Study of the causes of bridge collapse in Ecuador (2000-2022).

Estudio de las causas del colapso de puentes en Ecuador (2000-2022).

Autores:

Marín Guzmán, Christopher Rodolfo
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA
Maestría en Ingeniería Civil con mención en Estructuras Sismorresistentes
Cuenca-Ecuador

crmaring80@est.ucacue.edu.ec

https://orcid.org/0000-0002-6601-032X

Maldonado Noboa, Juan Sebastián
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA
Maestría en Ingeniería Civil con mención en Estructuras Sismorresistentes
Cuenca-Ecuador

jmaldonadon@ucacue.edu.ec

https://orcid.org/0000-0001-5329-2201

Citación/como citar este artículo: Marin, C. y Maldonado, J. (2022). Estudio de las causas del colapso de puentes en Ecuador (2000-2022). MQRInvestigar, 6(4), 368-395.
https://doi.org/10.56048/MQR20225.6.4.2022.368-395

Fechas de recepción: 15-OCT-2022 aceptación: 23-OCT-2022 publicación: 15-DIC-2022

https://orcid.org/0000-0002-8695-5005
http://mqrinvestigar.com/

Resumen

En este artículo se estudiaron 72 casos de fallas de puentes en Ecuador reportadas desde el año 2000 hasta 2022. Para identificar las principales causas del colapso parcial o total de los puentes en estudio, se realizó un análisis y evaluación del daño de la estructura, mediante información divulgada públicamente. El 47% de los casos estudiados corresponde a puentes de hormigón, el 40% corresponde a estructuras de acero y el 13% restante comprenden puentes de madera. Las causas más frecuentes de fallas de puentes se atribuyeron a crecientes de ríos, sobrecargas e impactos. Las inundaciones y la socavación, contribuyeron al pico de frecuencia de fallas con un 46% de todas las fallas. La sobrecarga del puente y las fuerzas de impacto lateral de camiones y barcos constituyen el 25% de las fallas totales. Otras causas principales frecuentes son el diseño, los detalles, la construcción, el mantenimiento y eventos sísmicos. Basados en los resultados obtenidos, se evidencia la necesidad que tiene el país y la región en el área de conservación de las obras de Infraestructura vial. Por lo tanto, se recomienda crear un programa riguroso de administración, control y mantenimiento de los puentes en el país para evitar que se sigan presentando este tipo de desastres en el futuro.

Palabras claves: Puente, Colapso, Socavación, Sobrecargas, Diseño, Impacto.

Abstract

In this article, 72 cases of bridge failures in Ecuador reported from the year 2000 to 2022 were studied. To identify the main causes of the partial or total collapse of the bridges under study, an analysis and evaluation of the damage of the structure was carried out, through publicly disclosed information. 47% of the cases studied correspond to concrete bridges, 40% correspond to steel structures and the remaining 13% comprise wooden bridges. The most frequent causes of bridge failures were attributed to river floods, overloads and impacts. Flooding and scouring contributed to the peak failure frequency at 46% of all failures. Bridge overloading and side impact forces from trucks and ships make up 25% of total failures. Other common root causes are design, detailing, construction, maintenance, and seismic events. Based on the results obtained, the need for the country and the region in the area of conservation of road infrastructure works is evident. Therefore, it is recommended to create a rigorous administration, control and maintenance program for bridges in the country to prevent this type of disaster from occurring in the future.

Keywords: Bridge, Collapse, Scour, Overloads, Design, Impact.

Introducción

Las fallas de los puentes en su mayoría están acompañadas de diversas consecuencias y en algunos casos catastróficas; comercio restringido, ciudades incomunicadas, dificultosa movilidad social e incluso pérdida de vidas (Estes & Frangopol, 2001). Por ejemplo, el colapso parcial del Viaducto de Polcevera en Génova, Italia, que tuvo lugar el 14 de agosto de 2018 durante una tormenta torrencial, dejó como resultado 43 personas fallecidas y 12 gravemente heridas, y la causa del accidente sería la falla de los cables que sostienen la estructura (Rymsza, 2020), además con un costo de demolición de 21,4 millones de euros (Appalto & Demolizione, 2019).

A nivel mundial se presentan fallos y colapsos de puentes, con causas y consecuencias similares a los suscitados en Ecuador. Debido a estos accidentes, muchos países han implementado medidas de prevención y corrección, mediante programas de control, mantenimiento y conservación, derivando en la creación de sistemas de planificación y gestión de puentes.

De acuerdo al último boletín informativo de infraestructuras de Estados Unidos (ASCE, 2021), el país cuenta con más de 617.000 puentes, de los cuales el 42% de todos los puentes tienen al menos 50 años y 46.154, o el 7,5% de los puentes del país, se consideran estructuralmente deficientes, aunque en comparación con los datos de (ASCE, 2001), esta cifra fue un 21.5% más baja. En el informe se indica que muchos de los puentes más antiguos de Estados Unidos son susceptibles a fenómenos meteorológicos extremos y a inundaciones cada vez más frecuentes, que pueden provocar desbordamientos, derrumbes y otros daños relacionados con las fuertes temporadas de lluvia. En las zonas sísmicas, los terremotos son una amenaza significativa y la capacidad de un puente para soportar estos eventos extremos es un problema de seguridad importante.

Este problema también se presenta en Ecuador debido a su ubicación geográfica y los factores climáticos, los cuales está influenciados por las diferentes corrientes marinas que llegan al país, y que en ciertos años se intensifican generando el fenómeno del Niño, incrementando los días de fuertes lluvias en Ecuador, y a su vez causando crecientes de ríos y provocando deslizamientos que pueden llegar a afectar a la estructura de los puentes. (Barros, J. G., Troncoso, 2010)

En Ecuador a diferencia de Estados Unidos no se ha observado una reducción significativa de las fallas en las estructuras de los puentes en los últimos años, ya que se han registrado varios casos de puentes vehiculares y peatonales que han colapsado de forma parcial o total con mayor frecuencia en la última década. En Países en desarrollo económico como el de Ecuador y caracterizado por su geografía difícil con abundantes montañas y ríos, la

infraestructura vial especialmente los puentes, se constituyen en elementos fundamentales para garantizar la conectividad, movilidad y productividad económica del país.

Además, en la actualidad los puentes están sujetos a camiones que son más pesados que aquellos para los que fueron diseñados originalmente, superando las 40 toneladas de carga, los cuales amenazan con sobrecargar los elementos del puente, causar fatiga y agrietamientos y disminuir la vida útil de la estructura. Estos factores han causado importantes deficiencias en los puentes de carreteras de los países en desarrollo en términos de capacidad de carga y servicio (ASCE, 2021). Sin embargo, los hallazgos de estas fallas a menudo resultan ser de gran valor, ya que amplían la base de conocimientos de la comunidad de ingeniería civil, academia y el Estado, a través de la comprensión y el análisis de la causa de la falla. Al estudiar y evaluar las principales causas y consecuencias de la falla de estos puentes, se pueden evitar errores similares en el futuro aprendiendo del pasado (MICHAEL ROBERT TARICSKA, 2014).

Antecedentes

Fallas y Colapsos

Antes de definir el colapso y sus categorías, primero debemos tener en cuenta la definición de puente. La Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (AASTHO, 1999) define un puente como "una estructura, incluidos los soportes, construida sobre una depresión u obstrucción (agua, carretera o vía férrea), que tiene una vía para transportar tráfico (vehicular o peatonal) u otras cargas en movimiento y que tengan una abertura medida a lo largo del eje de la calzada de más de 6 metros entre los estribos".

Para este documento, el término falla se define como la incapacidad de una estructura construida (en este caso, un puente) o de sus componentes para funcionar de acuerdo a lo especificado en los requisitos de diseño y construcción. Por otra parte, el colapso es la falla global o de una parte fundamental de un puente, donde puede ser necesario un reemplazo total o parcial de la estructura. En términos de operatividad, el colapso ocurre cuando la totalidad o una parte sustancial de un puente se derrumba, perdiendo la capacidad de realizar su función. El colapso se puede clasificar en dos categorías, colapso total y colapso parcial. El colapso parcial se refiere a un incidente en el que el puente sufre alguna deformación o pérdida de sección, pero aún puede permanecer en servicio, mientras que el colapso total se refiere a un incidente en el que el puente no puede dar servicio a los flujos de tráfico. Un ejemplo para cada uno sería apoyos bloqueados y pilares derribados, respectivamente (Sharma & Mohan, 2011).

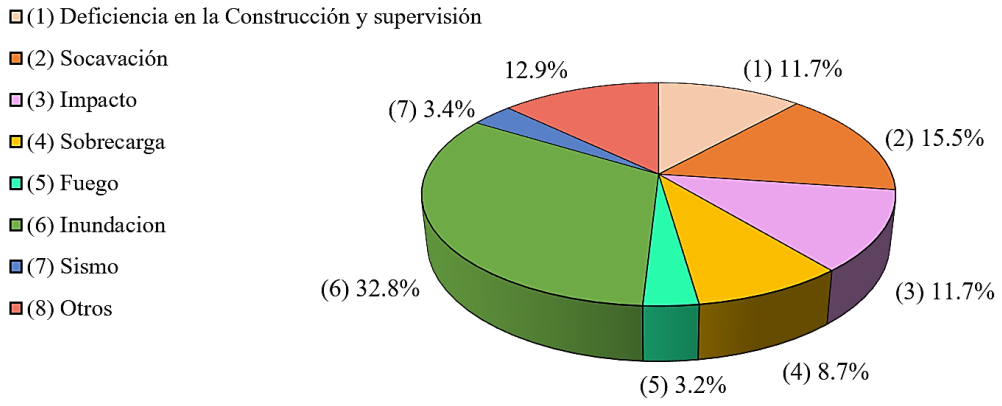
Principales causas de las fallas

A lo largo de la historia, muchos puentes han colapsado por diferentes motivos. En la investigación realizada por (Wardhana et al., 2003), se analizaron 503 colapsos de puentes durante el período comprendido entre 1989 y 2000, en la cual el autor clasificó las causas de las fallas de los puentes en seis causas principales que pertenecen a dos subcategorías; causas habilitadoras (diseño, detallado, construcción, mantenimiento y problemas relacionados con los materiales) y causas desencadenantes (eventos externos), cuya distribución de causas de los colapsos se muestran en la Figura 1, en donde la inundación y la socavación en conjunto representaron casi la mitad de los colapsos de puentes, es decir un 48.3% del total de fallas. Otro estudio realizado en Colombia, en el cual se evaluaron 63 puentes colapsados desde 1986 hasta 2001, muestra siete causas principales del colapso; atentados terroristas, avalancha y crecientes de río, socavación, deficiencia estructural y de diseño, deficiencias en la construcción e inspección, sobrecarga e impacto y falta de mantenimiento. Los resultados obtenidos en aquel estudio revelaron que las causas más representativas son la socavación, las avalanchas y crecientes de rio con un total del 48% de todos los colapsos como se representa en la Figura 2 (Muñoz et al., 2009).

Esta investigación clasifica las principales causas del colapso de un puente en dos categorías generales; factores naturales (socavación, Sismos, Crecientes y avalanchas) y factores humanos (deficiencia estructural y de diseño, sobrecarga e impacto, deficiencia en la construcción y fiscalización y falta de mantenimiento), tomando como referencia el estudio realizado por (Deng et al., 2016).

Figura 1

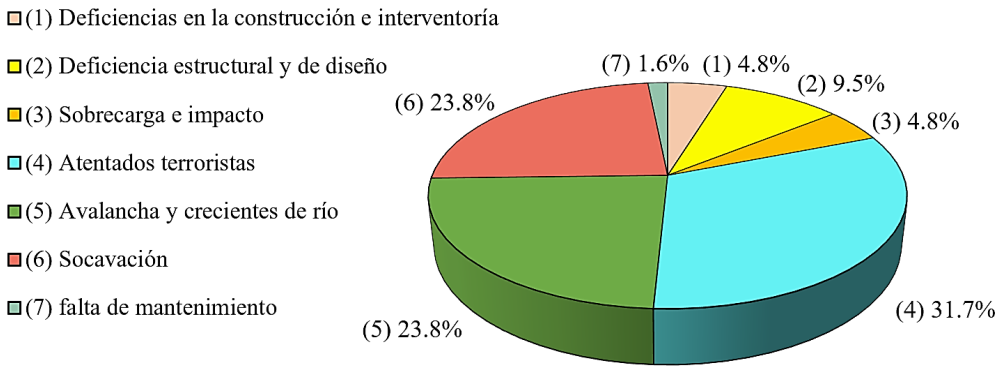
Distribución de las causas de los 503 colapsos de puentes reportados durante el período entre 1989 y 2000 en los Estados Unidos



Fuente: Adaptado de Wardhana et al. (2003)

Figura 2

Distribución de las causas de los 63 colapsos de puentes reportados durante el período entre 1986 y 2001 en Colombia



Fuente: Adaptado de Muñoz et al. (2009)

Desarrollo

Inventario de puentes colapsados

Para el desarrollo de este trabajo el primer paso es la recolección de información de los puentes que han colapsado de manera parcial o total en Ecuador desde el año 2000, los datos se obtuvieron de informes de situación del Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias, estudios presentados por Universidades y empresas consultoras y de información divulgada públicamente. Con estos datos se elaboró un inventario con los antecedentes y las causas del colapso de cada uno de los puentes, incluyendo información detallada como la fecha del suceso, ubicación de la estructura (provincia), tipo de puente (viga, losa, arco, colgante, atirantado, alcantarilla, Bailey, armadura), material (madera, acero, hormigón), uso del puente (carrozable, peatonal), estado de ocurrencia (construcción, servicio) y tipo de colapso (parcial, total). En la mayoría de los casos estudiados no se encontró un informe detallado que presente la causa específica del colapso. Sin embargo, se realizó un análisis aproximado de las causas de los colapsos, en función de comentarios y declaraciones publicadas en medios de comunicación e informes de situación por parte de las autoridades competentes. La Tabla 1 proporciona toda la información necesaria para esta investigación.

Tabla 1

Inventario de puentes colapsados en Ecuador (2000-2022)

N	Fecha	Provincia	Tipo de colapso	Uso del puente	Tipo de puente	Material	Estado de ocurrencia	Causa del colapso
1	14 octubre 2000	Chimborazo	Colapso parcial	Carrozable	Viga	Hormigón	Servicio	Crecientes y avalanchas
2	12 diciembre 2001	Pichincha	Colapso total	Carrozable	Losa	Hormigón	Servicio	Crecientes y avalanchas
3	8 febrero 2002	Pichincha	Colapso parcial	Carrozable	Viga	Hormigón	Servicio	Crecientes y avalanchas
4	17 julio 2002	Morona Santiago	Colapso total	Carrozable	Viga	Madera	Servicio	Crecientes y avalanchas
5	22 junio 2005	Guayas	Colapso total	Peatonal	Armadura	Acero	Servicio	Sobrecarga e impacto
6	1 junio 2006	Zamora Chinchipe	Colapso parcial	Carrozable	Viga-cajón	Hormigón	Servicio	Deficiencia estructural y de diseño
7	26 noviembre 2006	Pastaza	Colapso total	Carrozable	Colgante	Madera	Servicio	Falta de mantenimiento
8	26 septiembre 2007	Sucumbíos	Colapso total	Carrozable	Bailey	Acero	Servicio	Sobrecarga e impacto
9	4 marzo 2008	Los Ríos	Colapso total	Carrozable	Viga	Hormigón	Servicio	Crecientes y avalanchas
10	11 julio 2009	Pichincha	Colapso total	Peatonal	Viga	Hormigón	Construcción	Deficiencia estructural y de diseño
11	31 octubre 2009	Los Ríos	Colapso total	Peatonal	Viga	Madera	Servicio	Sobrecarga e impacto
12	15 mayo 2010	Guayas	Colapso parcial	Carrozable	Losa	Hormigón	Servicio	Deficiencia estructural y de diseño
13	15 mayo 2010	Manabí	Colapso total	Carrozable	Alcantarilla	Hormigón	Servicio	Crecientes y avalanchas
14	9 julio 2010	Zamora Chinchipe	Colapso parcial	Carrozable	Colgante	Madera	Servicio	Sobrecarga e impacto
15	23 julio 2010	Zamora Chinchipe	Colapso total	Carrozable	Arco	Acero	Construcción	Deficiencia en la construcción y fiscalización
16	7 diciembre 2010	Guayas	Colapso parcial	Carrozable	Viga	Hormigón	Construcción	Deficiencia estructural y de diseño
17	11 junio 2011	Pichincha	Colapso total	Peatonal	Viga	Hormigón	Construcción	Deficiencia en la construcción y fiscalización
18	29 noviembre 2011	Manabí	Colapso total	Carrozable	Viga	Hormigón	Construcción	Deficiencia estructural y de diseño
19	22 febrero 2012	Manabí	Colapso total	Carrozable	Viga	Hormigón	Servicio	Crecientes y avalanchas
20	1 febrero 2013	El Oro	Colapso parcial	Carrozable	Viga	Hormigón	Construcción	Deficiencia en la construcción y fiscalización
21	14 febrero 2013	Azuay	Colapso total	Carrozable	Viga	Madera	Servicio	Crecientes y avalanchas
22	14 marzo 2013	Los Ríos	Colapso parcial	Carrozable	Viga	Acero	Servicio	Crecientes y avalanchas

23	19 marzo 2013	Napo	Colapso parcial	Carrozable	Viga	Acero	Servicio	Crecientes y avalanchas
24	27 septiembre 2013	Zamora Chinchipe	Colapso total	Carrozable	Viga	Acero	Servicio	Falta de mantenimiento
25	10 diciembre 2013	Zamora Chinchipe	Colapso total	Carrozable	Viga	Acero	Servicio	Sobrecarga e impacto
26	12 marzo 2014	Bolívar	Colapso parcial	Carrozable	Losa	Hormigón	Servicio	Socavación
27	4 abril 2014	Napo	Colapso total	Carrozable	Colgante	Acero	Servicio	Deficiencia estructural y de diseño
28	18 agosto 2014	Manabí	Colapso parcial	Carrozable	Colgante	Madera	Servicio	Falta de mantenimiento
29	22 agosto 2014	Tungurahua	Colapso total	Carrozable	Losa	Hormigón	Servicio	Crecientes y avalanchas
30	22 agosto 2014	Tungurahua	Colapso parcial	Carrozable	Viga	Hormigón	Servicio	Crecientes y avalanchas
31	22 agosto 2014	Tungurahua	Colapso parcial	Carrozable	Viga	Acero	Servicio	Crecientes y avalanchas
32	18 enero 2015	Guayas	Colapso parcial	Carrozable	Viga	Hormigón	Servicio	Socavación
33	6 mayo 2015	Cañar	Colapso total	Carrozable	Colgante	Acero	Servicio	Sobrecarga e impacto
34	30 mayo 2015	Los Ríos	Colapso total	Carrozable	Viga	Hormigón	Servicio	Socavación
35	25 febrero 2016	Chimborazo	Colapso total	Carrozable	Losa	Hormigón	Servicio	Socavación
36	16 abril 2016	Guayas	Colapso total	Carrozable	Viga	Hormigón	Servicio	Sismos
37	16 abril 2016	Guayas	Colapso parcial	Carrozable	Viga	Hormigón	Servicio	Sismos
38	29 marzo 2017	Pastaza	Colapso parcial	Carrozable	Losa	Hormigón	Servicio	Crecientes y avalanchas
39	31 marzo 2017	Pichincha	Colapso total	Carrozable	Viga	Hormigón	Servicio	Socavación
40	5 abril 2017	Manabí	Colapso parcial	Carrozable	Colgante	Acero	Servicio	Falta de mantenimiento
41	11 junio 2017	Manabí	Colapso parcial	Carrozable	Colgante	Madera	Servicio	Sobrecarga e impacto
42	13 septiembre 2017	Pichincha	Colapso parcial	Peatonal	Viga	Acero	Servicio	Sobrecarga e impacto
43	12 octubre 2017	Guayas	Colapso parcial	Peatonal	Armadura	Acero	Servicio	Sobrecarga e impacto
44	23 noviembre 2017	Guayas	Colapso parcial	Peatonal	Viga	Acero	Servicio	Sobrecarga e impacto
45	8 febrero 2018	Los Ríos	Colapso total	Carrozable	Bailey	Acero	Servicio	Sobrecarga e impacto
46	29 marzo 2018	Imbabura	Colapso total	Carrozable	Bailey	Acero	Servicio	Crecientes y avalanchas
47	5 abril 2018	El Oro	Colapso total	Carrozable	Bailey	Acero	Servicio	Sobrecarga e impacto
48	16 junio 2018	Pichincha	Colapso total	Carrozable	Viga	Hormigón	Servicio	Socavación

49	8 agosto 2018	Guayas	Colapso total	Peatonal	Viga	Hormigón	Servicio	Sobrecarga e impacto
50	25 octubre 2018	Zamora Chinchipe	Colapso total	Carrozable	Viga	Hormigón	Servicio	Socavación
51	28 febrero 2019	Manabí	Colapso parcial	Carrozable	Colgante	Madera	Servicio	Socavación
52	12 marzo 2019	Pichincha	Colapso parcial	Peatonal	Viga	Acero	Servicio	Crecientes y avalanchas
53	26 mayo 2019	Azuay	Colapso parcial	Carrozable	Viga	Hormigón	Servicio	Sismos
54	20 junio 2019	Napo	Colapso parcial	Carrozable	Viga	Hormigón	Servicio	Crecientes y avalanchas
55	20 octubre 2019	Esmeraldas	Colapso parcial	Carrozable	Bailey	Acero	Servicio	Falta de mantenimiento
56	2 diciembre 2019	Guayas	Colapso total	Peatonal	Bailey	Acero	Servicio	Sobrecarga e impacto
57	22 enero 2020	Azuay	Colapso total	Peatonal	Viga	Acero	Servicio	Sobrecarga e impacto
58	23 abril 2020	Guayas	Colapso total	Carrozable	Arco	Acero	Servicio	Sobrecarga e impacto
59	21 junio 2020	Morona Santiago	Colapso parcial	Carrozable	Atirantado	Hormigón	Servicio	Crecientes y avalanchas
60	17 octubre 2020	Zamora Chinchipe	Colapso total	Carrozable	Bailey	Acero	Servicio	Sobrecarga e impacto
61	22 octubre 2020	Napo	Colapso total	Carrozable	Viga	Hormigón	Servicio	Socavación
62	4 diciembre 2020	Zamora Chinchipe	Colapso total	Carrozable	Viga	Madera	Servicio	Crecientes y avalanchas
63	21 abril 2021	Pichincha	Colapso parcial	Peatonal	Viga	Acero	Servicio	Sobrecarga e impacto
64	19 mayo 2021	Napo	Colapso parcial	Carreteros	Viga	Acero	Servicio	Socavación
65	14 octubre 2021	Manabí	Colapso total	Carrozable	Viga	Hormigón	Servicio	Falta de mantenimiento
66	1 noviembre 2021	Morona Santiago	Colapso total	Carreteros	Colgante	Acero	Servicio	Falta de mantenimiento
67	8 enero 2022	Guayas	Colapso parcial	Peatonal	Armadura	Acero	Servicio	Falta de mantenimiento
68	21 febrero 2022	Azuay	Colapso total	Carrozable	Viga	Hormigón	Servicio	Socavación
69	8 marzo 2022	Guayas	Colapso parcial	Carrozable	Viga	Hormigón	Servicio	Socavación
70	20 marzo 2022	Pastaza	Colapso parcial	Carrozable	Colgante	Acero	Servicio	Falta de mantenimiento
71	17 abril 2022	Pichincha	Colapso total	Carrozable	Losa	Hormigón	Servicio	Crecientes y avalanchas
72	5 julio 2022	Carchi	Colapso parcial	Carrozable	Colgante	Acero	Servicio	Crecientes y avalanchas

Fuente: Elaboración propia.

Resultados

Los resultados presentados en este documento incluyen discusiones sobre los acontecimientos de las fallas, las causas generales y las causas principales del colapsos de los puentes.

Acontecimiento de los colapsos

La investigación realizada reveló que al menos 72 puentes de diversos tipos colapsaron en los últimos 23 años (2000-2023) en Ecuador. La Tabla 2 muestra las ocurrencias de fallas de nueve tipos de puentes registrados en el estudio, en donde 34 casos (47.2%) corresponden a puentes de hormigón, 29 casos (40.3%) corresponden a puentes de acero y 9 casos (12.5%) son puentes de madera. El tipo más representativo de puente colapsado son las estructuras tipo viga (hormigón, acero y madera), con 39 ocurrencias (54.2%). Tenga en cuenta que estos puentes fallidos constituyen más de la mitad de puentes analizados en esta investigación. Los siguientes casos significativos involucran fallas de puentes tipo colgantes, tipo losa de hormigón y tipo Bailey, con 11 casos (15.3%) para los puentes colgantes y 7 casos (9.7%) tanto para puentes tipo losa de hormigón y tipo Bailey. Además, en la investigación también se identifica las fallas de acuerdo al uso del puente, obteniendo que el 82% (59 fallas) corresponden a puentes carrozables y el 18% (13 fallas) corresponden a puentes peatonales.

Tabla 2

Tipo y número puentes colapsados

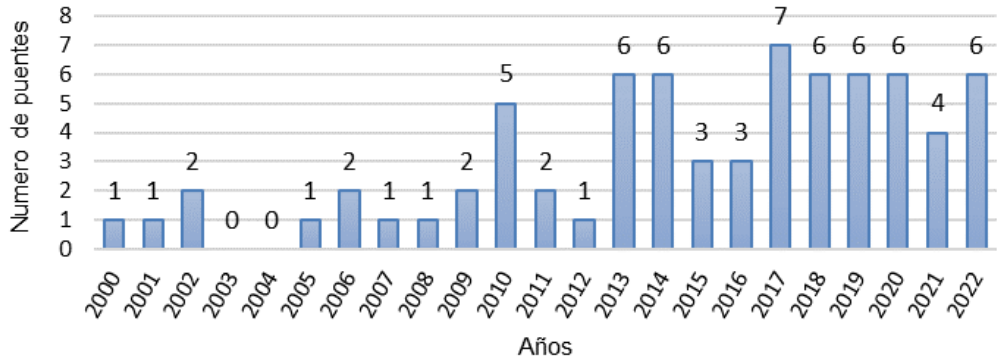
Tipo de puente	Material	Número de fallas	%
Alcantarilla	Hormigón	1	1.39%
Arco	Acero	2	2.78%
Armadura	Acero	3	4.17%
Atirantado	Hormigón	1	1.39%
Bailey	Acero	7	9.72%
Colgante	Acero	6	8.33%
	Madera	5	6.94%
Losa	Hormigón	7	9.72%
Viga	Hormigón	24	33.33%
	Acero	11	15.28%
	Madera	4	5.56%
Viga-cajón	Hormigón	1	1.39%
Total		72	100%

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3 se muestra un gráfico de barras que representa el número de puentes que colapsaron distribuidos por el año en que ocurrieron las fallas. De un total de 72 puentes analizados durante el periodo de estudio (23 años), solamente en la segunda mitad del periodo, es decir, en los últimos 11 años, 54 puentes colapsaron, lo que equivale al 75% del total de casos estudiados. Además, se observa que para los años 2003 y 2004 no se obtuvo información sobre puentes que colapsaron en el Ecuador. En la Figura 4 se muestra un gráfico del porcentaje de casos distribuidos por intervalos de tiempo. El número de colapsos de puentes en estos últimos años es relativamente grande en comparación al número de casos registrados en los primeros años de esta investigación. Una posible explicación es el gran avance tecnológico en la difusión de información que no existían en el pasado. La mayor parte de los datos de este estudio fue obtenida de información divulgada Internet.

Figura 3

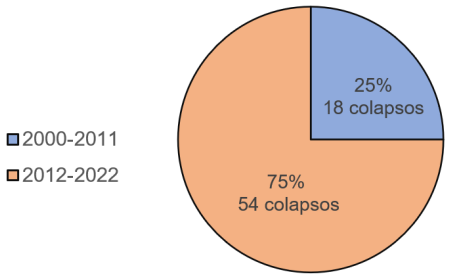
Número de puentes que colapsaron distribuidos por año (2000-2022)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4

Distribución de fallas en dos intervalos de tiempo, 2000-2011 y 2012-2022



Fuente: Elaboración propia.

Los tipos de colapsos y la fase en la que se produjeron estas fallas se muestran en la Tabla 3 El número de fallas que ocurrieron durante la vida útil de los puentes (66 casos) es mucho mayor que los colapsos ocurridos durante la construcción (6 casos). Esto ocurre para la mayoría de las obras de ingeniería civil, incluidos los puentes, los cuales en Ecuador se diseñan con una vida útil mínima de 50. Además, la duración de la vida útil es mucho mayor que la de la construcción de puentes.

En la Tabla 3 también se indica el número de fallas clasificados por el tipo de colapso, 33 casos (46%) corresponden a fallas de colapso parcial y 39 casos (54%) son puentes que colapsaron en su totalidad.

De la información recopilada en el inventario, se realizó también la distribución de los puentes colapsados por provincia donde ocurrieron los eventos, Tabla 4. En cuanto al número de puentes que fallaron, la provincia con mayor número de colapsos es Guayas, con 13 casos de fallas. La provincia de Pichincha ocupa el segundo lugar, con 10 colapsos, seguido por un la provincia de Zamora Chinchipe con 8 casos.

Tabla 3

Número de fallas con respecto al tipo de colapso y fase de ocurrencia

Tipo de colapso	Construcción	Servicio
Colapso parcial	2	31
Colapso total	4	35
Total	6	66

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4

Número de colapsos por provincia del Ecuador

Provincia	Número de colapsos	%
Azuay	4	5.56%
Bolívar	1	1.39%
Cañar	1	1.39%
Carchi	1	1.39%
Chimborazo	2	2.78%
Cotopaxi	0	0.00%
El Oro	2	2.78%

Esmeraldas	1	1.39%
Galápagos	0	0.00%
Guayas	13	18.06%
Imbabura	1	1.39%
Loja	0	0.00%
Los Ríos	5	6.94%
Manabí	8	11.11%
Morona Santiago	3	4.17%
Napo	5	6.94%
Orellana	0	0.00%
Pastaza	3	4.17%
Pichincha	10	13.89%
Santa Elena	0	0.00%
Santo Domingo de los Tsáchilas	0	0.00%
Sucumbíos	1	1.39%
Tungurahua	3	4.17%
Zamora Chinchipe	8	11.11%
Total	72	100%

Fuente: Elaboración propia.

Causas generales de los colapsos

Como se mencionó anteriormente, las causas de las fallas de los puentes se clasifican en dos grupos, causas originadas por factores naturales y causas originadas por factores humanos, como se muestra en la Tabla 5. Dentro de los factores naturales están los eventos catastróficos, por ejemplo, inundaciones, deslizamientos de tierra, flujo de escombros, socavaciones y terremotos, que a menudo son inevitables y causan graves daños a cualquier tipo de estructuras, en este caso los puentes. Además de los factores naturales, los factores humanos, que contempla; el diseño y el método de construcción defectuosos, impactos, sobrecargas, falta de inspección y mantenimiento, etc., también pueden provocar el colapso de puentes. La Tabla 5. revela que el número de casos relacionados con causas por factores naturales y factores humanos es el mismo, 36 (50%) colapsos para cada categoría. En el siguiente apartado se detallan las causas principales o específicas del colapso de los 72 puentes analizados en esta investigación.

Tabla 5

Número de fallas clasificados por la causa general de colapso

Causas de las fallas	Número de colapsos	%
Factores naturales	36	50%

Factores humanos	36	50%
Total	72	100%

Fuente: Elaboración propia.

Causas principales de los colapsos

Del inventario realizado con información de 72 fallas en puentes registrados en el periodo comprendido desde el año 2000 hasta el año 2022 en Ecuador, siete causas principales fueron determinadas, como se resume en la Tabla 6. Se encontró que las principales causas de colapso son crecientes y avalanchas, sobrecarga e impacto y socavación.

Tabla 6

Principales causas del colapso de puentes en Ecuador

Causas principales de colapso	Número de fallas	%
Crecientes y avalanchas	21	29.17%
Deficiencia en la construcción y fiscalización	3	4.17%
Deficiencia estructural y de diseño	6	8.33%
Falta de mantenimiento	9	12.50%
Sismos	3	4.17%
Sobrecarga e impacto	18	25.00%
Socavación	12	16.67%
Total	72	100%

Fuente: Elaboración propia.

- Deficiencia en la construcción y fiscalización

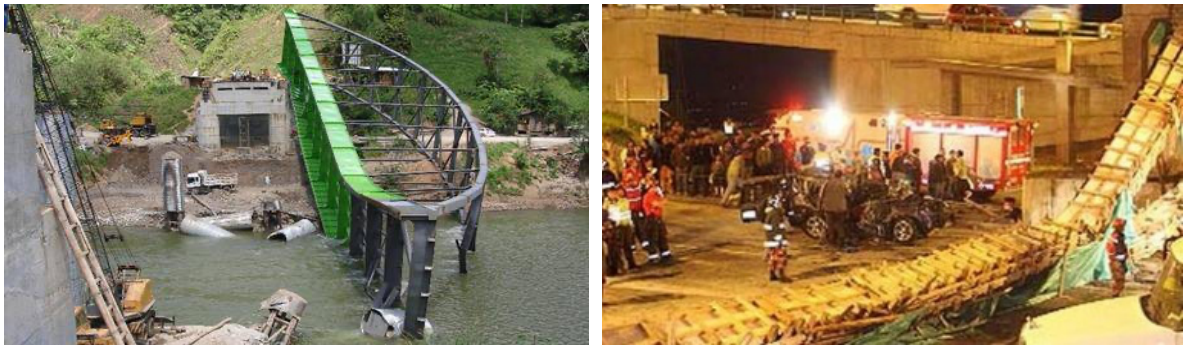
En muchos casos, los errores derivados de un mal proceso de construcción, relacionado con factores entre los que se destacan: poca capacidad para soportar el propio peso de la estructura en el proceso de montaje, fallas en los componentes de encofrado en la fundición, falta de capacidad de anclajes, uso deliberado de materiales de mala calidad, entre otros, pueden provocar el colapso del puente en la fase de construcción. (Abdelhamid & Everett, 2000; Mitropoulos et al., 2005).

De todos los casos estudiados, 3 (4.2%) puentes colapsaron durante su proceso constructivo, principalmente debido a una mala planificación y métodos inadecuado para la construcción. Por ejemplo, el colapso de un puente carrozable metálico tipo arco en Zamora Chinchipe en 2010 se debió a la falla de dos gatos hidráulicos que soportaban la estructura de 260 toneladas en el proceso de montaje del puente, dejando una víctima mortal (El Comercio, 2010). Otro

caso de falla de puente durante la construcción sucedió en 2011 en la ciudad de Quito provincia de Pichincha, en este caso un puente peatonal de hormigón se desplomó debido a un mal sistema de encofrado, el cual al momento de verter el concreto cedió causando que el tablero se diera la vuelta y se desplomara cayendo sobre un auto y provocando la muerte de dos personas (El Comercio, 2011). En la Figura 5 se muestran imágenes de estos puentes que fallaron por deficiencia en la construcción y fiscalización. Por lo tanto, se debe dar y exigir un control estricto del procedimiento constructivo en cada una de sus fases y una adecuada supervisión para reducir efectivamente la ocurrencia de este tipo de fallas. También existen deficiencias en la fiscalización y supervisión en la construcción de los puentes, ya que los profesionales designados a esta tarea, en muchos casos no cuentan con la experiencia necesaria para encontrar, controlar y corregir errores en la fase constructiva.

Figura 5

Colapso de puentes durante el proceso constructivo a) Puente metálico, tipo arco Zamora Chinchipe. b) Puente peatonal, Pichincha



a) b)

Fuente: Diario el Universo y Diario el Comercio

- Deficiencia estructural y diseño

Cinco puentes carrozables y un puente peatonal colapsaron debido a problemas de deficiencia estructural y diseño, que corresponde al 8.3% de todos los casos de estudio. La mayoría de los puentes fueron de hormigón y tres casos ocurrieron durante la fase de construcción y otros tres durante su funcionamiento. En la Figura 6 se presentan fotografías de dos puentes que colapsaron por deficiencia estructural y diseño. Al realizar la evaluación y análisis de los casos de colapsos se puedieron identificar los siguientes problemas estructurales:

- Muchos de los puentes presentaron fisuras y grietas debido a un incremento de carga que no estaba considerado en el diseño.

- En algunos puentes colapsados se encontró que sobrepasaron la capacidad de carga o resistencia, debido al mal dimensionamiento de la sección transversal del puente y en otros casos por la ausencia de pilares intermedios.
- Estudios geotécnicos y de mecánica de suelos mal ejecutados, generando diseños de cimentaciones deficientes.
- Modelado estructural incompleto que no incluyen los parámetros mínimos para un correcto análisis y diseño en puentes de hormigón preesforzado.
- En puentes construidos de acero, no se cumple con las relaciones ancho espesor de los elementos principales, generando una inestabilidad lateral de la estructura.
- Análisis y diseño deficiente de las conexiones en puentes de acero, en algunos casos en el diseño no toman en cuenta las uniones y cálculo de soldadura.

Figura 6

Colapso de puentes causados por deficiencia estructural y diseño en Ecuador

Fuente: Diario el Universo

- Socavación

En términos generales, la socavación de un puente consta de tres tipos principales: socavación general, socavación por contracción y socavación local. La socavación general puede ocurrir en un tramo de río lejos de las estructuras locales. Ocurre principalmente debido al arrastre de sedimentos desde el lecho cuando la capacidad de transporte de sedimentos excede la carga de sedimentos entrantes aguas arriba. En contraste con la socavación general, la socavación localizada, incluyendo la socavación por contracción y la socavación local, es atribuible a la existencia de la estructura del puente. La socavación por contracción también puede ser causada por un estrechamiento natural del canal de la corriente. A medida que el flujo se acerca al puente, se contrae dentro de la abertura del puente y se acelera debido a la sección estrecha entre las pilas y los estribos. El flujo se desacelera después de pasar por la contracción y se expande de nuevo al ancho total del río

aguas abajo. Esta socavación localizada se conoce como socavación por contracción. Interferida por el pilar del puente, la socavación local se caracteriza por la formación de agujeros de socavación alrededor del pilar (J.-Y. Lu et al., 2008).

De acuerdo al estudio realizado por (Lin et al., 2014) los modos de falla de puentes causados por socavación se pueden clasificar en cuatro tipos: falla vertical, falla lateral, falla torsional y falla del tablero del puente. La vertical causada socavación se atribuye a una combinación de factores tales como capacidad inadecuada del suelo e inestabilidad de los pilotes. La falla lateral se genera de las siguientes maneras: falla por empuje de pilas, formación de rótulas estructurales en pilotes, falla por desprendimiento de cimientos y movimiento lateral excesivo de pilas o cimientos. La falla torsional se refiere a la falla de estructuras o componentes estructurales atacados por flujos sesgados o asimétricos. La falla del tablero del puente, puede ocurrir cuando la fuerza externa inducida por la inundación es lo suficientemente grande como para superar la fuerza de gravedad de la plataforma del puente y las fuerzas de restricción del soporte (Lin et al., 2014), éste último se describe dentro de las causas de colapsos por de crecientes y avalanchas.

El 12 % de los puentes evaluados en este documento fallaron por socavación de la cimentación (estribos/pilas), de los 12 puentes que colapsaron, 10 fueron de hormigón, 1 de acero y 1 de madera, cabe mencionar que todos los puentes eran carrozables y se encontraban en servicio. También es importante destacar que todos los casos de falla por socavación registrados son a partir del año 2014, y la mayoría de los puentes afectados fueron construidos hace más de veinte años, lo que deja en evidencia que el criterio principal de diseño de la cimentación se enfocaba solo a cumplir con su capacidad portante y no se contemplaba en su fase de diseño un análisis hidráulico que incluya los efectos de la erosión y la socavación. La Figura 7 presenta casos de puentes que fallaron por el fenómeno de socavación. El lugar escogido para la construcción en la mayoría de los casos es seleccionado según el diseño geométrico de la vía sin tener en cuenta la importancia de realizar un estudio hidráulico-hidrológico, que evalúen las características y condiciones del cauce del rio.

Figura 7

Puentes colapsados por socavación

Fuente: Diario el Universo

- Sobrecarga e impacto

Sobrecarga

La sobrecarga de vehículos se ha vuelto cada vez más común debido al aumento de la demanda de tráfico, acelerando el deterioro de los pavimentos, provocando daños a los componentes del puente e incluso causando el colapso repentino de la estructura en algunos casos extremos. Es más probable que ocurra un colapso de un puente por sobrecarga en puentes tipo viga y tipo losa, ya que la carga de tráfico representa una parte importante de la carga total en este tipo de puentes, mientras que este no es el caso de los puentes luces grandes (Deng et al., 2016). Muchos investigadores han realizado ensayos en puentes que se encuentran fuera de servicio, en donde se han encontrado tres modos principales de falla en los tableros de los puentes: falla por corte (Bergström et al., 2009), falla por flexión ((Zhang et al., 2013)) y falla plástica (Wang et al., 2011).

La aplicación de normas que evalúen el peso de los vehículos es una manera eficaz de disminuir el daño por fatiga inducido por la sobrecarga y el colapso de los puentes. En Ecuador las cargas de diseño para puentes han cambiado al pasar de los años, pero el motivo no es el cambio real de las cargas vehiculares del país, sino de la evolución y adaptación de la normativa para puentes de Estados Unidos (AASHTO), Tabla 7.

Tabla 7

Evolución de las cargas de diseño de puentes en Ecuador

Carga de diseño (Camión)	Periodo de aplicación	Institución
HS 15-44	Hasta 1950	AASHTO
H 20-44	1951-1962	AASHTO
HS 20-44	1962-1999	AASHTO
HS-MOP	2000-2009	MOP
HL-93	2010-hasta la fecha	AASHTO

Fuente: Elaboración propia, basado de Muñoz et al. (2009)

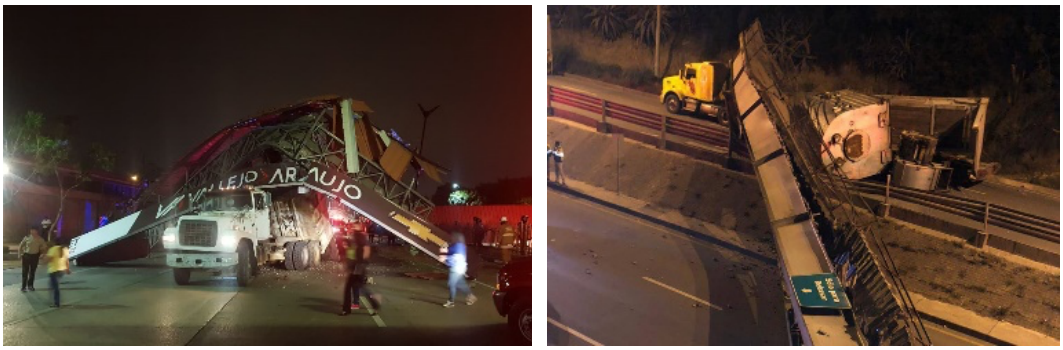
Impacto

El impacto contra puentes no solo causa daños graves a sus componentes estructurales, sino que también en algunos casos puede provocar el colapso de los mismos. Algunos investigadores han estudiado los mecanismos de colapso progresivo de puentes debido a la pérdida accidental de soportes para puentes tipo viga provocado por el impacto. Por ejemplo, en Estados Unidos, (Lu & Zhang, 2013) estudiaron el proceso de falla del puente de Jiujiang debido al impacto de una embarcación y señalaron que la falla progresiva de tres tramos consecutivos resultó de la separación de los elementos estructurales y la fuerza centrífuga de la caída del tablero del puente.

El porcentaje de puentes colapsados por sobrecarga e impacto es considerable (25%), ya que es la segunda causa de falla con más puentes colapsados (18) en esta investigación. La mayoría de los casos se han presentado en puentes construidos de acero (14 puentes), afectando directamente los elementos principales de la estructura y su estabilidad. También se determinó que el 50% de los puentes corresponden a puentes peatonales y el otro 50% son puentes carrozables. En el caso de los puentes peatonales colapsados por impacto, el motivo principal del colapso es porque los camiones presentan una altura superior al gálibo máximo de la estructura. También se registraron casos de puentes peatonales que fallaron por sobrecarga de personas, este es el caso de un puente colgante de madera en la provincia de Manabí en 2017 que colapsó cuando alrededor de 150 personas se encontraban sobre la estructura. La Figura 8 presenta algunos casos de puentes colapsados por sobrecarga e impacto.

Figura 8

Puentes colapsados por sobrecarga e impacto



Fuente: Diario el Universo y MTOP

- Crecientes y avalanchas

Las fuertes precipitaciones suelen provocar inundaciones, que pueden inducir fenómenos como socavación, erosión, convergencia de ríos, desbordamiento o salto hidráulico inducido por obras de protección, lecho rocoso ablandado, remoción de arena, impacto de escombros, profundidad de empotramiento insuficiente o abrasión en los cimientos de puentes, etc. (Helsin et al., 2014; Jian-Hao et al., 2012; Witzany et al., 2008).

El caso del transporte carretero es extremadamente importante, tanto porque el monto de sus daños es elevado como por sus efectos sobre otros sectores. Los caminos y puentes han sido diseñados empleando criterios hidrológicos desactualizados, que no toman en cuenta que las precipitaciones y crecidas de El Niño no son tan extraordinarias, y en muchas instancias han servido como barreras al libre flujo del agua hacia el mar, acentuando con ello los daños. Será preciso revisar las normas de diseño, desde el punto de vista hidrometeorológico, para los caminos, puentes y obras de drenaje, lo mismo que adoptar trazados menos vulnerables ante inundaciones y avalanchas (Corporación Andina de Fomento, 2000).

De acuerdo a la investigación realizada por (Durán Yazuna & Quisphe Coro, 2009) en donde se realiza un inventario de puentes de hormigón colapsados en los años 1982-1983 y 1997-1998 por causa del fenómeno del Niño, alrededor de 100 puentes resultaron afectados y más de 50 puentes colapsaron.

Cada año durante la temporada de invierno se presentan derrumbos y deslizamientos a lo largo de las vías en el país y en muchos casos conlleva colapsos de los puentes.

En este estudio las crecientes de ríos y avalanchas o deslizamientos de tierra provocadas por las fuertes lluvias es la causa principal del colapso de los puentes en el Ecuador. 21 puentes de los 70 analizados durante el periodo 2000-2022 fallaron debido a esta causa, lo que representa casi el 30% de todas los colapsos ocurridos.

Todos los puentes afectados se encontraban en servicio y más del 90% de ellos eran de uso carrozable y el 62% fueron puentes tipo viga. 57% de los casos corresponde a puentes de hormigón, 29% fueron de acero y 14% de madera. La Figura 9 presenta ejemplos de puentes que colapsaron debido a las crecientes y avalanchas.

Figura 9

Ejemplos de puentes que colapsaron por crecientes y avalanchas

Fuente: Diario el Universo y Diario el Comercio

- Sismos

El movimiento y la ruptura del suelo, principales efectos originados por los temblores y terremotos, pueden tener impactos significativos en la estabilidad y seguridad de cualquier estructura. Los tableros, los apoyos y los soportes de los puentes (estribos, pilas y columnas) son los elementos más vulnerables de la estructura cuando se presentan eventos símicos. Los

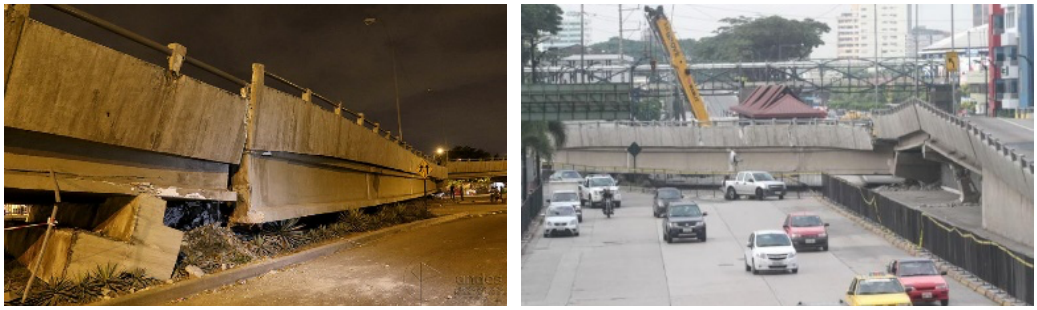
grandes movimientos horizontales del suelo durante un terremoto, provocan en muchos casos que el tablero de puentes simplemente apoyados, se caiga o deslice fuera de los estribos, además de provocar impactos entre los tramos adyacentes y el estribo, lo que puede dar lugar a los siguientes problemas; caída o falla por corte de los cojinetes o apoyos elastómeros y falla de pared posterior de los estribos (Pan et al., 2010; Saadeghvaziri & Yazdani-Motlagh, 2008).

El Ecuador por su ubicación geográfica es un país altamente susceptible a los sismos y/o terremotos. El 16 de abril de 2016, el Ecuador vivió el peor terremoto en las últimas décadas, que tuvo una magnitud de momento de 7.8 (Mw), cuyo epicentro se ubicó en la costa de Pedernales, a 20 Km de profundidad dejando 670 fallecidos y miles de afectados. El terremoto ocasionó graves daños, con características distintivas en el ámbito de la infraestructura del transporte, estando presentes en casi todos los tipos de infraestructuras (aeropuertos, puertos, carreteras y puentes). Un total de 65 kilómetros de vía afectados, las principales afectaciones fueron hundimientos profundos, grietas longitudinales medianas y profundas, pérdidas de la estructura vial, desprendimiento de las cunetas y aceras, y desestabilización de taludes. También se identificaron daños considerables en 7 puentes (MTOP, 2018).

La investigación encontró que solo el 4% de los puentes analizados colapsaron por cusas sísmicas, es decir, solo 3 de los 72 puentes evaluados, todos los puentes fueron carrozables de hormigón armado tipo viga. El caso más representativo es el colapso del puente ubicado sobre la avenida de las Américas en Guayaquil construido en el año 1982, en el cual sus pilas fallaron en respuesta a la carga dinámica que se generó durante el sismo de 2016, véase Figura 10.

Figura 10

Puente colapsado en Guayaquil por el terremoto de 2016



Fuente: Diario el Comercio

- Falta de mantenimiento

Todos las estructuras que se encuentran en funcionamiento, especialmente los puentes, experimentan un deterioro progresivo debido a la influencia directa del medio ambiente y las cargas vivas que actúan sobre ellos, que, al superar un cierto nivel de umbral, puede causar problemas graves en la estructura o incluso el colapso. El mecanismo de deterioro está influenciado por varios factores, incluidas las propiedades de los materiales y los factores de estrés mecánicos y ambientales (Kim et al., 2013). Un buen plan de control y mantenimiento que incluya inspecciones periódicas y una correcta rehabilitación retrasará el proceso de desgaste y deterioro de la estructura y ayudará a identificar posibles problemas estructurales que puedan causar algún desastre en el futuro. Se registraron 9 casos de puentes que colapsaron por falta de mantenimiento, de los cuales 6 fueron de acero, 1 de hormigón y 2 de madera, la mayoría de fallas se presentaron en puentes colgantes y tipo viga de acero que presentaron problemas de corrosión en sus elementos y uniones.

Conclusiones

El estudio de 72 puentes que colapsaron en los últimos 23 años en Ecuador (2000-2022) reveló que el 47% de los puentes que fallaron son puentes de acero, los puentes de hormigón también representan un porcentaje significativo con el 40%, mientras que los puentes de madera solo abarcan el 13% de todos los puentes estudiados. En la investigación se evaluaron 59 puentes carrozables (82%) y 13 puentes peatonales (18%). De acuerdo al tipo de puente se encontró que los colapsos de puentes tipo viga comprenden más del 50% de todas las fallas, seguido por los puentes tipo colgantes con el 15% y los puentes tipo losa y Bailey con el 10% de todos los puentes, lo que refleja que en Ecuador los puentes que más se construyen son los puentes tipo viga.

El estudio también muestra que las fallas ocurrieron principalmente durante la etapa de servicio de los puentes, esto es de esperar, debido a que el número de puentes durante la etapa de servicio es mayor que el número de puentes que se construyen, además, el tiempo de vida útil de un puente es generalmente mayor que el de la construcción. Los registros indican que las provincias de Guayas y Pichincha ocupan los primeros lugares en términos de ocurrencia de fallas. Los eventos externos inducidos por la naturaleza que incluyen crecientes de ríos, avalanchas, socavaciones y sismos representan el 50% de todas las fallas y el 50% restante fueron causados por eventos externos inducidos por el hombre que abarca colapsos por deficiencia estructural y diseño, deficiencia en la construcción y fiscalización, sobrecargas, impactos y falta de mantenimiento.

Las causas más representativas fueron las producidas por eventos hidrológicos e hidráulicos como son las crecientes de ríos, avalanchas y socavación con un 46% de todos los colapsos, esto se debe a que Ecuador por su ubicación geográfica presenta fuertes temporadas de lluvia

alcanzando precipitaciones anuales superiores a los 2.000 mm. Otro factor de gran importancia en el colapso de los puentes en Ecuador es la sobrecarga e impacto con el 25% de las causas analizadas. Dentro de las fallas provocadas por el impacto de la estructura se determinó que el motivo principal del colapso es porque los vehículos de transporte pesado presentan una altura mayor al gálibo máximo permitido. El porcentaje de colapsos de puentes en estos últimos años es relativamente grande en comparación al porcentaje de casos registrados en los primeros años de este estudio, 75% y 25% respectivamente. Una posible explicación es el gran avance tecnológico en la difusión de información que no existían en el pasado.

En base a los resultados obtenidos en este estudio y encontrando que las causas principales del colapso de los puentes en Ecuador están relacionadas con eventos externos debidos a las fuertes precipitaciones que provocan crecientes de ríos, deslizamientos y socavación, se requiere por parte de las instituciones y entidades encargadas de la administración de la infraestructura vial del país, efectuar una evaluación general de los efectos que generan estos fenómenos en los puentes más vulnerables ubicados en los ríos con los mayores caudales y con una alta probabilidad de sufrir estos eventos. Además, se deben exigir realizar estudios hidrológicos-hidráulicos detallados y sustentados técnicamente. Las entidades del estado son las responsables de implementar medidas de prevención y corrección, mediante programas de control, mantenimiento y conservación de las estructuras, derivando en la creación de sistemas de planificación y gestión de puentes.

La sobrecarga e impacto son otros de los problemas con mayor impacto en el colapso de los puentes, debido a esto, se ve la necesidad de establecer un procedimiento eficaz del control de alturas y pesos de los camiones de transporte pesado para evitar sobrecargas e impactos que pueden ocasionar el colapso de las estructuras.

De acuerdo a todas las deficiencias encontradas en esta investigación, se propone investigar y profundizar los siguientes temas:

- Metodología de inspección y evaluación mediante criterios de confiabilidad estructural de puentes existentes.
- Diseño estructural y evaluación detallada de los efectos de fatiga en puentes de acero debido a condiciones de cargas dinámicas.
- Evaluación de fisuras y grietas mediante el diseño y ejecución de pruebas de carga.
- Revisión de las cargas de diseño para la construcción de futuros puentes.

Referencias bibliográficas

Abdelhamid, T. S., & Everett, J. G. (2000). Identifying Root Causes of Construction Accidents. *Journal of Construction Engineering and Management*, *126*(1), 52–60. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2000)126:1(52)

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASTHO). (1999). *Federal codes of regulations: revised as of April 1, 1999, Washington, DC.*

Appalto, D., & Demolizione, D. I. (2019). *RELAZIONE UNICA SULLA PROCEDURA DI AGGIUDICAZIONE*. *10*.

Barros, J. G., Troncoso, A. Y. (2010). *Atlas climatológico del Ecuador*. Escuela Politécnica Nacional. Quito; Ecuador.

Bergström, M., Täljsten, B., & Carolin, A. (2009). Failure Load Test of a CFRP Strengthened Railway Bridge in Örnsköldsvik, Sweden. *Journal of Bridge Engineering*, *14*(5), 300–308. https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000005

Corporación Andina de Fomento. (2000). El fenómeno El Niño 1997-1998. Memoria, retos y soluciones. Ecuador. *Prevención y Mitigación de Desastres Naturales*, 305 pp. http://dipecholac.net/docs/files/995-publicacion-caf-ecuador-nino-97-98.pdf

Deng, L., Wang, W., & Yu, Y. (2016). State-of-the-Art Review on the Causes and Mechanisms of Bridge Collapse. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, *30*(2). https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000731

Durán Yazuna, S. V., & Quisphe Coro, C. (2009). *Reparación de puentes de hormigón colapsados, mediante la instalación de sistemas estructurales de acero*. 318. http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1462

El Comercio. (2010, July 24). Un puente de metal se cayó en Zamora. *El Comercio*. https://www.elcomercio.com/actualidad/ecuador/puente-metal-cayo-zamora.html

El Comercio. (2011, June 11). Un puente cayó y mató a dos personas. *El Comercio*. https://www.elcomercio.com/actualidad/quito/puente-cayo-y-mato-a.html

Estes, A. C., & Frangopol, D. M. (2001). Bridge Lifetime System Reliability under Multiple Limit States. *Journal of Bridge Engineering*, *6*(6), 523–528. https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0702(2001)6:6(523)

Helsin, W., Shih-Chun, H., Cheng, L., & Chung-Yue, W. (2014). Forensic Diagnosis on Flood-Induced Bridge Failure. I: Determination of the Possible Causes of Failure. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, *28*(1), 76–84. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000419

Jian-Hao, H., Yee-Meng, C., Jau-Yau, L., Jihn-Sung, L., & Yung-Bin, L. (2012). Houfeng Bridge Failure in Taiwan. *Journal of Hydraulic Engineering*, *138*(2), 186–198. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000430

Kim, S., Frangopol, D. M., & Soliman, M. (2013). Generalized Probabilistic Framework for Optimum Inspection and Maintenance Planning. *Journal of Structural Engineering*, *139*(3), 435–447. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000676

Lin, C., Han, J., Bennett, C., & Parsons, R. L. (2014). Case history analysis of bridge failures due to scour. *Climatic Effects on Pavement and Geotechnical Infrastructure - Proceedings of the International Symposium of Climatic Effects on Pavement and Geotechnical Infrastructure 2013*, 204–216. https://doi.org/10.1061/9780784413326.021

Lu, J.-Y., Hong, J.-H., Su, C.-C., Wang, C.-Y., & Lai, J.-S. (2008). Field Measurements and Simulation of Bridge Scour Depth Variations during Floods. *Journal of Hydraulic Engineering*, *134*(6), 810–821. https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2008)134:6(810)

Lu, Y. E., & Zhang, L. M. (2013). Progressive collapse of a drilled-shaft bridge foundation under vessel impact. *Ocean Engineering*, *66*, 101–112. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.04.007

Mitropoulos, P., Abdelhamid, T. S., & Howell, G. A. (2005). Systems Model of Construction Accident Causation. *Journal of Construction Engineering and Management*, *131*(7), 816–825. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2005)131:7(816)

MTOP, (Ministerio de Transporte y Obras Publicas). (2018). *PROYECTO DE RECONSTRUCCIÓN DE OBRAS POR EL TERREMOTO 2016. CUP 175200000.0000.381287*.

Muñoz, E., Núñez, F., & Mohammadi, J. (2009). Investigation of Common Causes of Bridge Collapse in Colombia. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, *14*(4), 194–200. https://doi.org/10.1061/(asce)sc.1943-5576.0000006

Pan, Y., Agrawal, A. K., Ghosn, M., & Alampalli, S. (2010). Seismic Fragility of Multispan Simply Supported Steel Highway Bridges in New York State. II: Fragility Analysis, Fragility Curves, and Fragility Surfaces. *Journal of Bridge Engineering*, *15*(5), 462–472. https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000055

Rymsza, J. (2020). Causes of the morandi viaduct disaster in genoa as a contribution to the design of pre-stressed structures. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, *19*(1), 5–25. https://doi.org/10.7409//rabdim.020.001

Saadeghvaziri, M. A., & Yazdani-Motlagh, A. R. (2008). Seismic behavior and capacity/demand analyses of three multi-span simply supported bridges. *Engineering Structures*, *30*(1), 54–66. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.02.017

Sharma, S., & Mohan, S. B. (2011). Status of Bridge Failures in the United States (1800-2009). *Trb 2011*, 1–15.

Wang, F. M., Kang, S. Z., Cai, Y. C., & Li, X. L. (2011). *Destructive Test Study of a Prestressed Concrete Hollow Slab Beam Bridge*. 57–64. https://doi.org/10.1061/47625(404)8

Wardhana, K., Hadipriono, F. C., & Asce, F. (2003). *Analysis of Recent Bridge Failures in the United States*. *August*, 144–150.

Witzany, J., Cejka, T., & Zigler, R. (2008). Failure Resistance of Historic Stone Bridge Structure of Charles Bridge. II: Susceptibility to Floods. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, *22*(2), 83–91. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-

3828(2008)22:2(83)

Zhang, J., Peng, H., & Cai, C. S. (2013). Destructive Testing of a Decommissioned Reinforced Concrete Bridge. *Journal of Bridge Engineering*, *18*(6), 564–569. https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000408

Conflicto de intereses:
Los autores declaran que no existe conflicto de interés posible.
Financiamiento:
No existió asistencia financiera de partes externas al presente artículo.
Agradecimiento:
N/A
Nota:
El artículo no es producto de una publicación anterior, tesis, proyecto, etc.