transporte de carga para absorber y reducir los impactos de las disrupciones. Esta aptitud tiene tres dimensiones relevantes: la infraestructura, las agencias de gestión y los usuarios del sistema.</i>

Fuente: Elaboración propia.

Con base en la revisión del tema de resiliencia y sus varias interpretaciones en otros campos, en este trabajo se adopta la siguiente definición.

Definición. *Resiliencia del sistema de transporte de carga es la capacidad conjunta de sus componentes: infraestructura, vehículos y organización, para resistir hasta cierto grado el impacto de cualquier disrupción súbita y desmesurada, adaptarse al cambio y recuperar la operación normal en un tiempo acorde a la magnitud del impacto. La resiliencia, al ser una capacidad, tiene como límite la destrucción del sistema por el impacto disruptivo.*

El desarrollo de metodologías para construir o reforzar la resiliencia de los sistemas de transporte, requiere identificar métricas para evaluar condiciones de funcionalidad y mejoras a los sistemas. Ahora bien, tener una métrica única para la resiliencia de un sistema de transporte no parece posible por varias razones:

- a) Los sistemas de transporte (carga y pasajeros) presentan gran variedad en el tipo de infraestructuras, escala de inversiones, vehículos, partes interesadas, organización y reglamentaciones aplicables.

- b) Los sistemas de transporte corren riesgo de interrupciones abruptas y desmedidas por: amenazas naturales (inundaciones, terremotos, incendios, etc.), actividad humana de orden político (sabotaje, terrorismo, huelgas, bloqueos, etc.), niveles de demanda alterados (por exceso o por defecto) o presiones económicas en el precio de combustibles, todas estas causas, que pueden estar presentes simultáneamente, determinan el nivel de resiliencia del sistema.

El índice de resiliencia basado en la pérdida de funcionalidad permite una cuantificación práctica de la resiliencia del sistema de transporte o de sus componentes cuando se puede observar la evolución de la recuperación de funcionalidad una vez que ha ocurrido un evento disruptivo. El índice de resiliencia permite comparar comportamientos de los elementos del sistema de transporte, de donde se puede detectar las necesidades de refuerzo más urgentes para la resiliencia.

En los procesos de toma de decisiones basados en análisis de resiliencia se requiere definir métricas y coleccionar los datos adecuados, a fin de hacer las evaluaciones necesarias. El uso de métricas apropiadas en un marco de toma de decisiones robusto puede ser un apoyo esencial para promover las inversiones necesarias que permitan crear o reforzar la resiliencia de los sistemas de transporte.

Los puntos clave que se recomiendan para lograr una buena apreciación de las necesidades de construcción o refuerzo de la resiliencia del sistema de transporte, así como de las inversiones que se necesitan son los siguientes (TRB, 2021):

- Utilizar un marco de análisis de la resiliencia donde se incluyan:
 - Inventarios detallados de los activos del sistema
 - Estimaciones de amenazas futuras potenciales (causas naturales y humanas)
 - Identificación de los activos críticos del sistema
 - Predicciones o pronósticos de la vulnerabilidad de los activos antes las diversas amenazas potenciales.
- Con la información completa disponible, aplicar el análisis costo-beneficio para evaluar las distintas opciones disponibles.

Para lograr construir o reforzar la resiliencia del sistema de transporte o de sus componentes, resulta de utilidad tener estrategias adecuadas. Una propuesta con ocho estrategias para este fin es la que propone la AASHTO norteamericana, mostrada en la tabla siguiente:

Tabla C.2. Estrategias AASHTO para construir o reforzar la resiliencia en sistemas de transporte.

Estrategia	Definición
Redundancia añadida	La redundancia añadida a un activo o componente del sistema de transporte permite el reenrutamiento de los flujos a través de uno o varios componentes o subsistemas que trabajan en paralelo.
Componentes de respaldo	La disposición de partes o componentes de respaldo aumentan la resiliencia del sistema, permitiendo hacer reemplazos ágiles de activos o componentes que han sido interrumpidos en su funcionalidad.
Sustitución	La sustitución significa permitir que un proceso cambie de admitir algún insumo o componente por otro disponible, con propiedades algo distintas, pero sin afectar mayormente la funcionalidad original.
Reducción de vulnerabilidades	Mediante el rediseño y la mejora de productos y procesos puede reducirse la vulnerabilidad de éstos ante amenazas específicas.
Enfoque de la improvisación	La resiliencia puede mejorar si se tiene la capacidad de improvisar en un evento disruptivo, usando tal vez procesos de reingeniería en tiempo real o empleando activos y materiales que estén disponibles.
Prioridades de acceso	La resiliencia de activos de infraestructura crítica puede mejorarse si se da a éstos prioridad para acceder a recursos críticos, de modo que la recuperación del servicio sea más rápida, apoyando así a otros componentes del sistema en su propia recuperación.
Modelado de interrupciones	La experiencia en el análisis de infraestructura crítica ha reconocido la relevancia del modelado de las operaciones del sistema de transporte, que permite estimar las interdependencias con otros sistemas, y el planteamiento de escenarios posibles para pronosticar las respuestas hacia la recuperación.
Logística de respaldo	La planeación y preparación para aplicar medidas son esenciales cuando se utilizan sistemas de respaldo o de sustitución para responder a los eventos disruptivos.

Fuente: UNDERSTANDING TRANSPORTATION RESILIENCE: A 2016–2018 ROADMAP (AASHTO, 2017).

Finalmente, cabe notar que en todas las revisiones de literatura que se hicieron en este trabajo, la resiliencia se considera como la capacidad de un sistema de recuperarse luego de un evento disruptivo inesperado y de magnitud inusual, lo que implícitamente significa que un sistema resiliente tarde o temprano se recuperará, aunque no logre regresar al estado original previo al evento, sino a un estado ligeramente reducido, pero que se considera aceptable.

En la realidad, sin embargo, la resiliencia siempre tiene un límite superior, más allá del cual se desvanece cuando el sistema en cuestión ya no se recupera, es decir cuando el impacto logra la extinción total del sistema y lo destruye de modo irreparable.

Muestra de esto han sido, por ejemplo: el accidente del Transbordador Espacial Challenger, en enero de 1986; el ataque a las Torres Gemelas en Nueva York de septiembre de 2011, o la erupción del volcán submarino en la Isla de Hunga Tonga en el Pacífico Sur en enero de 2022, que destruyó buena parte de esa isla.

Aún con esta observación sobre los límites físicos de los sistemas y el alcance del concepto de resiliencia, el estudio de ésta y las metodologías aplicables para mejorarla en los sistemas de transporte siguen siendo un tema de actualidad y gran interés, del cual aún queda bastante por discutir e investigar.

Bibliografía

American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO]. (2017). *UNDERSTANDING TRANSPORTATION RESILIENCE: A 2016–2018 ROADMAP*. Washington, D.C.

Academia Mexicana de la Lengua [AML]. (2021). *Resiliencia*. Disponible en: <https://www.academia.org.mx/academicos-2017/item/resiliencia>

ASME Innovative Technologies Institute, LLC. (2009). *RAMCAP Plus. ALL-HAZARDS RISK AND RESILIENCE. Prioritizing Critical Infrastructures Using the RAMCAP PlusSM Approach*. Washington, D.C.

Baldeh, M., Samba, C., Tuffour, K. and Boya A. (2016). Poisson Process and Its Application to the Storm Water Overflows. *Computational Water, Energy and Environmental Engineering*. 2016,5,47-53. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/301535078_Poisson_Process_and_Its_Application_to_the_Storm_Water_Overflows

BBC News. (2021). *Facebook, Whatsapp and Instagram back after outage*. Published 5 October. Disponible en: <https://www.bbc.com/news/technology-58793174>

Brashear, J.P. and Jones, J.W. (2010). *Risk Analysis and Management for Critical Asset Protection (RAMCAP Plus)*. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/230090388_Risk_Analysis_and_Management_for_Critical_Asset_Protection_RAMCAP_Plus

Bueno-Solano, A., Cedillo-Campos, M.G. (2014).). Dynamic impact on global supply chains performance of disruptions propagation produced by terrorist acts. *Transportation Research Part E* 61 (2014) 1–12.

Bustos, A., Balbuena, J.A., Zamora, A., Ascencio, A. y Pérez, J.A. (2017). *Consideraciones para un marco conceptual sobre resiliencia en la cadena de suministro*. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 496. México.

Centro Nacional de Prevención de Desastres [Cenapred]. (2018). *La Resiliencia en la Gestión Integral del Riesgo*. Coordinación Nacional de Protección Civil. Disponible en: https://www1.cenapred.unam.mx/DIR_SERVICIOS_TECNICOS/SANI/PAT/2018/1er%20trimestre%202018/2876%20DayGR/13181/Resiliencia%20y%20Gesti%C3%B3n%20de%20Riesgos_ENAPROC.pdf

Cimellaro, G.P., Reinhorn, A.M. and Bruneau, M. (2010). Framework for analytical quantification of disaster resilience. *Engineering Structures*. 32 (2010). 3639-3649. Elsevier, Ltd.

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [Conanp]. (2020). *Proyecto Resiliencia*. Disponible en: <https://www.gob.mx/conanp/documentos/proyecto-resiliencia?state=published>

Department for Transport. (2014). *Transport Resilience Review. A review of the resilience of the transport network to extreme weather events*. Williams Lea Group. London, UK. Disponible en: www.gov.uk/government/publications.

Falasca, M.; Zobel, C.W. and Cook, D. (2008). A Decision Support Framework to Assess Supply Chain Resilience. *Proceedings of the 5th International ISCRAM Conference – Washington, DC, USA, May 2008*. F. Fiedrich and B. Van de Walle, eds.

Federal Highway Administration [FHWA].(2014). *Assessing Criticality in Transportation Adaptation Planning* .Prepared by ICF International for USDOT Center for Climate Change and Environmental Forecasting and FHWA. Disponible en: <https://www.adaptationclearinghouse.org/resources/assessing-criticality-in-transportation-adaptation-planning.html>

Flintsch, G., Evans, C. and Rossigny, P. (2021). Resilience and Asset Management. *Routes/Roads*. No. 389 – 2nd quarter 2021. PIARC-World Road Association.

Garbolino, E., Lachtar, D., Sacile, R. And Bersani, C. (2013). Vulnerability and Resilience of the Territory Concerning Risk of Dangerous Goods Transportation (DGT): Proposal of a Spatial Model. *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS*. VOL. 32, 2013. Disponible en: <https://www.aidic.it/cet/13/32/016.pdf>

Gradilla, L. (2014). *Transporte federal de personas en México: transición hacia la sustentabilidad y la resiliencia*. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 401. México.

La Vanguardia. (2017). *La primera jornada de huelga de la estiba paraliza los puertos de toda España*. Sección Economía. 06/junio/2017. Disponible en: <https://www.lavanguardia.com/economia/20170605/423207093082/estiba-estibadores-huelga-paro.html>

Mattson, L.G and Jenelius, E. (2015). Vulnerability and resilience of transport systems –A discussion of recent research. *Transportation Research Part A Policy and Practice*. June 2015.

McAslan, A. (2010). *The Concept of Resilience. Understanding its Origins, Meaning and Utility*. . Torrens Resilience Institute, Adelaide, Australia. Disponible en: <https://www.flinders.edu.au/content/dam/documents/research/torrens-resilience-institute/resilience-origins-and-utility.pdf>

Moreno, E. (2006). *Análisis comparativo de la modelación del autotransporte:carga vs pasajeros*. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 300. México.

Moreno, E. y Gradilla, L. (2018). Desempeño de corredores de carga en NATSI 2018. Revisión de los conceptos de fluidez, resiliencia y vulnerabilidad. *NOTAS núm. 175*, nov-dic. 2018, artículo 2. Instituto Mexicano del Transporte. México. Disponible en: <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=475&IdBoletin=175>

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2021). *Investing in Transportation Resilience: A Framework for Informed Choices*. Washington, DC: The National Academies Press. Disponible en: <https://doi.org/10.17226/26292>.

National Research Council. (2012). *Disaster Resilience: A National Imperative*. Washington, DC: The National Academies Press. Disponible en: <https://doi.org/10.17226/13457>.

National Institute of Standards and Technology [NIST]. (2016). NIST Special Publication 1190. *Community Resilience Planning Guide for Buildings and Infrastructure Systems. Volume I*. Disponible en: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.1190v1.pdf>

Nkongho, A. A. and Ebobenow, J. (2016). Generalized Extreme Value Distribution Models for the Assessment of Seasonal Wind Energy Potential of Debuncha, Cameroon. *Journal of Renewable Energy*, vol. 2016, Article ID 9357812, 9 pages, 2016. Disponible en: <https://doi.org/10.1155/2016/9357812>

Oxford English Dictionary [OED]. (2021). *Phoenix,n.1*. Disponible en: <https://www.oed.com/view/Entry/142601?rskey=Blj1L3&result=1&isAdvanced=false>

Önoz, B. and Bayazit, M. (1995). Best.fit distribution of largest available flood samples. *Journal of Hydrology*. 167 (1-4): 195-208. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/222213660_Best-fit_distribution_of_largest_available_flood_samples

Organización de las Naciones Unidas [ONU]. (2020). Asamblea General. Resolución aprobada por la Asamblea General el 31 de agosto de 2020. 74/299. *Mejoramiento de la seguridad vial en el mundo*. Disponible en: <https://undocs.org/es/A/RES/74/299>.

Pérez, N., y Garnica, P. (2015). La resiliencia en el diseño de pavimentos. *NOTAS núm. 154, MAYO-JUNIO 2015*, artículo 2. Instituto Mexicano del Transporte. México.

Pimentel Álvarez, J. (2017). *Diccionario Latín-Español Español-Latín*. Décimosegunda edición. Editorial Porrúa. México.

Real Academia Española [RAE]. (2021). *Diccionario de la lengua española*. Disponible en: <https://dle.rae.es/resiliencia%20?m=form>

Rehman, K; Burton, P.W. and Weatherill, G.A. (2018). Application of Gumbel I and Monte Carlo methods to assess seismic hazard in and around Pakistan. *Journal of Seismology* .Volume 22, Issue 3, pp 575-588. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10950-017-9723-8>

Rizwan, S.A., Khan, A. and Debaj, S. A. (2000). Application of Probability Theory in the Earthquake Risk Assessment and Its Consequent Possible Reduction. *12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/274079305_Application_of_Probability_Theory_in_the_Earthquake_Risk_Assessment_and_Its_Consequent_Possible_Reduction.

Rodrigue, J.P. (2020). *The Geography of Transport Systems. Fifth edition. Sec.2.1 The Geography of Transportation Networks*. Disponible en: <https://transportgeography.org/contents/chapter2/geography-of-transportation-networks/>.

Rus, G., Campos, J. y Nombela, G. (2003). *Economía del transporte*. Antonio Bosch, editor. Barcelona.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT]. (2020). *Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes 2020-2024*. México. Disponible en: <https://www.gob.mx/sct/documentos/programa-sectorial-de-comunicaciones-y-transportes-2020-2024>.

Sheffi, Y. and Rice Jr., J.B. (2005). A Supply Chain View of the Resilient Enterprise. *MIT Sloan Management Review* . September 2005. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/255599289_A_Supply_Chain_View_of_the_Resilient_Enterprise.

Shukla, R., Trivedi, M. and Kumar, M. (2010). On the proficient use of GEV distribution: A case study of subtropical monsoon region in India. *Annals. Computer Science Series*. 8. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/44288322_On_the_proficient_use_of_GEV_distribution_A_case_study_of_subtropical_monsoon_region_in_India/citation/download

Stockholm Resilience Centre. (2022). *Resilience dictionary*. Disponible en: <https://www.stockholmresilience.org/research/resilience-dictionary.html>.

Ta, C.; Goodchild, A.V. and Pitera, K. (2009). Structuring a Definition of Resilience for the Freight Transportation System. *Transportation Research Record. No. 2097*, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2009, pp. 19–25.

T21. (2021). *El origen de la escasez de contenedores y su impacto en el comercio internacional*. Logística. Redacción T21. Disponible en: <http://t21.com.mx/logistica/2021/02/02/origen-escasez-contenedores-su-impacto-comercio-internacional>

Tamvakis, P. and Xenidis, Y. (2012). Resilience in transportation systems. *Social and Behavioral Sciences* 48 (2012) 3441 – 3450.Elsevier.

Tierney, K. and Bruneau, M. (2007). Conceptualizing and Measuring Resilience A Key to Disaster Loss Reduction. *TR News* 250. May-June 2007. Disponible en: https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/trnews/trnews250_p14-17.pdf

Transportation Research Board [TRB]. (2017). *Transportation Systems Resilience. Preparation, Recovery, and Adaptation*. Circular Number E-C226. Transportation Research Board. Washington, D.C.

Transportation Research Board [TRB]. (2021). *Transportation Resilience Metrics*. @NASEMTRB#TRBWebinar. Disponible en: <https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/webinars/211019.pdf>

US Department of Agriculture [USDA]. (2007). Natural Resources Conservation Service. *Chapter 5. Stream Hydrology*. Part 654 Stream Restoration Design. Disponible en: <https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=17781.wb>
[a](#)

Weilant, S., Strong, A. and Miller, B.M. (2019). *Incorporating Resilience into Transportation Planning and Assessment*. RAND SOCIAL AND ECONOMIC WELL-BEING. Rand Corporation. Santa Monica, Calif. USA.

Wikipedia. (2021). Wikipedia, the free encyclopedia. *Resilience*. Disponible en: <https://en.wikipedia.org/wiki/Resilience>.

Wikipedia. (2021b). Wikipedia, the free encyclopedia. *Pearson distribution*. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Pearson_distribution#The_Pearson_type_III_distribution.

Wikipedia. (2022). Wikipedia, the free encyclopedia. *List of busiest ports by cargo tonnage*. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_busiest_ports_by_cargo_tonnage



COMUNICACIONES
SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Km 12+000 Carretera Estatal 431 “El Colorado Galindo”
Parque Tecnológico San Fandila, Mpio. Pedro Escobedo,
Querétaro, México. C.P. 76703
Tel: +52 (442) 216 97 77 ext. 2610
Fax: +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

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