Evaluación de Resiliencia en la Red Vial Primaria en Honduras ante Eventos Hidrometeorológicos: Enfoque Gestión de Riesgos y Conectividad Logística.

Autora: Angie Vanessa López Milla.

Afiliación Institucional:
Universidad José Cecilio del Valle.

Vicerrectoría Académica. Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño.

Tegucigalpa M.D.C. Honduras, C.A.

Recibido:
26-04-2026

Aceptado:
01-07-2026

Sobre la autora:
López Milla, Angie Vanessa

Universidad José Cecilio del Valle.

Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño.

Tegucigalpa, Honduras, C.A.

ORCID:
0009-0007-7010-0532

Correo:
avlopez@ujcv.edu.hn

Contacto:
+(504) 3353-8355

Resumen:
La red vial primaria de Honduras, representada por los ejes carreteros CA-5 y CA-13, forma la infraestructura vial de conexión nacional en las áreas del litoral atlántico y zona central, su topología predominantemente lineal presenta una vulnerabilidad muy alta ante eventos hidrometeorológicos acrecentados por el cambio climático.
Este artículo valora la resiliencia de dichos tramos analizados bajo la Teoría de Grafos y las dimensiones de Bruneau (Robustez, Redundancia, Rapidez y Recursos), considerando el análisis de puntos críticos, índice de pérdida de conectividad y el índice de resiliencia (Taulabé - Comayagua, Puente sobre el Río León – Atlántida) ubicados respectivamente en las vías en análisis, demostrando que la pérdida de funcionalidad en nodos y aristas, así como la ruptura de arcos, compromete la serviciabilidad de la red vial y su conectividad logística. Los resultados resaltan la necesidad de fortalecer la capacidad de poder desviar el tránsito vial durante la crisis provocada por algún incidente hidrometeorológico, mediante rutas de alivio para mitigar impactos socioeconómicos ante desastres.

Palabras clave:
Incidente / evento hidrometeorológico, Resiliencia Vial, Serviciabilidad, Vulnerabilidad.

Resilience Assessment of the Primary Road Network in Honduras in the Face of Hydrometeorological Events: A Focus on Risk Management and Logistical Connectivity.

Author: Angie Vanessa López Milla.

Abstract:
Honduras' primary road network, represented by the CA-5 and CA-13 highways, form the national road infrastructure connecting the Atlantic coast and central region. Its linear and radial topology presents a very high vulnerability to hydrometeorological events exacerbated by climate change. This article assesses the resilience of these road segments using Graph Theory and Bruneau's dimensions (Robustness, Redundancy, Speed, and Resources). The analysis considers critical points, the connectivity loss index, and the resilience index (Taulabé - Comayagua, Bridge over the León River – Atlántida), located on the analyzed roads. The results demonstrate that the loss of functionality at nodes and edges, as well as the failure of arcs, compromises the serviceability of the road network and its logistical connectivity. The results highlight the need to strengthen the capacity to divert road traffic during a crisis caused by a hydrometeorological incident, through relief routes to mitigate socioeconomic impacts in the face of disasters.

Keywords:
Hydrometeorological incident/event, Road Resilience, Serviceability, Vulnerability.

Introducción

La red vial primaria en Honduras es comprendida como un segmento importante de interconexión territorial y de la red vial de Centroamérica, el objetivo de esta investigación fue evaluar el índice de resiliencia de los ejes carreteros CA-5 y CA-13 ante amenazas hidrometeorológicas, con la finalidad de mantener la conectividad operativa de los corredores viales, mediante la aplicación de la Teoría de Grafos y las dimensiones de Bruneau, en nuestro caso en particular se tomará de estudio la CA-5 (Taulabé – Comayagua) y CA-13 (Puente sobre el Río León – Atlántida), éstas no solo representan una red subyacente crítica que sustenta el funcionamiento de las ciudades importantes en el territorio nacional, sino que coadyuvan al sostenimiento de la infraestructura económica y poseen los elementos de evaluación más esenciales para la gestión del riesgo de desastres, afectando directamente la conectividad, asimismo, son más vulnerables a ser afectadas por eventos hidrometeorológicos, al presentarse lluvias intensas, estas provocan inundaciones, saturación de suelos, deslizamientos de tierra y el deterioro acelerado de la estructura de pavimento. Se debe señalar que, estos daños se ven intensificados por el cambio climático, que incluyen fenómenos como huracanes y tormentas tropicales que dañan la infraestructura vial e interrumpen el tránsito (este último es el enfoque central de la presente investigación).

Honduras cuenta con diferentes programas y proyectos con enfoque en resiliencia vial, entre los que se encuentran el Programa de Carreteras Resilientes (PCR), financiado por el Banco Centroamericano de Integración Económica (BCIE, 2024), orientado en la intervención de aproximadamente 351 kilómetros de la red vial en diferentes partes del país y el Proyecto de Gestión Resiliente del Corredor Vial del Norte (CA-13), financiada por Fondo para la Promoción del Desarrollo (FONPRODE) y el Banco Mundial (BM), con enfoque en la rehabilitación de aproximadamente 174 km de carreteras comprendidos entre La Ceiba en el departamento de Atlántida y Puerto Castilla en el departamento de Colón (SEFIN, 2025), tras los daños sufridos por el paso de la tormenta tropical Sara en noviembre de 2024.

Es de señalar que aún con la presencia de programas y proyectos tan importantes para el país como los anteriormente señalados, estos son el resultado de evaluaciones realizadas tras el paso de eventos hidrometeorológicos de gran relevancia en el territorio, dejando un vacío de estudios de vulnerabilidad vial y sus efectos a largo plazo.

Las redes de carreteras son cruciales para el funcionamiento eficaz de la sociedad. El suministro de recursos y servicios como la distribución de alimentos, el suministro de energía y los servicios médicos dependen de estas redes. Por lo tanto, garantizar la resiliencia del tráfico rodado es vital para mantener el funcionamiento general de la sociedad. (Nogal, 2018)

Sin embargo, las redes de carreteras están expuestas a cierres o limitaciones de tráfico debido a múltiples peligros (Miano, 2024). Entre estos peligros, los deslizamientos de tierra representan una amenaza significativa para la infraestructura vial, con impactos que generalmente se clasifican en dos tipos principales: uno implica el deslizamiento de suelo desde regiones montañosas, mientras que el otro se refiere al deslizamiento de terraplenes de carreteras (Wood, 2025; Liu, 2024), como resultado, estos deslizamientos pueden causar daños parciales o totales a las carreteras, lo que lleva a interrupciones o cierres totales de los servicios viales (Liu, 2023)

Las inundaciones son uno de los tipos de desastre más devastadores en las redes viales. Cuando ocurren, a menudo provocan el cierre de carreteras o la reducción de su capacidad debido al depósito de

escombros como lodo, rocas y vegetación en la calzada, lo que obstruye el flujo vehicular. Adicionalmente, la fuerza de las aguas de la inundación puede erosionar los estribos de los puentes, debilitando su integridad estructural y comprometiendo la seguridad. Las capas de pavimento sin ligante también son vulnerables, ya que la erosión hídrica puede arrastrar los materiales de la base, lo que provoca la deformación y el fallo del pavimento. Evaluar la resiliencia de las redes viales ante las inundaciones es esencial para garantizar un sistema de transporte robusto y confiable. Un sistema de transporte resiliente no solo mejora la seguridad y reduce las interrupciones, sino que también apoya la estabilidad económica y la recuperación de la comunidad frente a los peligros (IPCC, 2023)

Si desarrollamos el punto de las intersecciones de carreteras que son los componentes fundamentales de una red vial, y, tomando como pilar comparativo la Teoría de Grafos (aristas y nodos), en nuestra logística de transporte y conectividad, si un puente falla (arco) la teoría nos colabora en buscar rutas alternas (aristas) y esto nos asiste a la resiliencia en la red vial del país, caso contrario, si señalamos la estructura topológica de la red vial en Honduras, donde la estructura y diseño de la geometría es principalmente lineal o radial, lo que representa que pocos ejes principales soportan toda la carga vial, haciendo de la topología una vulnerabilidad, ejemplo: La carretera CA-5 con aproximadamente 250 km de longitud (Tegucigalpa, Francisco Morazán – San Pedro Sula, Cortés) es la única vía con el diseño y la capacidad de absorber el tráfico vial pesado que conecta el nodo industrial de la costa norte con el nodo administrativo central, si la geometría enfrenta un pequeño cambio (erosión del talud inferior), la carretera sigue ahí, sin embargo, si la topología cambia (se cae un puente / se provoca un deslizamiento en el talud y cae sobre la vía abarcando ambos carriles), la red deja de funcionar como sistema, provocando la ruptura del arco logístico o grafo vial.

De igual trato la carretera CA-13, cuya importancia radica en el movimiento de banano, palma africana, combustible y otros (contenedores entre los puertos), posee una longitud aproximada de 400 km (Puerto Cortés, Cortés - Trujillo, Colón), aplicando la misma teoría de grafos, se puede determinar que ésta funciona como un eje lineal crítico que conecta los puertos de exportación marítima con los principales centros de producción agrícola y turística del litoral atlántico (todos considerados nodos), si en la ruta debido a las altas intensidades de lluvia se presentase un cambio en la geometría, por ejemplo: formación de baches profundos, reduciendo el ancho útil de un carril, la carretera sigue ahí, el sistema vial continúa funcionando, aunque con menor velocidad de operación/recorrido, aumentado el riesgo de accidentes, no obstante, si cambia su topología, el Puente sobre el río Lean colapsa o deja de ser viable por una crecida que impide su visibilidad, la red deja de funcionar como sistema, al ser una ruta de alta vulnerabilidad por falta de vías de alivio, el nodo principal de destino Puerto Cortés, Cortés quedaría desconectado del nodo de Trujillo, Colón, rompiendo el esqueleto vial primario y paralizando el tránsito vial.

Dos enfoques principales empleados para analizar la vulnerabilidad de las redes incluyen el enfoque topológico y el enfoque basado en sistemas. El primer enfoque se centra en la estructura y configuración de una red, por lo que la teoría de grafos y los conceptos de redes complejas desempeñan un papel vital. Las interrupciones de la red se modelan modificando los enlaces y nodos del grafo (eliminación/adición de enlaces y nodos) y las métricas de la red. (Akbarzadeh, 2019)

Cada una de las vías en análisis (CA-5 y CA-13) presentan vulnerabilidades con características y comportamientos diferentes ante eventos hidrometeorológicos, la CA-5 se ve afectada principalmente por movimientos de ladera en puntos críticos como Taulabé y Siguatepeque debido a la saturación de suelos y la CA-13 muestra una degradación acelerada del pavimento e inundaciones fluviales recurrentes (Prensa,

2025) (Tiempo, 2026)

Honduras enfrenta desafíos significativos por fenómenos climáticos extremos, por lo que es crucial contar con una red vial resiliente que fortalezca la conectividad y potencie el comercio. (Scott, 2024)

La crecida de caudales críticos compromete la integridad de las vías, provocando una pérdida de serviciabilidad en la topología de la red vial, por lo que podríamos afirmar, que una red vial resiliente puede restaurar la conectividad a través de sus segmentos restantes, mitigando las consecuencias socioeconómicas. En infraestructura vial, la resiliencia suele definirse mediante las 4 R de Bruneau (Bruneau et al., 2003), quienes establecieron las bases conceptuales para medir la resiliencia sísmica, adaptado posteriormente a todo tipo de infraestructura, incluyendo la vial , mismas que se utilizarán para poder medir la capacidad de la carretera o puentes para resistir el impacto de la lluvia o deslizamientos sin sufrir daños críticos (robustez), existencia de rutas alternas (redundancia), capacidad de respuesta con eficacia, optimizando recursos económicos (rapidez) y capacidad de movilidad, diagnóstico, atención de daños y recuperación (recursos).

Metodología

El presente artículo se realizó utilizando un enfoque cuantitativo, basado en elementos de carácter descriptivo al presentar datos del estado físico y actual de la infraestructura vial existente (CA-5 y CA-13); correlacional, ya que se busca relacionar una amenaza (ocurrencia de eventos hidrometeorológicos) y el deterioro de la conectividad (IPC); y, diseño no experimental, transversal, descriptivo-correlacional, debido a que se basa en la observación y análisis de datos históricos, así como, en la simulación de escenarios de falla mediante el modelo matemático de grafos. Lo que permite evaluar la resiliencia en puntos definidos de la red vial primaria del país, sin alterar las condiciones reales del tráfico, ni la integridad física de la infraestructura durante el proceso de recolección de datos.

Población y muestra:

De acuerdo a la Secretaría de Planificación Estratégica de Honduras, Dirección de Ordenamiento Territorial y el Sistema Nacional de Información Territorial, Honduras cuenta con una red vial estratégica que conecta diversas regiones del país, facilitando tanto el transporte de personas como el de mercancías. Estos corredores no solo son esenciales para la integración comercial y logística a nivel nacional e internacional, sino que también potencian el turismo, la agricultura y el desarrollo económico en las diferentes zonas del país. Estos corredores son integrados por: (Armijo, 2024)

1. El Corredor del Pacífico se extiende a lo largo de la carretera CA-1, que conecta la frontera con El Salvador en El Amatillo, pasando por Jícaro Galán y Choluteca, e incluye su libramiento. Además, este corredor incluye la carretera CA-3, que une Choluteca con Guasaule, en la frontera con Nicaragua. Esta vía es vital para el comercio y la conectividad entre Honduras y los países vecinos del sur, facilitando el intercambio de bienes y servicios en la región.

2. El Corredor Logístico, incluye tramos de la carretera CA-5 Norte, conectando importantes ciudades como Tegucigalpa, Comayagua, Siguatepeque, San Pedro Sula y Puerto Cortés, principal puerto del país. El Corredor Logístico es clave para la movilidad de mercancías, sirviendo como la columna vertebral de la actividad comercial de Honduras, al enlazar los centros productivos con los puntos de exportación.

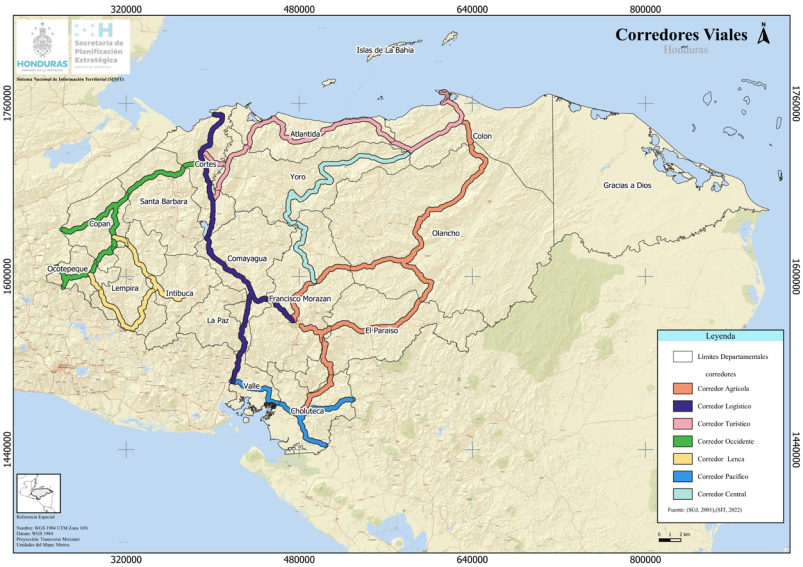
3. El Corredor Turístico se desarrolla principalmente a lo largo de la carretera CA-13, comenzando en San Pedro Sula y pasando por ciudades como El Progreso, Tela, La Ceiba, Trujillo y Puerto Castilla. Este corredor es vital para el turismo en la costa atlántica de Honduras, conectando algunos de los destinos más importantes del país.

4. El Corredor Agrícola abarca diversas rutas que facilitan la movilización de productos agrícolas desde el sur y oriente de Honduras hacia los mercados nacionales e internacionales. Se extiende desde Choluteca, pasando por Orocuina, Morolica, El Zamorano y conectándose con la carretera CA-6 hacia Danlí. También incluye la Ruta 15 hacia Olancho, pasando por Juticalpa, Telica, Gualaco y otros puntos importantes.

5. El Corredor de Occidente y Corredor Lenca abarca la región occidental de Honduras, al margen izquierdo de la carretera CA-5 Norte. Incluye rutas centroamericanas importantes como la CA-4, que conecta con La Entrada, así como la CA-7, CA-10, CA-11 y CA-11-A. Este corredor es esencial para el transporte en el occidente del país, conectando con diversas rutas pavimentadas de interés nacional, excluyendo el tramo de la CA-4 entre Chamelecón y La Entrada. Además, promueve el turismo cultural y el comercio en la región Lenca.

6. El Corredor Central cubre la parte centro-norte y oriental del país, al margen derecho de la carretera CA-5 Norte y la parte norte de la Ruta 15. Conecta los departamentos de Francisco Morazán, Yoro, Atlántida, Olancho y Colón. Sus caminos principales, la Ruta 43, Ruta 23 y Ruta 41, unen el Corredor Agrícola con el Corredor Turístico y el Corredor Logístico. Esta conexión estratégica permite una mejor integración y facilita el transporte de productos agrícolas y turísticos, promoviendo el desarrollo en la zona centro-norte del país.

Figura 1.
*Mapa de los corredores viales impor*tantes en Honduras.



Fuente: *SINIT, 2024*

Considerando los corredores viales de Honduras se determinó trabajar con dos corredores representativos.

Población: La Red Vial Primaria de Honduras, compuesta por dos de los principales corredores logísticos del país que forman parte de la red vial Centroamericana.

De los principales puntos de deslizamiento registrados en la carretera CA-5 se encuentra la ubicada en el kilómetro 111 en Siguatepeque, Comayagua y la del kilómetro 132 en la comunidad de El Carrizal en el municipio de Taulabé, en Siguatepeque, Comayagua, zona central de Honduras. (Digital, 2020)

Las lluvias persistentes que afectan la zona norte de Honduras, provocan derrumbes, inundaciones y el riesgo de interrupción total en varias carreteras, dejando comunidades incomunicadas y limitando el tránsito vehicular. (Prensa, Activan respuesta de emergencia en la red vial por derrumbes y lluvias, 2026). Los departamentos de Atlántida y Colón, en la región Caribe, figuran entre los más vulnerables, debido a que sus suelos permanecen saturados por las precipitaciones, entre los puntos más críticos se encuentran:

Tabla 1: *Puntos Criticos Carretera CA - 13*

Departamento		Daño Reportado
Atlántida	Río Lean	Municipio de Arizona, inunda varios sectores del valle de Lean
		Representa una amenaza para varias comunidades dejándolas incomunicadas
Colón	Río Aguán	Incomunica el municipio de Santa Rosa de Aguán.

Fuente: *Elaboración propia (Prensa, Lluvias intensas golpean el litoral Atlántico y obligan a evacuaciones, 2026)*

Por la importancia en la conectividad vial y considerando que son puntos vulnerables ante eventos hidrometeorológicos, se determinó trabajar con la siguiente muestra:

Muestra: Considerando los elementos técnicos y el proceso de evaluación del riesgo, se ha elegido una muestra no probabilística:

1. **CA-5 (*Taulabé - Siguatepeque*):** El tramo elegido es representativo de riesgos por inestabilidad de laderas y taludes en la carretera.
2. **CA-13 (*Puente sobre el Río León*):** Este punto es de vital importancia, ya que los fallos de conectividad por vulnerabilidad a las altas intensidades de lluvia que registra la zona, traen serias consecuencias económicas al país.

Criterios de Inclusión y Exclusión

- **Inclusión:** Tramo y punto de la red primaria del país que conectan centros de producción y empaque con puertos y ciudades importantes en desarrollo (cadena de suministro), con amplios registros históricos de interrupciones por lluvias.

- **Exclusión:** Carreteras secundarias o terciarias que no impactan directamente en la movilidad vial o tramos con datos de aforo vehicular bajo o inexistentes.

Procedimientos

El proceso se divide en tres fases:

- Identificación de los tramos (Teoría de Grafos)
- Cálculo del Índice de Resiliencia (IR)
- Cálculo y cuantificación del Índice de Pérdida de Conectividad (IPC).

Instrumentos

- Bases de Datos: Inventario vial de la Secretaría de Infraestructura y Transporte (SIT) y registros de daños ante eventos meteorológicos de COPECO.

- Evaluación de Resiliencia, con base en las dimensiones de Bruneau (robustez, redundancia, rapidez y recursos), mediante la elaboración de una Matriz de Comparación Pareada, utilizando la Escala de Comparación Pareada de Saaty, evaluada por siete (7) especialistas consultados, con experiencia en el ámbito de auditoría a posteriori y concurrente de la red vial pavimentada y no pavimentada en Honduras.

- Evaluación de Índice de Pérdida de Conectividad, mediante una matriz de criticidad de tiempo de demora.

Consideraciones Éticas

Uso de datos reales y existentes de fuentes públicas y oficiales utilizadas en el país; se consideró el impacto social con enfoque en el bienestar público y su afectación a la economía nacional, del mismo modo, se trabajó un análisis técnico objetivo sin sesgos políticos.

Análisis Estadístico (Detallado y Replicable)

Con la finalidad de asegurar que pueda ser reproducido de manera posterior, se lleva una consistencia metodológica, considerando las siguientes variables:

- *Variable Independiente:* Evento hidrometeorológico.
- *Variables Dependientes:* Índice de Resiliencia (IR) / Índice de Pérdida de Conectividad (IPC).

Otro concepto relacionado con la resiliencia, y ampliamente utilizado en la literatura sobre transporte para estudiar el desempeño de las redes, es la criticidad. Se aplica para describir la contribución de cada componente de la infraestructura al desempeño del sistema. (Jafina Bramka, 2020)

El análisis de criticidad de la red de transporte ordena o clasifica los componentes de la red según su relevancia en el sistema, y se ha reportado como un marco útil para que los planificadores prioricen las intervenciones. (Ortega, 2020)

La eliminación o el bloqueo de uno o más enlaces de la red, especialmente aquellos con mucho tráfico o que incluyen puentes, podría tener consecuencias económicas directas y graves en términos de aumento del tiempo total de viaje del sistema, así como en lo que respecta a la logística de carga y la gestión de la cadena de suministro (Bell, 2006; Chen, 2002).

Dependiendo de la configuración espacial de la red (es decir, la topología de la red) y de los orígenes y destinos específicos, los diferentes tipos de tráfico podrían tener grandes dificultades para desviarse en caso de una falla en un enlace. (Bell, 2006).

Se analizará por qué el Puente sobre el río León y el tramo Taulabé- Siguatepeque, son arcos críticos en el grafo nacional, técnicamente, un evento hidrometeorológico se considera un experimento natural, lo anterior debido a que la naturaleza se encarga del escenario (Criticidad) para posteriormente analizar los resultados del mismo (IR / IPC).

Resultados:

Determinación del Índice de Resiliencia Estructural y Topológica

La resiliencia en carreteras permite estudiar todos aquellos eventos que pueden perturbar el funcionamiento de las vías. Además, permite establecer los planes para su restauración.

- Los eventos relacionados con lluvias intensas suelen provocar una insuficiente capacidad de los sistemas de drenaje y también, pueden generar:

- Problemas de desprendimiento de tierra y rocas.
- Erosión de taludes,
- Fallas en los terraplenes,
- Baches y daños en los pavimentos,
- Descalcificación de los cimientos,
- Daños en los pilares,
- Socavación de pilares y obras de contención. (Construcción, 2022)

El análisis de la red vial primaria del país CA-5 y CA-13 (Taulabé – Siguatepeque, Puente sobre el Río León, respectivamente) bajo la Teoría de Grafos, consiste en identificar que la distribución actual presenta una topología predominantemente lineal, lo que condiciona directamente mediante la Teoría de Bruneau (Bruneau, M. et al, 2003), el Índice de Resiliencia (IR).

El Índice de Resiliencia lo calcularemos haciendo uso de la siguiente fórmula:

IR = w1 (Robustez) + w2 (Redundancia) + w3 (Logística) + w4 (Rapidez)

Donde wi son pesos asignados mediante el método de expertos (AHP - Analytic Hierarchy Process) y calculados cada uno paso a paso.

Definición de los parámetros utilizados:

Otro concepto clave es la robustez, que se define como "el grado en que, bajo circunstancias pre especificadas, (*un sistema de transporte*) es capaz de mantener la función para la que fue diseñado originalmente" (Snelder, 2012). El término análisis de robustez también se ha utilizado en comparaciones de diferentes redes de transporte. (Sullivan, 2010)

C1: Robustez Estructural (Estado de los carriles, estado del puente en análisis, habilitación del paso).

C2: Redundancia (Rutas alternas).

C3: Importancia Logística (Flujo de carga entre nodos importantes del país).

C4: Rapidez de Respuesta (Tiempo de rehabilitación/ habilitación).

Creación de la Matriz de Comparación Pareada

Tabla 2: *Cálculo de los "C", atributos de robustez y redundancia como ejes centrales del análisis.*

Variable	Nombre	¿Cómo se mide en campo? (Escala 0 a 1)
C1	**Robustez**	**Estado de la infraestructura.** 1.0 = Excelente (Puentes en buen estado/vías despejadas/con mantenimiento). 0.5 = Regular (Baches, drenajes obstruidos). 0.0 = Crítico (Fallas geológicas activas, puentes inundados sin visibilidad/ colapsados).
C2	**Redundancia**	**Existencia de rutas alternas.** 1.0 = Existen 2 o más rutas alternas pavimentadas. 0.5 = Existe 1 ruta alterna (*pero es de tierra/ muy larga/ no apto para movilidad de equipo de transporte de carga*). 0.0 = No hay ruta alterna (si se corta ese punto, queda incomunicado).
C3	**Importancia Logística**	**Importancia del flujo.** 1.0 = TPDA (Tráfico Promedio Diario Anual) alto de carga pesada. 0.5 = Tráfico mixto moderado. 0.1 = Tráfico local bajo.
C4	**Rapidez**	**Capacidad de respuesta.** 1.0 = Hay plantel de mantenimiento cerca (< 50 km). 0.5 = Plantel a distancia media. 0.0 = Zona aislada sin equipo pesado de construcción disponible.

Fuente: *Elaboración propia bajo los Criterios de la Teoría de Bruneau, basado en diversas fuentes de información de evaluación de daños tras un evento hidrometeorológico intenso*

Tabla 3: *Evaluación de la muestra mediante Teoría de Bruneau.*

	CA-5 (Taulabé - Siguatepeque)		**CA-13 (Puente sobre el río León)**	
C1 (Robustez)	La vía se encuentra afectada en sus dos carriles, por deslizamiento	0.5	El puente está dañado tras el paso de un evento hidrometeorológico	0.2
C2 (Redundancia)	Existen rutas alternas no viables para el tránsito pesado.	0.5	No hay rutas alternas cerca	00
C3 (Logística)	Por deslizamiento hay ruptura de arco, nodo administrativo y empresarial incomunicados, tráfico altísimo hacia San Pedro Sula	1	Es paso obligado para la conectividad entre nodos, tráfico alto (Puerto Cortés - Puerto Castilla)	0.7
C4 (Rapidez)	Hay cuadrillas trabajando, de Instituciones de prevención	0.8	Hay cuadrillas trabajando, de Instituciones de prevención	0.6

Fuente: *Elaboración propia, basado en criterios expuestos en diversas fuentes de información de evaluación de daños tras un evento hidrometereológico intenso.*

La modelación multicriterio es una técnica que permite desentrañar el proceso de razonamiento que se sigue para tomar una decisión. El procedimiento consiste en seleccionar y clasificar los elementos que integran un problema de decisión. La finalidad de su aplicación es lograr priorizar un conjunto finito de alternativas de decisión para encontrar aquella que resulta en "la mejor alternativa" o "el mejor curso de acción". (Merino-Benítez, 2021)

La matriz se basa en la recolección de datos y valoración de profesionales del área con experiencia en auditoría del sector vial, cuya evaluación se realizó haciendo uso de la Escala de Saaty (1 al 9) (Saaty, 1980), misma que utiliza una estructura de espejo (*en ambas direcciones*) fundamental para la validez de la resiliencia que se busca, se consideró las siguientes valoraciones:

1: Igual importancia.

3: Moderadamente más importante.

5: Mucho más importante.

7: Fuertemente más importante.

9: Extremadamente más importante.

Para esta evaluación y llenado de la matriz, se utilizó la valoración definida de los parámetros: C1: Robustez Estructural, C2: Redundancia, C3: Importancia Logística, C4: Rapidez de Respuesta.

Tabla 4: *Escala Utilizada en la Evaluación de la Comparación Pareada de Saaty.*

Criterio A	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Criterio B
Robustez								x		Redundancia
Robustez			x							Importancia Logística
Importancia Logística						x				Rapidez

Fuente: *Elaboración propia.*

Si la Redundancia (Rutas alternas) es fuertemente más importante que la Robustez (Estado de la vía o infraestructura vial), la marca se acerca a la derecha tomando como indicador el número 7 definido en las valoraciones.

Si la robustez (Estado de la vía o infraestructura vial) es mucho más importante que la Logística (Flujo de carga entre nodos importantes del país), su marcador estaría a la izquierda del 1 y sería igual a 5.

De igual manera si la Rapidez (Tiempo de rehabilitación/ habilitación) es moderadamente más

importante que Flujo de carga entre nodos importantes del país, su marcador estaría a la derecha del número 1 y sería igual a 3.

Definidos los criterios de relevancia, se procedió a compilar y ponderar los valores obtenidos mediante la escala de Saaty y elaborar las matrices de comparación, se debe señalar que la matriz por sí sola compara el criterio de la fila frente al de la columna, si el criterio de la fila es más importante, se utilizan números enteros (3, 5, 7, 9), caso contrario, si la columna tiene mayor relevancia frente a la fila, se utiliza fracciones (1/3, 1/5, 1/7, 1/9).

Para el mismo ejemplo que se desarrolló en la Tabla 4 y tomando en consideración la importancia de criterios se realizará la valoración de pareo, quedando de la siguiente manera:

Tabla 5: *Ejemplo de Llenado de Matriz de Comparación Pareada.*

Criterio	C1: Robustez	C2: Redundancia	C3: Importancia Logística	C4: Rapidez
C1: Robustez			5	
C2: Redundancia	7			
C3: Importancia Logística				1/3

Fuente: *Elaboración propia.*

quedando como resultado las siguientes matrices, de ambos puntos pertenecientes a la muestra seleccionada:

Tabla 6: *Matriz de Comparación Pareada, CA-5 (Taulabé - Siguatepeque).*

Criterio	C1: Robustez	C2: Redundancia	C3: Importancia Logística	C4: Rapidez
C1: Robustez	1	5	5	5
C2: Redundancia	1/5	1	1/5	3
C3: Importancia Logística	1/5	3	1	5
C4: Rapidez	1/7	5	1/5	1
∑	$1\,^{19}/_{35}$	14	$6\,^{2}/_{5}$	14

Fuente: *Elaboración propia.*

Tabla 7: *Matriz de Comparación Pareada, CA-13 (Puente sobre el río León)*

Criterio	C1: Robustez	C2: Redundancia	C3: Importancia Logística	C4: Rapidez
C1: Robustez	1	5	3	3
C2: Redundancia	1/5	1	1/3	1/3
C3: Importancia Logística	1/3	3	1	2
C4: Rapidez	1/3	3	1/3	1
∑	$1\ ^{13}/_{15}$	12	$4\ ^{2}/_{3}$	$6\ ^{1}/_{3}$

Fuente: *Elaboración propia.*

Cálculo de los Pesos (w_i)

Para obtener los pesos finales, se procedió matemáticamente haciendo uso de hojas de cálculo desarrolladas en Excel de la siguiente manera:

Paso A: Normalización

- Se suma cada columna de las Matrices de Comparación Pareada, elaboradas anteriormente.
- Se divide cada celda entre el total de su respectiva columna

Ejemplo de Normalización: Cálculo C1 (Robustez) CA-5 (Taulabé - Siguatepeque)

Criterio	C1: Robustez	C2: Redundancia	C3: Importancia Logística	C4: Rapidez
C1: Robustez	$1\ /1\ ^{19}/_{35}$	5 / 14	$5\ /\ 6\ ^{2}/_{5}$	5 / 14
∑	$1\ ^{19}/_{35}$	14	$6\ ^{2}/_{5}$	14

Cada valoración de la fila, entre la sumatoria de la columna

Sumatoria primera columna

Resultado de la Fila 1 Normalizada

Criterio	C1: Robustez	C2: Redundancia	C3: Importancia Logística	C4: Rapidez
C1: Robustez	2/3	1/3	7/9	1/3

Paso B: Cálculo de Pesos

- Se calcula el promedio horizontal de cada fila de la matriz ya normalizada (cumplido el Paso A).
- La suma vertical de todos los w_i debe ser exactamente 1.00.

Ejemplo Cálculo de Pesos: C1 (Robustez) CA-5 (Taulabé - Siguatepeque)

Criterio	C1: Robustez	C2: Redundancia	C3: Importancia Logística	C4: Rapidez	% w	
C1: Robustez	2/3	1/3	7/9	1/3	= (2/3+1/3+ 7/9+1/3) / 4	53.59%	0.53

Suma de toda la fila normalizada, entre el total de datos disponible.

Tabla 8: *Cálculo del Peso (w), CA-5 (Taulabé - Siguatepeque).*

Criterio	C1: Robustez	C2: Redundancia	C3: Importancia Logística	C4: Rapidez	% w	
C1: Robustez	2/3	1/3	7/9	1/3	53.59%	0.53
C2: Redundancia	1/8	0	0	1/5	11.16%	0.11
C3: Importancia Logística	1/8	1/5	1/6	1/3	21.43%	0.21
C4: Rapidez	0	1/3	0	0	13.81%	0.14
					100.00%	1.00

Fuente: *Elaboración propia.*

Resultados obtenidos:

w1 (Robustez): 0.54 (53.59%)

w2 (Redundancia): 0.11 (11%)

w3 (Importancia Logística): 0.21 (21.43%)

w4 (Rapidez): 0.14 (13.81%)

Tabla 9: *Cálculo del Peso (w), CA-13 (Puente sobre el río León).*

Criterio	C1: Robustez	C2: Redundancia	C3: Importancia Logística	C4: Rapidez	% w	
C1: Robustez	1/2	3/7	2/3	1/2	51.72%	0.52
C2: Redundancia	1/9	0	0	0	7.86%	0.08
C3: Importancia Logística	1/6	1/4	1/5	1/3	23.97%	0.24
C4: Rapidez	1/6	1/4	0	1/6	16.45%	0.16
					100.00%	1.00

Fuente: *Elaboración propia.*

Resultados obtenidos:

w1 (Robustez): 0.52 (51.72%)

w2 (Redundancia): 0.08 (7.86%)

w3 (Importancia Logística): 0.24 (23.97%)

w4 (Rapidez): 0.16 (16%)

Resumen de obtención de datos:

- Pesos (wi): Se obtienen de la encuesta a auditores en el área vial (Matriz de Saaty).
- Valores (Ci): Se obtienen de la inspección de campo o datos técnicos de la Secretaría de Infraestructura y Transporte y otras Instituciones afines, que presentan informe de evaluación de daños e inventario de fallas en estructuras, tras un evento hidrometeorológico intenso.

Cálculo del Índice de Resiliencia

(Wan, 2018) definen la resiliencia "como la capacidad de un sistema de transporte para absorber perturbaciones, mantener su estructura y función básicas, y recuperarse a un nivel de servicio requerido dentro de un tiempo y costos aceptables después de verse afectado por interrupciones".

Obtenidos ya los datos de las 4R de la Teoría de Bruneau (C1, C2, C3, C4) (Tabla 3: Evaluación de la muestra mediante Teoría de Bruneau) y los pesos (w1, w2, w3, w4), se procede a calcular el Índice de Resiliencia:

IR = w1 (Robustez) + w2 (Redundancia) + w3 (Logística) + w4 (Rapidez)

Segmento Tabla 3

	CA-5 (Taulabé - Siguatepeque)	
C1 (Robustez)	La vía se encuentra afectada en sus dos carriles, por deslizamiento	0.5

Ejemplo: CA-5 (Taulabé - Siguatepeque)

IR = 0.53 (0.5)

Segmento Tabla 8

Criterio	C1: Robustez	C2: Redundancia	C3: Importancia Logística	C4: Rapidez	% w	
C1: Robustez	2/3	1/3	7/9	1/3	53.59%	0.53

CA-5 (Taulabé - Siguatepeque)

IR = 0.53 (0.5) + 0.11 (0.5) + 0.21 (1) + 0.14 (0.8)

IR = 0.47

CA-13 (Puente sobre el río León)

IR = 0.52 (0.2) + 0.08 (0) + 0.24 (0.7) + 0.16 (0.6)

IR = 0.37

Tabla 10: *Rangos de Referencia para el Índice de Resiliencia (IR).*

Rango de IR	Clasificación Nacional	Acción Recomendada (SIT / COPECO)
0.81 - 1.00	Resiliencia Alta	Mantenimiento preventivo de rutina.
0.61 - 0.80	Resiliencia Media-Alta	Monitoreo de puntos críticos y obras de mitigación.
0.41 - 0.60	Resiliencia Media (Alerta)	Intervención Prioritaria. El tramo presenta vulnerabilidad ante eventos hidrometeorológicos intensos.
0.21 - 0.40	Resiliencia Baja (Crítica)	Emergencia / Rehabilitación. Alta probabilidad de pérdida de conectividad.
0.00 - 0.20	Resiliencia Mínima	Colapso Funcional. Requiere reconstrucción total y/o nueva ruta.

Fuente: *Elaboración propia, adaptado de la Guía Metodológica para la Medición de Resiliencia (DIPECHO/COPECO Honduras) y los estándares de desempeño del Programa de Carreteras Resilientes (PCR-HN) de la Secretaría de Infraestructura y Transporte (SIT, 2023-2026).*

Interpretación de datos obtenidos

CA-5 (Taulabé - Siguatepeque) obtuvo un IR= (0.47), que de acuerdo a la Tabla 10, se encuentra clasificado como *Resiliencia Media (Alerta)*, por lo que este tramo requiere una atención prioritaria en robustez para evitar que un nuevo deslizamiento provocado por alguna lluvia con intensidad alta en el país, lo baje a una categoría crítica.

CA-13 (Puente sobre el río León) obtuvo un IR= (0.37), que de acuerdo a la Tabla 10, se encuentra clasificado *Resiliencia Baja (Crítica),* por lo que una falla en este puente es una evidente ruptura de un arco y dejaría el tránsito pesado rezagado, queda evidenciado la urgencia de invertir en una ruta alterna (*Redundancia*) o un puente nuevo de mayor altura al actual.

Índice de Pérdida de Conectividad (IPC)

CA-5, Taulabé - Siguatepeque

El tramo señalado es un segmento montañoso donde el riesgo alto es el deslizamiento de ladera, cuyo disparador es la saturación del suelo provocado por las altas intensidades de lluvia.

Análisis: Este punto es un paso obligatorio para el comercio entre el nodo administrativo (Distrito Central) y el nodo industrial (San Pedro Sula), absorbe la mayor parte de vehículos cuyo destino es la costa norte y casi el 100% del TPDA de vehículos pesados.

CA-13, Puente sobre el Río León

Las inundaciones pueden causar interrupciones en las carreteras que dejan las redes de transporte parcialmente operativas o completamente bloqueadas, lo que puede resultar en retrasos notables en el servicio. (Pregnolato, 2017)

Este es un punto de paso único y de alto riesgo en la trazabilidad de las rutas del transporte en la zona de costa atlántica.

Análisis: El puente es el punto de conexión entre ciudades productivas como Tela y La Ceiba y el departamento de Colón (Sector agroindustrial: palma africana, banano y otros), así como la distancia más corta entre Puerto Castilla y Puerto Cortés, que son los puertos más importantes del país.

Tabla 11: *Evaluación de Puntos Críticos y Pérdida de la Conectividad en la Red Vial Primaria (CA-5 y CA-13).*

	CA-5, Taulabé - Siguatepeque	CA-13, Puente sobre el Río León
Rutas Alternas	Son limitadas y de baja captación vial para vehículos de transporte de carga pesada (*carreteras secundarias no pavimentadas o desvíos no viables por la distancia que implica la circulación por ellos*)	**Inexistentes,** si el puente llegara a su colapso por una crecida del río (*evento hidrometeorológico*), el grafo nacional 13 de comunicación terrestre en el Litoral Atlántico queda con una ruptura representativa (*aislamiento total*)
Impacto	El cierre temporal de las vías en estudio, levanta los costos operativos del transporte (*combustible y tiempo*).	Para los nodos al Este del río, es una pérdida total de conectividad.
Argumento	Priorizar la robustez (Estado de los carriles y la habilitación del tráfico ante cualquier *evento hidrometeorológico)*	Priorizar la redundancia (un segundo puente o una ruta alterna planificada) y el diseño hidráulico basado en caudales extremos.

Fuente: *Elaboración propia.*

Tabla 12: *Niveles de criticidad según el Índice de Pérdida de Conectividad (IPC).*

Rango de IPC	Clasificación	Impacto en la Red Vial
0% - 10%	Bajo	Red vial resiliente con rutas alternas eficientes.
10% - 25%	Moderado	Red vial con debilidades; rutas alternas costosas.
+25%	Alto / Crítico	Falla integral; impacto severo en tiempos, aumento de costos.

Fuente: *Adaptado de Vulnerability Analysis of Transport Networks, por M. Taylor, 2017*

Cálculo del Índice de Pérdida de Conectividad (IPC) (Método de Eliminación de Arcos)

Caso A: Tramo Taulabé - Siguatepeque (CA-5)

En su enfoque (Fan, 2010) calcula los costos de viaje a partir del tiempo total de viaje incurrido por todos los vehículos en el sistema, con la estipulación de que toda la demanda debe ser satisfecha en cada escenario de interrupción, asimismo, (Jenelius. E., 2006) sostiene que el aumento de los tiempos y distancias de viaje, y los cambios en el flujo de tráfico juegan papeles importantes en la evaluación de la vulnerabilidad de la infraestructura de transporte

1. Tiempo de viaje Tegucigalpa – San Pedro Sula (CA-5)

Figura 2:
Ruta Tegucigalpa- San Pedro Sula, CA-5.



Fuente: *(Maps, [Mapa Dinámico], s.f.).*

2. **Simulación de Falla**: *Eliminando el arco Taulabé-Siguatepeque, se calcula el tiempo por la mejor ruta alternativa disponible*.

Figura 3:

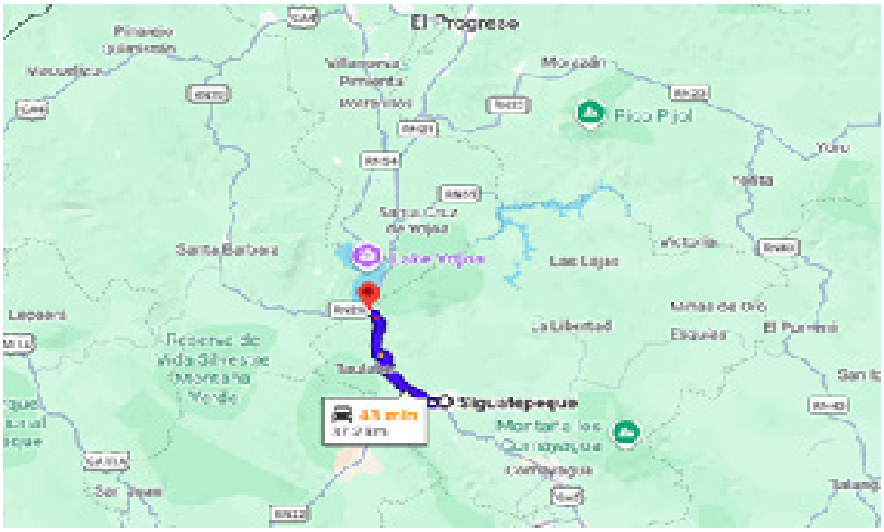
Tiempo de viaje Tegucigalpa - San Pedro Sula (Ruta por Occidente del País).



Fuente: *por Google, s.f. Nota. Repetición de la Figura 1. Adaptado de [Ruta Tegucigalpa- San Pedro Sula,* CA-5]

Figura 4:

Tiempo Arco Siguatepeque, Comayagua – Pito Solo, Comayagua.



Fuente: *(Maps, [Mapa Dinámico], s.f).*

Tabla 13: *Diferencia porcentual entre tiempo 1 y tiempo 2, IPC Logístico.*

Tiempo			IPC
Tegucigalpa – San Pedro Sula (CA-5)	Tegucigalpa – San Pedro Sula (Occidente)	Siguatepeque – Pito Solo, Comayagua	
3horas 57 minutos	15 horas 26 minutos	43 minutos	36.69%
3.95 horas			

Fuente: *Elaboración propia.*

Resultado: El tiempo resultante al eliminar el arco Siguatepeque – Pito Solo, aumenta significativamente (10.76 horas).

Tramo	Tiempo
Tegucigalpa – San Pedro Sula (Occidente)	15.43 horas
Siguatepeque – Pito Solo, Comayagua	0.72 horas
Diferencia	14.72 horas
Tegucigalpa – San Pedro Sula (CA-5)	3.95 horas
Tiempo que aumenta el cambio de ruta	10.76 horas

Se restan los tiempos de 0.72horas correspondiente al tramo Siguatepeque – Pito Solo, Comayagua, en vista que se encuentra sobre la CA-5 y siempre se recorrería al existir el desvío del tránsito vial, del mismo modo, como la intención es calcular el tiempo que aumenta dicha desviación realizada, se resta 3.95 horas correspondiente al tramo Tegucigalpa – San Pedro Sula (CA-5), que es el estimado si la vía se encuentra despejada.

El cálculo porcentual de la pérdida de tiempo se realizaría dividiendo el tiempo sin interrupciones en la vía entre el tiempo calculado al desviar el tránsito vial:

$$\frac{3.95\ horas}{10.76\ horas} = 0.3669\ x\ 100 = 36.69\%$$

El IPC de acuerdo a la Tabla 12, es un resultado alto/ crítico (36.69%), es de señalar que, aunque no existe una desconexión total, si un alto impacto en tiempo y costos de operación.

Caso B: CA-13, Puente sobre el Río León

1. Tiempo de viaje Trujillo, Colón – San Pedro Sula, Cortés (CA-13)

Figura 5:
Ruta Puerto Castilla, Colón – Puerto Cortés, Cortés



Fuente: *(Maps, [Mapa Dinámico], s.f).*

Es de señalar que aunque existe la ruta nacional 23, esta no se encuentra en condiciones físicas (nivel de terracería, infraestructura hidráulica frágil) para la habilitación del tránsito de carga pesada, situación que indica que no hay ruta alterna viable para equipo pesado, prevaleciendo una desconexión total en la red de la CA-13, cabe recalcar que aunque la CA-5 absorbe mayor cantidad de volumen de tráfico vial, la CA-13 al no existir rutas alternas viables para alivianar su tráfico, presenta una mayor fragilidad que la CA-5.

Resultado: El tiempo al interrumpir el arco en el puente sobre el río León, deja suspendidos los nodos de Puerto Castilla, Colón y Puerto Cortés, Cortés, el IPC daría un resultado extremadamente alto/ crítico (>80%), demostrando que es una ruptura de arco crítico.

Discusión:

1. Interpretación de los resultados obtenido

Se comprobó que la red vial primaria en el país (CA-5 y CA-13), funciona bajo un riesgo operativo frágil, lo anterior basado en los resultados obtenido en el Índice de Resiliencia de 0.47 en la CA-5 (Taulabé – Siguatepeque) y de 0.37 en la CA-13 (Puente sobre el Río León), demostrando que el diseño actual de la infraestructura vial no es resiliente, sino funcional.

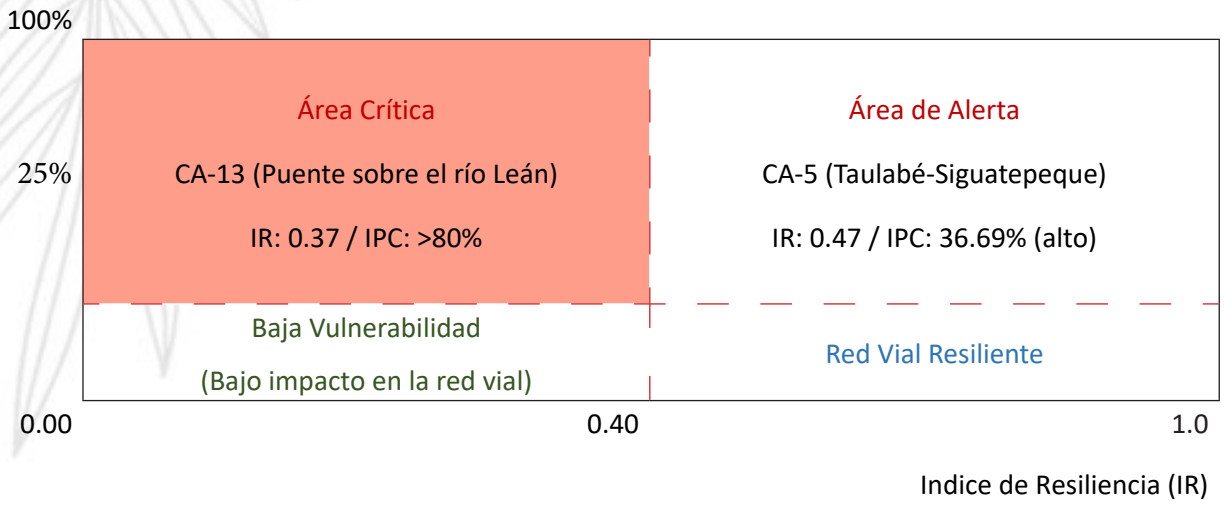
Esto demuestra que de acuerdo a las 4R de la Teoría de Bruneau, se ha brindado mayor enfoque a la Robustez (estado o infraestructura de la vía, como se encuentra el estado del pavimento o si su habilitación es resuelta con prontitud), no obstante, el artículo muestra la necesidad de prestar mayor atención a la Redundancia (existencia y capacidad de movilidad de tránsito pesado por las rutas alternas).

El Índice de Pérdida de Conectividad (IPC) del 36.69% en el corredor logístico de la CA-5 y mayor al 80% en la CA-13, presenta que la economía nacional es altamente vulnerable a eventos hidrometeorológicos,

agravado por la composición geológica del suelo que predomina en la zona, mismo que está propenso a deslizamientos. La diferencia entre ambos tramos consiste en que si la CA-5 sufre una crisis (paso cerrado) el transporte de carga tiene que dar una vuelta de casi 11 horas por el Occidente del país, impactando directamente en el tiempo de demora y la economía, ya que aumenta los gastos operativos; con el mismo enfoque la CA-13 enfrenta una crisis de anticipación, al encontrarse expuesta al aislamiento por algún evento de lluvia intenso, dicho enfoque debería ser una prioridad de peso de intervención estatal.

Haciendo uso de la Teoría de Grafos, se logró identificar y demostrar que el Puente sobre el Río León (CA-13) constituye el punto de mayor riesgo para la movilidad vial, aún por encima del punto analizado por deslizamiento en la CA-5 independientemente de que esta última absorba un volumen de tráfico mayor.

Gráfico 1:
Comparación IPC & IR (CA-5 - CA-13)



Fuente: *(Maps, [Mapa Dinámico], (s.f)).*

2. Contribuciones del estudio

El IR y el IPC en la matriz del Gráfico 1, muestran que en el país la infraestructura vial es el factor principal que mueve la eficiencia económica, si estas sufren colapso o algún tipo de modificación en su estructura o presentan fallas en la red, obligan a que se realicen cambios fuertes en los tiempos de viaje.

Países como Colombia poseen estudios resultado de lluvias intensas como las provocadas por el fenómeno de La Niña, que ha dado como producto la Guía Metodológica para la Evaluación del Riesgo Físico por Movimientos en Masa en la Infraestructura Vial, con la finalidad de reducir las pérdidas por la falta de conectividad en corredores viales. (INVIAS, 2018)

Perú ha realizado publicaciones sobre fenómenos hidrometeorológicos extremos y los tipos de amenaza e impactos en el sector transporte (daño que ocasionan a las vías y su afectación en el país), con

el financiado por el Banco Mundial, "Propuestas para fortalecer la resiliencia del Perú frente a desastres" (BM, 2021)

El presente artículo aporta bases firmes sobre la necesidad de priorizar la inversión hacia la búsqueda y acondicionamiento de rutas alternas, que optimicen la economía a través de facilitar la movilidad vial, disminuyendo los daños que provoca la ruptura de arco.

3. Limitaciones del estudio

El cálculo del Índice de Pérdida de Conectividad (IPC) se basó en estimados de tiempos de viaje en tiempo real, mediante la herramienta de Google maps, mismas que podrían variar de acuerdo a su serviciabilidad o estado de la superficie del camino, condiciones climáticas adversas no previstas en los cálculos, del mismo modo, los pesos (*wi*) trabajados para el cálculo del Índice de Resiliencia (IR), fueron calculados mediante el método de expertos (AHP - Analytic Hierarchy Process) y confirmada estadísticamente, con datos a percepción de siete (7) especialistas consultados, con experiencia en el ámbito de auditoría a posteriori y concurrente de la red vial pavimentada y no pavimentada en Honduras.

4. Obstáculos teóricos y prácticos

La relación entre la mayoría de los indicadores de demanda de desplazamientos y la actividad económica es más estrecha de lo que podríamos pensar. Lógicamente, el reparto de los viajes entre los diferentes modos se ve influenciado por la estructura relativa de la oferta entre cada uno de ellos, de manera que modificaciones estructurales dan lugar a cambios de modos. (Tecnología, 2025). La accesibilidad puede utilizarse como variable centinela para monitorear la eficiencia de un sistema de transporte. (García- Palomares, 2018)

El estudio fortalece la necesidad de cambiar y complementar el pensamiento de una carretera segura por el estado de la superficie y condiciones geométricas (Robustez), por el de una vía resiliente, aunque en el caso de la CA-13 los resultados implican una inversión económica considerables, ya que se trata de construir adicionalmente / reforzar o ampliar / reconstruir el puente sobre el Río León respondiendo a las amenazas actuales, así como, pavimentar y/o mantener rutas como la RN-113 o RN-23 que favorecen el tránsito vial en la zona de Colón ante un evento hidrometeorológico intenso, caso contrario en la CA-5 que su solución práctica consiste en pavimentar y/o mantener las vías que sirven de conexión en el sector de Pito Solo, éstas deberían ser vistas como tramos que aportan movilidad a las rutas de mayor volumen de tráfico vehicular, su buen estado evitaría el colapso del movimiento del tránsito e interrupción de la conectividad, ante un deslizamiento, esto contribuiría a la movilidad del transporte de carga pesada y conectividad vial.

Conclusiones:

Resiliencia & Conectividad: Se determinó el Índice de Resiliencia (IR) y el Índice de Pérdida de Conectividad (IPC) de dos tramos de la red vial primaria en Honduras, concluyendo que se posee una infraestructura de topología lineal, los valores de IR obtenidos fueron de 0.47 en la CA-5 y 0.37 en la CA-13, confirmando que la red vial primaria del país enfrenta niveles de vulnerabilidad alto / crítico.

Identificación de Puntos Críticos: mediante la aplicación de la Teoría de Grafos y el método AHP, se identificó que la falta de Redundancia (C2) es el factor que más debilita la resiliencia de la red vial, los

datos muestran que el Puente sobre el Río León (CA-13) es el punto más frágil del estudio y su colapso compromete la conectividad, quedando en aislamiento total (Redundancia = 0), superando en criticidad al tramo señalado de la CA-5.

Impacto en la Movilidad Vial: Se demostró que el arco Taulabé-Siguatepeque en la CA-5 cumple una función indispensable, su IPC de 36.69% demuestra que la red vial actual es ineficiente ante fallas en esta vía, aumentando en aproximadamente 10.76 horas en el tiempo de viaje hacia la costa norte del país, esto representa una ruptura de arco (no existe movilidad) que impacta directamente en los costos de operación y en la economía nacional, fortaleciendo la necesidad de mantener las rutas de alivio existentes, funcionales para el transporte de carga pesada (Redundancia y Rapidez).

Los cálculos demuestran que la resiliencia en la red vial primaria en Honduras no puede depender únicamente de la Robustez (C1) o los mantenimientos viales (comprendidos erróneamente como bacheos) ya que para lograr una verdadera resiliencia vial, se debe priorizar la inversión pública en Redundancia y Rapidez de respuesta, de ésta manera se convertiría la red vial de pasos únicos a un sistema de malla, garantizando la conectividad incluso ante la presencia de eventos hidrometeorológicos intensos y críticos.

Con fundamento en los cálculos realizados y basándose en los resultados obtenidos, es importante que se incluyan en los criterios de inversión pública, variables como el Índice de Pérdida de Conectividad (IPC), para aquellas vías que su colapso genera aislamiento y ruptura de arco vial como lo representa el puente sobre el río Lean en la CA-13.

El análisis de la red vial secundaria y terciaria no pavimentada, con la intención de identificar si existen rutas de alivio que coadyuven a mejorar la redundancia del sistema vial del país, debe ser considerado para estudios posteriores, esto fortalecería la movilidad y brindaría alternativas ante un evento hidrometeorológico que impida el tránsito vial.

Agradecimientos:

La determinación de los pesos de importancia *wi* fue posible gracias a la colaboración de profesionales de ingeniería, quienes mediante su juicio experto alimentaron la matriz de comparación pareada (Escala de Saaty). A todos ellos, gracias.

Referencias:

(BCIE), B. C. (18 de 04 de 2024). https://www.bcie.org/noticias/inicia-la-primera-licitacion-del-programa-de-carreteras-resilientes-de-honduras-pcr-hn-financiado-por-el-bcie

(BM), B. I. (2021). Propuestas para fortalecer la resiliencia del Perú frente a desastres. https://documents1.worldbank.org/curated/en/445981632307005898/pdf/Institucionalidad-Inclusión-y-Territorio-Propuestas-para-Fortalecer-la-Resiliencia-del-Per%C3%BA-Frente-a-Desastres.pdf

(IPCC), P. I. (29 de 06 de 2023). Cambio climático 2021: Bases científicas físicas. Cambrige University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896

(SEFIN), S. d. (08 de 07 de 2025). https://www.sefin.gob.hn/consejo-de-ministros-del-gobierno-de-espana-aprueba-credito-de-79-8-millones-para-infraestructura-vial-en-honduras-tras-visita-oficial-de-la-presidenta-xiomara-castro/

Akbarzadeh, M. S. (2019). Detección de enlaces críticos de redes urbanas mediante métodos de detección de clústeres. ELSEVIER, 515(10.1016), 288-298.

Armijo, R. (14 de 10 de 2024). SINIT), Sistema Nacional De Información Territorial. https://sinit.hn/2024/10/14/corredores-viales-de-honduras/

Bell, M. G. (2006). A game theory approach to measuring the performance reliability of transport networks. Transportation Research Part B:. Revista de Geografía del Transporte, 14(3), 215- 227.

Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallace, W. A., & von Winterfeldt, D. (2003). A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. Earthquake Spectra,. 19(4), 733- 752. https://doi.org/10.1193/1.1623497

CARRETERAS, M. D. (Marzo de 2017). https://mantenimientocarreterasyvias.blogspot.com/2007/05/serviciabilidad.html

Chen, A. Y. (2002). Capacity reliability of a road network: an assessment methodology and numerical results. Transportation Research Part B: Methodological. 36((3)), 225- 252. https://doi.org/10.1016/S0191-2615(00)00048-5

Construcción), E. (06 de julio de 2022). EADIC. https://eadic.com/blog/entrada/la-resiliencia-en-carreteras-desde-el-enfoque-de-la-explotacion/

Digital, P. (06 de 11 de 2020). Policía de carreteras piden precaución a conductores debido a deslizamientos en la CA-5. https://proceso.hn/policia-de-carreteras-piden-precaucion-a-conductores-debido-a-deslizamientos-en-la-ca-5/

Fan, Y. L. (2010). Solving Stochastic Transportation Network Protection Problems Using the Progressive Hedging-based Method. Springer Nature, 10(2916), 193- 208.

García- Palomares, J. G.-G. (2018). Análisis de la criticidad de la red vial de alta capacidad española. Springer Nature, 45((4)), 1139- 1159.

Gómez, M. I. (06 de febrero de 2025). Vulnerabilidad. Enciclopedia Concepto. https://concepto.de/vulnerabilidad/

Instituro Nacional de Vías (INVIAS), S. G. (2018). Guía Metodológica para la Evaluación del Riesgo Físico por Movimientos en Masa en la Infraestructura Vial. Bogotá.

Jafina Bramka, A. K. (2020). Métricas de criticidad de la red de transporte: un análisis comparativo y una guía para la selección. Transport Reviews, 40 (2)(10.1080), 241-264.

Jenelius. E., P. T.-G. (2006). Importance and exposure in road network vulnerability analysis. ScienceDirect, 40(11.003), 537-560.

Liu,Q. et al (2023). Riesgo de deslizamientos de tierra en carreteras regionales: considere el kilometraje de la carretera en relación con las pérdidas previstas. Investigación en Transporte Parte D: Transporte y Medio Ambiente, 120(103771). https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103771

Liu,Q. et al (2024). Desarrollo de una técnica basada en probabilidades para mejorar la medición de la vulnerabilidad a los deslizamientos de tierra en carreteras regionales. Ingeniería de Confiabilidad y Seguridad de Sistemas, 244(Artículo 109918). https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109918

Maps, G. ((s.f)). [Mapa Dinámico]. https://www.google.com/maps/@14.4535149,-87.3646826,9.18z/data=!5m1!1e1?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI2MDYwMy4xIKXMDSoASAFQAw%3D%3D

Maps, G. ((s.f.)). (Mapa Dinámico]. https://www.google.com/maps/dir/Puerto+Castilla,+Col%C3%B3n/Puerto+Cortes,+Cort%C3%A9s/@15.8678675,-86.7673988,9.07z/data=!4m14!4m13!1m5!1m1!1s0x8f6a3bec058d2667:0x8aa1988cf6a0b4e4!2m2!1d-85.9585544!2d16.0173268!1m5!1m1!1s0x8f67b3933f2bee1d:0x90b12371e90b

Maps, G. ((s.f.)). [Mapa Dinámico]. https://www.google.com/maps/@14.8674701,-87.2264733,8.22z/data=!5m1!1e1?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI2MDYwMy4xIKXMDSoASAFQAw%3D%3D

Merino-Benítez, T. y.-T. (2021). Manual: Proceso Analítico (AHP). México: UNAM.

Miano, A. (2024). Evaluación de la eficiencia de las redes viales urbanas que conectan pares de nodos críticos bajo riesgo sísmico. MDPI, 7465. https://doi.org/10.3390/su16177465

Nogal, M. (2018). Evaluación de la resiliencia del tráfico rodado asumiendo un comportamiento estocástico del usuario. Ingeniería de Confiabilidad y Seguridad de Sistemas, 10.1016(185), 72 -83. https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.12.013

Ortega, E. M. (2020). Identificación de tramos críticos del sistema de transporte español debido a escenarios climáticos. Transport Geography, 84(10.2691).

Pregnolato, M. (2017). El impacto de las inundaciones en el transporte por carretera: una función de alteración de la profundidad. ElSEVIER, 55(10.1016), 67-81.

Prensa, D. L. (11 de 11 de 2025). https://www.laprensa.hn/honduras/lluvias-danos-tegucigalpa-familias-afectadas-honduras-2025-NP27823680#google_vignette

Prensa, D. L. (01 de 02 de 2026). Activan respuesta de emergencia en la red vial por derrumbes y lluvias. https://www.laprensa.hn/honduras/lluvias-derrumbes-incomunicados-norte-honduras-BO29146474

Prensa, D. L. (28 de 01 de 2026). Lluvias intensas golpean el litoral Atlántico y obligan a evacuaciones. https://www.laprensa.hn/fotogalerias/honduras/frente-frio-lluvias-atlantida-colon-inundaciones-evacuados-DK29101031

Riesgo, C. G. (2024). Agencia Digital del Estado de México (ADEM). https://cgproteccioncivil.edomex.gob.mx/hidrometeorologicos

Route), P. (. (s.f.). Manual de Gestión de Desastres, 1.2.2 Definición de resiliencia. https://disaster-management.piarc.org/es/gestion-resiliencia/definicion-de-resiliencia

Scott, K. (24 de diciembre de 2024). Banco Mundial y Honduras promueven la conectividad y la resiliencia de la red vial en la región noroccidental del país. (I. B. Mundial, Entrevistador)

SINIT. (14 de 10 de 2024). Corredores Viales de Honduras. Honduras.

Snelder, M. V. (2012). A framework for robustness analysis of road networks for short term variations in supply. ELSEVIER, 46(02.007), 828- 842.

Sullivan, J. N.-H. (2010). Identificación de tramos críticos de carretera y medición de la robustez a nivel del sistema en redes de transporte con enlaces aislantes: un enfoque basado en enlaces para la reducción de capacidad. Science Direct, 44(5), 323- 336.

Tecnología, S. G. (2025). Importancia del estudio dela Movilidad en la Seguridad Vial. Ministerior del Interior, Gobierno de España.

Tiempo, D. (02 de 05 de 2026). https://tiempo.hn/honduras/2026/05/02/tramos-peligrosos-carreteras-honduras-dnvt/

Wan, C. Y. (2018). Resilience in transportation systems: a systematic review and future directions. Transport Reviews, 38(10.1080), 479- 498.

Wood, N. (2025). Variaciones en la exposición vial y los volúmenes de tráfico en los Estados Unidos en áreas susceptibles a deslizamientos de tierra. Revista Internacional de Reducción del Riesgo de Desastres, 124(Artículo 105567). https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2025.105567