

Hernán de Solminihac
Joaquín Dagá

Octubre, 2017

www.clapesuc.cl

Análisis de Resiliencia Estratégica de Puentes de la Ruta 5 entre Caldera y Pargua

Documento de Trabajo N° 38

Informe CLAPES UC
Análisis de Resiliencia Estratégica de Puentes de la Ruta 5 entre Caldera y Pargua
Hernán de Solminihac y Joaquín Dagá

Resumen

En el presente documento se analiza la resiliencia de los puentes de la Ruta 5 en su dimensión estratégica entre Caldera y Pargua. Para ello se evalúa la redundancia de puentes considerando las rutas alternativas existentes ante un eventual corte del puente debido a la ocurrencia de un evento natural. La metodología de evaluación de resiliencia consiste en contrastar la distancia y tiempo de viaje de la ruta alternativa óptima en cuanto a tiempo entre dos puntos A y B, cada uno ubicado a 20 km del puente en dirección contraria, con la distancia y tiempo de viaje entre A y B sin corte del puente. Se definió como puente crítico el que la distancia y tiempo de viaje entre A y B por la ruta alternativa óptima son mayores a 1,5 y 2,0 veces la distancia y tiempo base de viaje, respectivamente. Tras evaluar la redundancia de los 190 puentes de la Ruta 5 se obtuvo que 26 puentes son críticos bajo este criterio. Se proponen medidas para aumentar la resiliencia de la red vial en la zona de los puentes críticos de la Ruta 5. Se recomienda construir puentes alternativos a los puentes que presentan un alto aumento de distancia y tiempo de viaje ante un eventual corte (14 puentes). Además, se propone mejorar el estándar de caminos alternativos a los puentes con solo alto aumento de tiempo de viaje al utilizar la ruta alternativa (603 km).

Palabras Claves: Resiliencia, Redundancia, Puentes, Ruta 5.

Abstract

This paper analyzes the resilience of the Route 5 bridges in their strategic dimension between Caldera and Pargua. For this, the redundancy of bridges is evaluated considering the alternative routes existing before an eventual bridge cut due to the occurrence of a natural event. The resilience assessment methodology consists in comparing the distance and travel time of the optimal alternative route in terms of time between two points A and B, each located 20 km from the bridge in the opposite direction, with the distance and travel time between A and B without bridge cut. It was defined as a critical bridge that the distance and travel time between A and B by the optimal alternative route are greater than 1.5 and 2.0 times the base distance and travel time, respectively. After evaluating the redundancy of the 190 bridges of Route 5 it was obtained that 26 bridges are critical under this criterion. Measures are proposed to increase the resilience of the road network in the area of critical bridges of Route 5. It is recommended to build alternative bridges to bridges that present a high increase of distance and travel time before an eventual cut (14 bridges). In addition, it is proposed to improve the standard of alternative roads to bridges with only a high increase in travel time by using the alternative route (603 km).

Keywords: Resilience, Redundancy, Bridges, Route 5.

1. Introducción

La red vial es un elemento fundamental para el desarrollo sustentable del país, ya que ella otorga conectividad entre las distintas localidades del territorio, implicando una mayor competitividad del país y una mejor calidad de vida de la población. Dadas las características territoriales y geográficas del país, la red vial de Chile está constituida en una forma de espina de pescado, la cual consiste en una ruta estructurante longitudinal (Ruta 5) que une una serie de caminos secundarios transversales. Esta conformación de la red vial nacional hace que la Ruta 5 tome un rol protagónico en la conectividad del país. Así, un eventual corte o falla funcional en algún punto de esta ruta, como un puente, puede generar falta de conectividad y aislamiento de ciertas zonas del territorio nacional. En la Figura 1 se muestran las principales características de la Ruta 5 en el tramo Caldera-Pargua.

Los eventos naturales han causado frecuentes e importantes daños sobre la infraestructura vial nacional, interrumpiendo temporalmente la conectividad de algunos lugares del país. Entre 1980 y 2011, Chile tuvo en promedio pérdidas anuales de alrededor del 1,2% de su PIB debido a la ocurrencia de desastres naturales (UNISDR, 2015). Estas pérdidas son mayores a las de todos los países del Grupo de los 20 (G20¹) en este mismo tema. Tan solo los eventos hidrometeorológicos, asociados a inundaciones cíclicas de El Niño y La Niña, pueden reducir el crecimiento del PIB nacional hasta en un 0,19% y aumentar la inflación del país hasta en un 0,39%, debido a sus impactos en la infraestructura vial (Cashina, Mohaddesb y Raissi, 2015).

El terremoto y tsunami del 27 de febrero de 2010 generaron pérdidas de aproximadamente 30.000 millones de dólares, lo que equivale al 18% del PIB de Chile (Superintendencia de Valores y Seguros de Chile, 2012). El 5% de las pérdidas totales (1.458 millones de dólares) corresponden a daños en obras públicas. En cuanto a obras viales, el Ministerio de Obras Públicas (2012) destaca que el Terremoto 27-F generó daños en 1.554 km de caminos no concesionados y 92 km de calzadas de obras concesionadas. Además, afectó 210 puentes, perjudicando a más de 4.500 camiones de carga y más de 400.000 vehículos particulares.

La Ruta 5, al atravesar el país de norte a sur, se encuentra expuesta a distintas amenazas que pueden generar cortes temporales en su operación. El territorio chileno se encuentra ubicado en el Anillo de Fuego del Pacífico, región del planeta que concentra zonas importantes de subducción, generando así una alta actividad volcánica y sísmica. Esto se ve reflejado en que el 54% de la población nacional y el 12,9% de la superficie total del país se encuentra expuesta a las amenazas naturales anteriormente mencionadas, cifras que lo convierten en el país más expuesto a desastres naturales dentro de los miembros de la OCDE (Dilley *et al.*, 2015). A esto se debe agregar la exposición de los puentes de la Ruta

¹ Grupo de los 20 (países industrializados y emergentes): Alemania, Arabia Saudita, Argentina, Australia, Brasil, Canadá, China, Corea del Sur, Estados Unidos, Francia, India, Indonesia, Italia, Japón, México, Reino Unido, Rusia, Sudáfrica, Turquía y Unión Europea.

5 a eventos hidrometeorológicos, debido a los numerosos ríos, esteros y quebradas que cruzan la vía desde la Cordillera de los Andes hasta el mar.

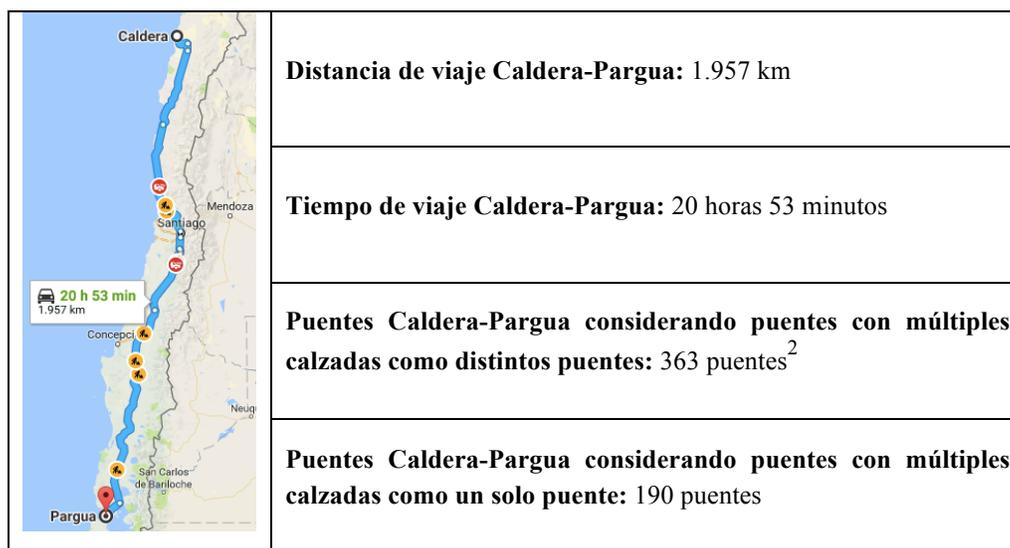


Figura 1. Características generales de la Ruta 5 en el tramo Caldera-Pargua

El concepto de resiliencia de la red vial está asociado a la capacidad que tiene el sistema de resistir, reponerse, recuperarse y superar situaciones adversas, como es el caso de la ocurrencia de eventos naturales. En este sentido, se debe destacar que la resiliencia puede ser abordada desde distintos enfoques dependiendo del sistema que se esté analizando. En el caso de la infraestructura vial, se puede evaluar la resiliencia de la red como sistema desde un punto de vista estratégico, considerando la redundancia, niveles de tránsito y la presencia de infraestructura crítica (hospitales, escuelas, etc.). También resulta posible analizar cómo se adaptan físicamente los distintos elementos de la red (puentes, secciones de caminos, taludes, etc.) ante la ocurrencia de un evento natural.

Considerando justamente la resiliencia de la infraestructura vial nacional de un punto de vista de estratégico a nivel de red, se identificó que actualmente existe una baja redundancia de puentes específicos de la Ruta 5. Una falla funcional de dichos puentes produce un significativo aumento de distancia de viaje para cruzar el cauce. A esto se debe agregar una menor velocidad de tránsito en las rutas alternativas debido al menor estándar de sus caminos asociados, lo que genera mayores tiempos y costos de viaje.

En la Figura 2 se puede observar un ejemplo de un puente de la Ruta 5 con baja redundancia, en que si falla dicha infraestructura, el usuario debe transitar por rutas alternativas de largas distancias.

² Información extraída del documento Red Vial Nacional: Dimensionamiento y Características (Ministerio de Obras Públicas, 2016a).

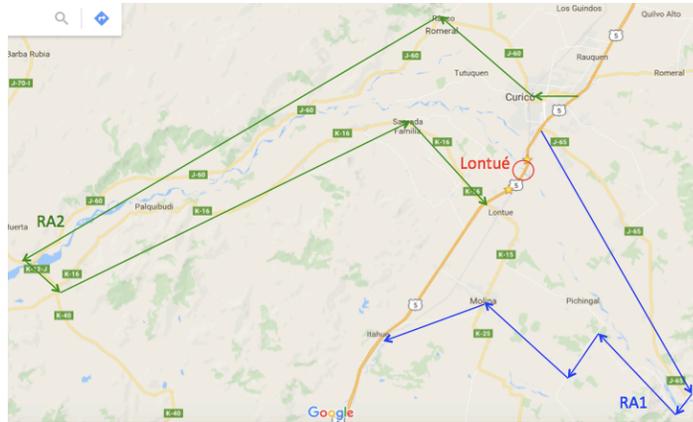


Figura 2. Baja redundancia en Puente Lontué de Ruta 5.

Un caso concreto fue lo que sucedió en el terremoto del 27 de febrero de 2010, cuando se dañaron los puentes que unen San Pedro de la Paz y Concepción en la Región del Bio-Bio. Los daños estructurales generó la necesidad de restringir el tránsito de camiones por estos puentes. Con este corte, los camiones debían cruzar el Río Bio-Bio por la Ruta 5 para viajar desde San Pedro de la Paz, lo que implica que el viaje entre estas dos localidades demore 2 horas 20 minutos. Sin embargo, al considerar las deficientes condiciones de la red vial asociadas a la emergencia, el tiempo de viaje real entre estos dos puntos tras el terremoto fue de 5 horas aproximadamente. En condiciones normales de operación (sin desastre natural), este trayecto tiene un tiempo de viaje de 14 minutos según estimaciones en Google Maps. Junto a esto, la distancia de viaje entre San Pedro de la Paz y Concepción aumentó de 6,9 km en condiciones normales a 259,0 km al usar la ruta alternativa mencionada.

Esto motivó al Centro Latinoamericano de Políticas Económicas y Sociales de la Pontificia Universidad Católica de Chile (CLAPES UC) a estudiar la resiliencia de la Ruta 5 específicamente respecto a la redundancia de sus puentes y viaductos ubicados entre Caldera y Pargua.

El objetivo del presente informe es identificar los puentes críticos de la Ruta 5 en cuanto a su baja redundancia y altos aumentos de distancia y tiempo de viaje al ocurrir una falla en la infraestructura. Asimismo, mediante este documento se busca entregar propuestas para aumentar la resiliencia de la Ruta 5 en las zonas de los puentes críticos identificados.

El informe comienza con una definición conceptual y gráfica de la resiliencia de la red vial. Posteriormente, se propone una metodología para identificar los puentes críticos de la Ruta 5 debido a su baja redundancia. Luego, se entregan los resultados obtenidos en el estudio de criticidad de puentes de la Ruta 5 desde Caldera hasta Pargua. Tras esto, se procede a entregar propuestas para aumentar la resiliencia de la Ruta 5 mediante mayor redundancia. Finalmente, el documento culmina con las conclusiones y recomendaciones del estudio.

2. Resiliencia y Curvas de Restauración

La resiliencia es definida como las capacidades de un sistema expuesto a una amenaza, para anticiparse, resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de sus efectos de manera oportuna y eficaz, para lograr la preservación, restauración y mejoramiento de sus estructuras y funciones básicas (CREDEN, 2016).

Considerando esta definición de resiliencia, se desprende que este concepto se relaciona estrechamente con el de riesgo de eventos naturales. El riesgo de un evento es el valor esperado de las pérdidas asociadas a este. Matemáticamente, corresponde al producto entre la probabilidad de ocurrencia del evento y las consecuencias o impactos del evento (Porter *et al.*, 2004). La intensidad de daños que puede causar un evento natural sobre la red vial está determinada por la vulnerabilidad de los elementos expuestos. Por consiguiente, el riesgo R_{ie} de una amenaza natural sobre un elemento e de la red vial en un periodo de tiempo t es función de la vulnerabilidad del elemento (V_e) y de la intensidad de la amenaza estudiada (A_i) en dicho periodo (BID, 2003).

$$R_{ie}|_t = f(A_i, V_e)|_t \quad (1)$$

Una amenaza natural (A_i), primer componente del riesgo, se define como un peligro latente asociado a la posible manifestación de un fenómeno físico de origen natural (A) con una determinada intensidad (i). Según señala la Oficina para el Socorro de Desastres de las Naciones Unidas UNDR0 (1980), la amenaza es evaluada en función de la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno natural potencialmente dañino en un periodo de tiempo específico en un área dada.

Por otro lado, la vulnerabilidad (V) es definida como la susceptibilidad al impacto que presentan los elementos de la infraestructura potencialmente afectados (Echaveguren *et al.*, 2011). Asimismo, el BID (2003) define la vulnerabilidad como un factor de riesgo interno de un sujeto o sistema expuesto a una amenaza, correspondiente a su predisposición intrínseca a ser afectado física, económica, política o socialmente.

En materia de riesgo de desastres naturales, resulta importante destacar lo realizado en el Proyecto FONDEF ID14I10309: “Investigación y Desarrollo de Modelos para Cuantificar y Mitigar el Riesgo de Eventos Naturales en la Red Vial Nacional”, en el cual participan la Pontificia Universidad Católica de Chile como beneficiaria principal, la Universidad de Concepción como beneficiaria asociada, la Dirección de Vialidad, ONEMI y COPSA A.G. En dicho proyecto se valoriza el riesgo y vulnerabilidad de elementos críticos de la red vial ante eventos naturales. Asimismo, se evalúan las distintas estrategias de mitigación de riesgo.

Justamente tomando como base lo investigado en el Proyecto FONDEF mencionado, se destaca que una manera de visualizar gráficamente la resiliencia es mediante el uso de curvas de restauración. Estas representan el nivel desempeño de un sistema, como una red vial, en función del tiempo ($ND(t)$). De esta forma, reflejan el efecto directo de la pérdida

de la condición de una red vial ante la ocurrencia de un evento natural. En la Figura 3 se muestra una curva de restauración genérica, asumiendo la recuperación total del nivel de desempeño de la red vial.

Antes de la ocurrencia de un evento natural, y en condiciones normales de operación, la red vial como sistema mantiene un determinado nivel de desempeño inicial ND_1 . En el instante t_1 ocurre un evento natural, el cual genera una caída en la condición de la red vial, implicando un nivel de servicio remanente ND_2 . Así, el evento produjo una pérdida de nivel de desempeño de la red vial de $ND_1 - ND_2$.

Una vez ocurrido el evento, se aplica una medida de restauración sobre la red vial, permitiendo que el sistema vuelva a su desempeño inicial (o incluso mejor) en el instante de tiempo t_2 . Este lapso de tiempo en que se restaura el desempeño de la red ($t_2 - t_1$) se denomina tiempo de recuperación (t_R). Culminado este periodo de tiempo, la red vial mantiene su nivel de desempeño ND_1 hasta t_3 , instante de tiempo que puede corresponder al fin de la vida de servicio de la red vial, o bien, al momento de ocurrencia de otro evento natural que afecte al sistema.

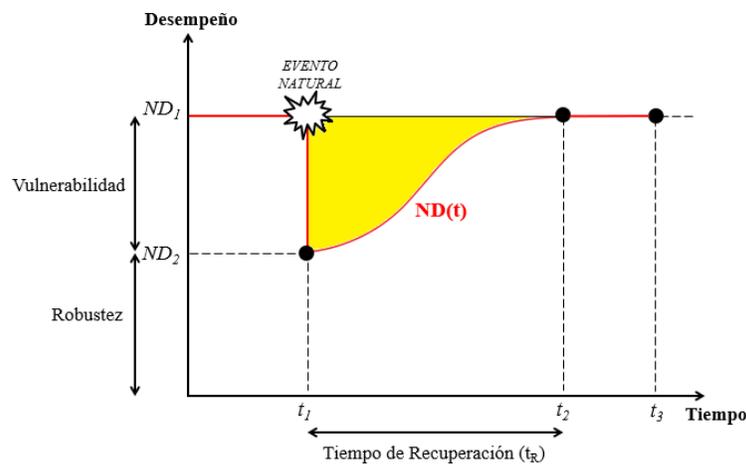


Figura 3. Curva de restauración genérica de un sistema (Buckle y Werner, 2003).

En base a la Figura 3 se pueden definir los siguientes conceptos:

- Nivel de desempeño ($ND(t)$): Condición de operación de la red vial asociado principalmente al volumen de tránsito y a la capacidad de la vía. Se cuantifica mediante distintas medidas de eficiencia, como lo son la velocidad promedio de viaje, el tiempo de viaje, entre otras (TRB, 2010).
- Vulnerabilidad ($ND_1 - ND_2$): Pérdida de nivel de desempeño del sistema debido a la ocurrencia de un evento natural.
- Robustez (ND_2): Nivel de desempeño del sistema alcanzado después de la ocurrencia del evento natural, representando así la resistencia de la red vial. Cuando se corta totalmente una red vial, aislando ciertos nodos, se tiene que $ND_2 = 0$.

- Tasa de restauración ($dND(t)/dt$): Rapidez con que se recupera el nivel de desempeño del sistema tras la ocurrencia del evento natural.

Volviendo al concepto de resiliencia, esta se asocia con la capacidad de la red vial de adaptarse, resistir, superar y recuperarse rápidamente ante la ocurrencia de eventos. De esta forma, se puede desprender que la resiliencia es función de la vulnerabilidad de la red, es decir, de cuánto disminuye el desempeño tras la ocurrencia del evento, y del tiempo de recuperación de la red vial. Por lo tanto, se concluye que la resiliencia de un sistema puede ser cuantificada mediante el cálculo del inverso multiplicativo del área encerrada por la recta definida por el nivel de desempeño inicial ND_1 y la curva de restauración $ND(t)$. Esto es, el inverso del área achurada de la Figura 3. Así, la resiliencia puede estimarse mediante la siguiente expresión:

$$Resiliencia = \frac{1}{ND_1(t_2 - t_1) - \int_{t_1}^{t_2} ND(t) dt} \quad (2)$$

3. Metodología de Identificación de Puentes Críticos

Para el análisis de redundancia de puentes de la Ruta 5 se estableció una metodología lineal de identificación de puentes críticos (Figura 4). Esta consiste en cuatro etapas secuenciales. La primera corresponde a la definición de un radio de búsqueda de rutas alternativas y de la ruta base sin corte del puente en evaluación. Posteriormente, se utiliza un algoritmo de para determinar la ruta alternativa óptima al puente evaluado según un criterio específico. En la tercera etapa se compara la distancia y tiempo de viaje asociado a la ruta alternativa óptima con umbrales establecidos. Estos criterios de criticidad son definidos en función de la distancia y tiempo base de viaje por la Ruta 5 sin corte de puente. Finalmente, si la distancia y/o tiempo de viaje por la ruta alternativa óptima al puente P superan los umbrales, este elemento P es considerado crítico desde el punto de vista estratégico.

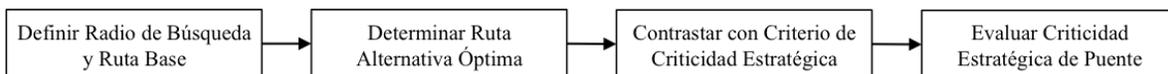


Figura 4. Metodología de identificación de puentes críticos

3.1 Radio de Búsqueda y Ruta Base

Para poder identificar los puentes más vulnerables de la Ruta 5 en cuanto a su redundancia se debe definir un radio de búsqueda de rutas alternativas. Esto es, determinar una distancia base entre dos puntos (A y B) de la Ruta 5, equidistantes del puente P evaluado, que delimiten la búsqueda de rutas alternativas. Así, se tendrá una ruta base entre A y B asociada a la Ruta 5 sin corte del puente P ($R5_{A-B}$) y una serie de rutas alternativas a la ruta base, las cuales también unen los puntos A y B pero sin pasar por el puente P (RA_{A-B}).

Resulta importante destacar que para esta evaluación, los puentes con más de una calzada (oriente-poniente-camino de servicio) son considerados como un solo puente. Para evaluar la redundancia de puentes de la Ruta 5 se simula el corte del arco que contiene el conjunto

P, el cual contiene todas las calzadas del puente potencialmente afectado por un evento natural. Así, para la búsqueda de rutas alternativas se considera que falló la calzada oriente, poniente y los caminos de servicio ubicados en la vecindad del puente.

La definición de un radio de búsqueda estandarizado para todos los puentes evaluados es relevante por dos motivos. En primer lugar, permite acotar la búsqueda de caminos alternativos a la ruta base que pasa por el puente P. La definición de los puntos A y B determina un origen y destino específico para realizar dicha búsqueda. En segundo lugar, permite tener una medida común de la ruta base para todos los puentes evaluados. Esto permite establecer un criterio fijo de criticidad de puentes basado en la distancia y tiempo de viaje base sin corte del puente.

Para esta evaluación se consideró como radio de búsqueda una distancia de 20 km. Así, el origen (A) y el destino (B) para la búsqueda de rutas alternativas se ubican cada uno a 20 km del puente, en dirección contraria. Esto implica una distancia total de 40 km entre A y B por la Ruta 5, lo que equivale a un viaje de 22 minutos. Cabe destacar que tanto la distancia como el tiempo de viaje son estimados mediante Google Maps, el cual considera la velocidad de viaje en condiciones normales de operación de la ruta.

La elección de este radio de búsqueda (20 km) se explica porque este es la distancia máxima entre un puente de la Ruta 5 y origen o destino de la ruta alternativa más cercana al puente. Este es el caso del Puente Molles, en que justamente el origen de camino alternativo más cercano está a 20 km del puente.

La Figura 5 muestra la ruta base A-B asociada al Puente Lontué, denotado con el punto P. En esta figura se puede apreciar el puente P junto con los puntos A y B, que corresponden al origen y destino de la ruta base y los límites de la búsqueda de rutas alternativas. También se muestra la distancia y tiempo de viaje normal en el caso de que no exista corte temporal de operación del puente (40 km y 22 min).



Figura 5. Distancia y tiempo de la ruta base entre los extremos del radio de búsqueda

3.2 Algoritmo de Búsqueda de Ruta Alternativa Óptima

La identificación de los puentes de la Ruta 5 que la hacen más vulnerables estratégicamente requiere de la definición de un algoritmo de búsqueda de la ruta alternativa óptima. Este consiste en una metodología de búsqueda y análisis de las rutas alternativas, simulando un corte en el puente, cuyo objetivo es definir en base a un criterio específico cuál es la ruta alternativa óptima en el caso de que el puente P no esté operativo. Aquí se recuerda que en este estudio los puentes con doble o triple calzada son considerados como un solo conjunto P. Así, se simula el corte de todas las calzadas del puente (oriente-poniente-camino de servicio).

Una vez delimitado el radio de búsqueda y localizados los puntos A y B, se realiza una búsqueda de la ruta alternativa óptima (RA^*) a la ruta base asociada a la Ruta 5. En este sentido, se considera como criterio de optimalidad el tiempo de viaje por sobre la distancia al evaluar las distintas rutas alternativas. Así, la ruta alternativa óptima corresponde a la vía que une los puntos A y B, sin pasar por el puente P, con el menor tiempo de viaje asociado. De esta forma, para la definición de la RA^* no se considera la distancia de viaje de dicha ruta, solo el tiempo.

El algoritmo de identificación de la ruta alternativa óptima tras la simulación del corte del puente P comienza con la búsqueda de todas las rutas alternativas (RA_i) que unen A y B sin pasar por P. Para ello se hace un barrido de búsqueda desde el punto P hasta los extremos del radio de búsqueda A y B. Una vez encontradas todas las rutas alternativas se cuantifica el tiempo de viaje entre A y B utilizando cada ruta alternativa RA_i . Para estimar el tiempo de viaje entre A y B por cada ruta alternativa se utiliza Google Maps, el que considera la velocidad de operación de cada camino.

El tiempo de viaje de la primera ruta alternativa (RA_1) encontrada es almacenado como el tiempo óptimo preliminar de viaje. Luego, se va comparando el tiempo de viaje de cada una de las rutas alternativas (RA_i), considerando también el tiempo de viaje de la ruta RA_1 . La ruta alternativa óptima estará dada por el camino RA_i de menor tiempo de viaje.

En el diagrama de flujo de la Figura 6 se explica el algoritmo de búsqueda de ruta alternativa óptima al simular un corte de un puente P.

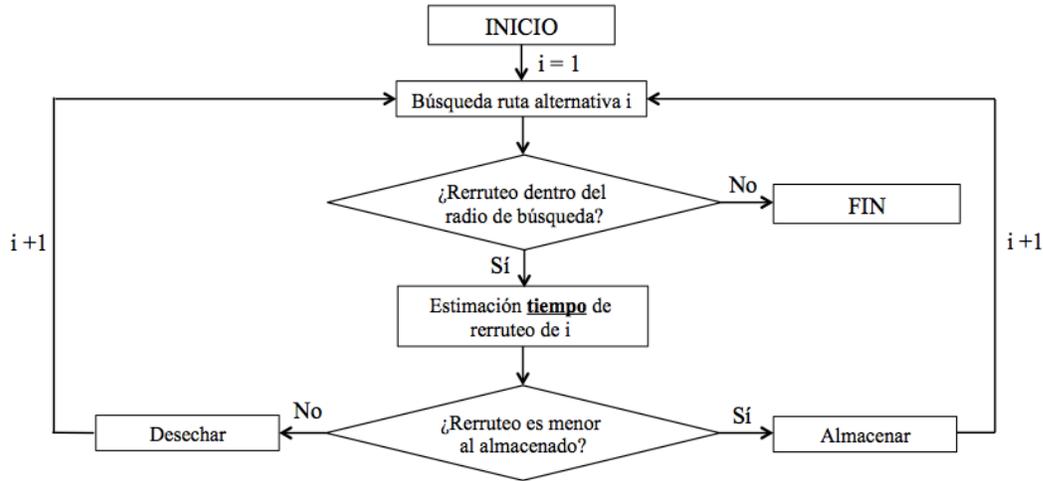


Figura 6. Diagrama de flujo de búsqueda de ruta alternativa óptima ante corte de puente

En la Figura 7 se presenta el mismo ejemplo del puente del cauce Lontué, mostrando la ruta base ($R_{5_{A-B}}$) y dos rutas alternativas existentes que unen A y B que no pasan por el puente P ($RA1_{A-B}$ y $RA2_{A-B}$). Para cada una de estas rutas alternativas se cuantifica el tiempo de viaje entre A y B. Dado que el tiempo de viaje de la ruta alternativa 1 (72 min) es menor al tiempo de la ruta alternativa 2 (109 min), se tiene que la $RA1_{A-B}$ es la ruta alternativa óptima (RA^*).

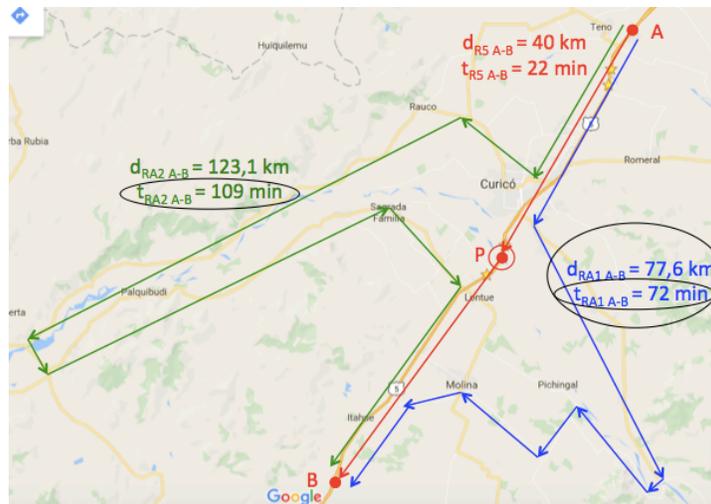


Figura 7. Ruta alternativa óptima ante corte de Puente Lontué

3.3 Criterio de Criticidad de Puentes

Los estándares de mantenimiento de infraestructura son un conjunto de políticas y estrategias que se aplican en base al desempeño de la infraestructura determinado por valores umbrales (De Solminihac, 2001). Las políticas de intervención corresponden a la manera en que se aplicarán las estrategias (por respuesta o programada). Al evaluar la resiliencia y la vulnerabilidad se busca actuar de manera preventiva, es decir, que la caída

del desempeño sea mínima. Asimismo, también se busca que el tiempo de recuperación post-evento sea lo menor posible.

Respecto a la gestión de riesgo, específicamente, la activación de estrategias de mitigación para robustecer la red vial ante eventos naturales debe considerar el nivel de riesgo que la sociedad y los usuarios están dispuestos a aceptar (Basoz y Kiremidjian, 1996). De esta forma, la identificación de puentes críticos para la implementación de estrategias que mejoren su redundancia requiere de la definición de umbrales o criterios de criticidad. Esto es, bajo qué nivel de desempeño (resiliencia) del puente se debe implementar una medida de mitigación sobre esta infraestructura.

En el presente estudio, los puentes de la Ruta 5 se consideraron críticos en cuanto a su redundancia si cumplían al menos uno de estos dos criterios: distancia (espacial) o tiempo (temporal). A continuación se procede a detallar cada uno de estos criterios de criticidad de puentes utilizados en este análisis de resiliencia.

a) Criterio de distancia

En este ejercicio, un puente P se considera crítico si su ruta alternativa óptima tiene una distancia de viaje asociada entre A y B (sin pasar por P) (d_{RA^*}) mayor a 1,5 veces la distancia base de la Ruta 5. Se definió este umbral debido a que los puentes que superan esta cota presentan un aumento sustancial de distancia de viaje (más de 50%), permitiendo así establecer una primera estimación de puentes de la Ruta 5 con alto aumento de distancia de viaje ante un eventual corte.

De esta forma, considerando que la ruta base entre A y B sin corte del puente tiene una distancia de 40 km por la Ruta 5, la distancia crítica de viaje entre A y B ($d_{critica}$) se considera igual a 60 km. Esto quiere decir que si la ruta alternativa óptima de un puente P tiene una distancia mayor a 60 km entre A y B, el puente P es considerado crítico.

$$d_{RA^*} > d_{critica} = 1,5 * d_{R5 A-B} = 1,5 * 40 = 60 \text{ km} \quad (3)$$

En términos de la resiliencia, se puede cuantificar la resiliencia mínima aceptable del puente considerando el inverso multiplicativo de la distancia de viaje entre A y B como medida de desempeño de la red. Teniendo en cuenta el criterio de criticidad de distancia definida, se tiene que la resiliencia mínima aceptable sobre la cual se considera crítico el puente es:

$$R_{critica-d} = \frac{1}{t_R * \left(\frac{1}{40} - \frac{1}{60}\right)} = \frac{120}{t_R} \quad (4)$$

Donde t_R es el tiempo de recuperación de la red, es decir, de rehabilitación del puente P de la Ruta 5. Este tiempo de restauración es considerado igual para todos los puentes de la Ruta 5. La Figura 8 ilustra la curva de restauración del caso crítico en que la resiliencia, en términos de la distancia de viaje entre A y B, es igual a $R_{critica-d}$. Se

En la Figura 9 se presenta la curva de restauración del caso crítico temporal, es decir, en que el tiempo de viaje entre A y B aumenta de 22 a 44 minutos debido al corte del puente P. En este caso, la resiliencia del puente P, considerando el inverso del tiempo de viaje como medida de desempeño, es igual a $R_{crítica-t}$. Al igual que en el caso anterior, la curva de restauración de la red también es discontinua y no sigmoideal. Esto se debe a que el tiempo de viaje entre A y B vuelven a ser 22 minutos de manera instantánea al restaurar el puente P de la Ruta 5.

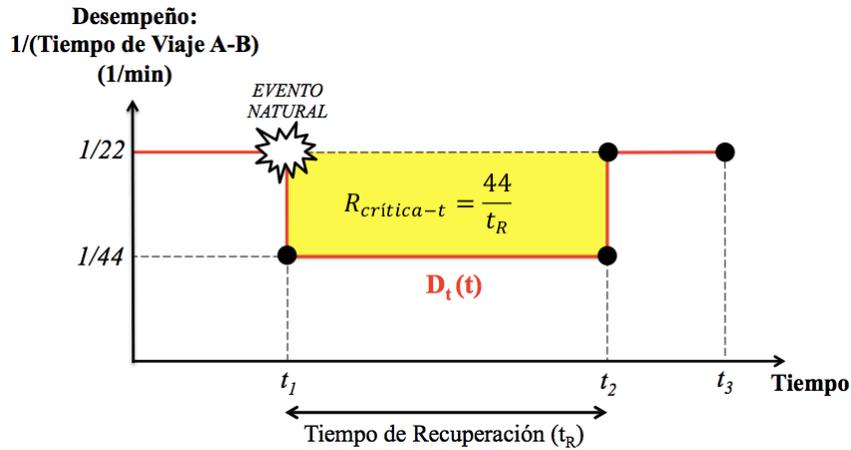


Figura 9. Curva de restauración y resiliencia crítica con el inverso de tiempo de viaje como medida de desempeño

Así todo, bajo el criterio temporal, un puente P se considera crítico si su resiliencia medida en función del inverso del tiempo de viaje (R_{P-t}) es menor a la resiliencia crítica temporal ($R_{crítica-t}$):

$$R_{P-t} = \frac{1}{\left(\frac{1}{22} - \frac{1}{t_{RA}^*}\right) * t_R} = \frac{22 * t_{RA}^*}{(t_{RA}^* - 22) * t_R} < R_{crítica-t} = \frac{44}{t_R} \quad (8)$$

4. Puentes Críticos de la Ruta 5

A partir del criterio de criticidad de redundancia definido se identificaron 26 puentes críticos en el tramo de la Ruta 5 evaluado (Caldera-Pargua), el cual contiene 190 puentes. Nuevamente se destaca que los puentes con doble o triple calzada (oriente-poniente-camino de servicio) fueron considerados como un solo conjunto de puentes en la evaluación. Esto ya que se analiza la redundancia simulando la falla de todas las estructuras en la vecindad del puente evaluado.

Los 26 puentes identificados superan el umbral de distancia y/o el umbral de tiempo de viaje establecidos. En otras palabras, la ruta alternativa óptima ante el corte de alguno de estos puentes tiene una distancia mayor a 1,5 veces la distancia base ($1,5 * 40 = 60$ km) y/o un tiempo de viaje asociado mayor a 2 veces el tiempo base ($2,0 * 22 = 44$ min).

El tramo de evaluación de la Ruta 5 (Caldera-Pargua) fue dividido en cuatro macro-zonas. Esta segmentación permite identificar las zonas del país en que se ubica la mayor parte de los puentes críticos de la Ruta 5. En la Tabla 1 se presenta el número de puentes críticos de la Ruta 5 identificados para cada macro-zona del país.

Tabla 1. Cantidad de puentes críticos de la Ruta 5 por macro-zona de Chile

Zona	Desde	Hasta	N° Puentes Evaluados	N° Puentes Críticos	% Puentes Críticos
Norte	Caldera	Santiago	41	3	7,3%
Centro	Santiago	Chillán	73	9	12,3%
Centro-Sur	Chillán	Temuco	30	7	23,3%
Sur	Temuco	Pargua	46	7	15,2%
TOTAL			190	26	13,7%

De la Tabla 1 se puede desprender que la mayor parte de los puentes con baja redundancia de la Ruta 5 se encuentran ubicados al sur de Santiago. En términos absolutos, la mayor cantidad de puentes críticos de la Ruta 5 se encuentran ubicados principalmente en la entre Santiago y Chillán. Sin embargo, en términos relativos se observa el tramo Chillán-Temuco es el que presenta el mayor porcentaje de puentes críticos de la Ruta 5.

A continuación se presenta el detalle de los puentes críticos identificados en cada macro-zona, mostrando su ubicación junto con los aumentos porcentuales de distancia y tiempo de viaje.

a) Zona Norte (Caldera-Santiago)

Tras analizar las rutas alternativas de todos los puentes de la Ruta 5 entre Caldera y Santiago se identificaron 3 puentes críticos, los que cruzan los cauces Choapa, Los Molles y Pangal. Así, hay un puente crítico en la Región de Coquimbo y dos puentes críticos en la Región de Valparaíso.

Se destaca que todos los puentes críticos de esta zona superan los dos criterios de criticidad definidos. De esta forma, se tiene un importante aumento de distancia y tiempo de viaje ante un corte de estos puentes. Esto quiere decir que las rutas alternativas de esos puentes son extensas y de bajo estándar. En especial, se resalta que los 3 puentes de esta zona tienen una ruta alternativa óptima con tiempo de viaje superior a 6 veces el tiempo de la ruta base por el puente sin falla. Además, es importante mencionar que debido a la cercanía entre los puentes de Los Molles y El Pangal, estos elementos tienen la misma ruta alternativa óptima.

La Figura 10 presenta la información de aumento de distancia y tiempo de viaje ante un eventual corte de los 3 puentes críticos identificados en el tramo Caldera-Santiago.



Figura 10. Puentes críticos de la Ruta 5 entre Caldera y Santiago

b) Zona Centro (Santiago-Chillán)

En el tramo de la Ruta 5 entre Santiago y Chillán se identificaron 9 puentes críticos con bajo nivel de redundancia. Se destaca que 8 de los 9 puentes identificados se encuentran en la Región del Maule. El puente restante cruza el cauce Perquilauquén, el que delimita la Región del Maule y la Región del Bio-Bio. Se resalta que justamente este puente es el elemento con mayor aumento de distancia y tiempo de viaje ante una falla de la infraestructura.

De los 9 puentes críticos ubicados en esta zona, 7 cumplen con los dos criterios de criticidad, es decir, alto aumento de distancia y tiempo de viaje. Los 2 puentes restantes (Putagán y Achibueno) solo tienen un alto aumento de tiempo viaje. Esto implica que estos puentes específicos tienen rutas alternativas que no implican un desvío espacial importante. A pesar de esto, el bajo estándar de dichas rutas alternativas hace que el tiempo de viaje entre A y B ante un corte de cada uno de estos dos puentes sea más del doble que la ruta base por el puente operativo.

En la Figura 11 se muestra el detalle de los 9 puentes críticos de la Ruta 5 en la macrozona Centro-Sur. Los puentes marcados en color rojo corresponden a los que superan los umbrales de distancia y tiempo de viaje establecidos, mientras que los puentes en azul son los que presentan solo alto incremento en el tiempo de viaje.

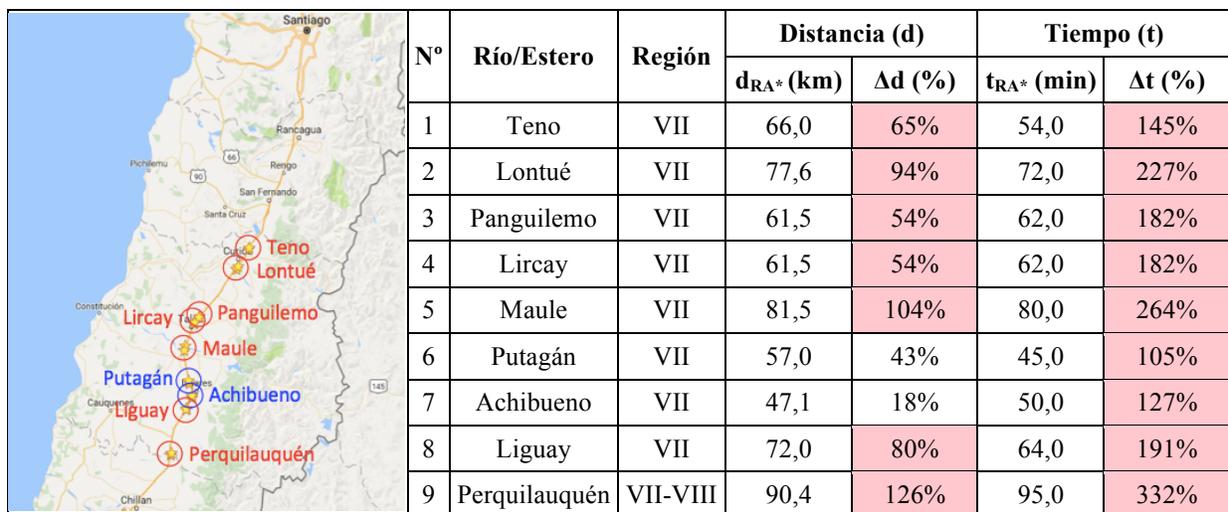


Figura 11. Puentes críticos de la Ruta 5 entre Santiago y Chillán

c) Zona Centro-Sur (Chillán-Temuco)

Al estudiar la redundancia de los puentes de la Ruta 5 entre Chillán y Temuco se identificaron 7 puentes críticos, al igual que en el caso anterior. De este conjunto de puentes, 4 se ubican en la Región del Bio-Bio, 1 en la Región de La Araucanía y 1 en el límite de ambas regiones. Este último puente (Renaico) es el que tiene un mayor aumento porcentual de distancia y tiempo de viaje. En específico, un corte de dicho puente implica que el tiempo de viaje entre A y B sea más de 4 veces el tiempo base de viaje sin corte.

A diferencia de la macro-zona anterior, en este tramo de la Ruta 5 son solo 2 los puentes que cumplen con los dos criterios de criticidad (Itata y Renaico). Los 5 puentes restantes solo superan el umbral de tiempo de viaje definido (mayor al doble del tiempo de viaje sin corte). Esto implica que las rutas alternativas óptimas de dichos puentes no sean espacialmente extensas, pero que el estándar de dichas RA^* es bajo.

La Figura 12 resume la información del aumento de distancia y tiempo de viaje asociado al corte de los 7 puentes críticos de esta macro-zona del país. Nuevamente, los puentes azules son los que tienen alto aumento de distancia y tiempo de viaje, y los rojos son los que solo superan el umbral temporal definido anteriormente.



N°	Río/Estero	Región	Distancia (d)		Tiempo (t)	
			d _{RA*} (km)	Δd (%)	t _{RA*} (min)	Δt (%)
1	Chillán	VIII	51,2	28%	53,0	141%
2	Diguillín	VIII	47,1	18%	50,0	127%
3	Itata	VIII	64,9	62%	61,0	177%
4	Guaqui	VIII	50,2	26%	45,0	105%
5	Renaico	VIII-IX	95,4	139%	92,0	318%
6	Mininco	IX	47,8	20%	46,0	109%
7	Dumo	IX	46,8	17%	46,0	109%

Figura 12. Puentes críticos de la Ruta 5 entre Chillán y Temuco

d) Zona Sur (Temuco-Pargua)

En el último tramo evaluado de la Ruta 5 (Temuco-Pargua) también se identificaron 7 puentes con baja redundancia. El puente del cauce Chada es el único de esta macrozona que está ubicado en la Región de la Araucanía. Los puentes de Huillinco, Calle-Calle y Curaco son los 3 puentes críticos de la Región de Los Ríos. Finalmente, los puentes de Yutreco, Gómez y Murror son los puentes críticos de la Región de Los Lagos.

En esta zona del país son también 2 los puentes de la Ruta 5 que cumplen con los dos criterios de criticidad definidos anteriormente (Huillinco y Calle-Calle). Cabe destacar que estos 2 puentes tienen la misma ruta alternativa óptima. Además, estos son los puentes críticos con mayor aumento de tiempo de viaje. En concreto, el uso de la ruta alternativa óptima entre A y B para estos puentes implica un tiempo de viaje igual 3,5 veces el tiempo base por la Ruta 5 sin corte.

Los 7 puentes restantes solo superan el umbral de tiempo de viaje establecido, teniendo bajos niveles de desvío espacial respecto a la ruta base sin corte del puente. A modo de ejemplo, se destaca que ante un corte del puente del cauce Yutreco, el uso de la ruta alternativa óptima conlleva un aumento de solo 10% en la distancia recorrida. Sin embargo, el uso de la ruta alternativa óptima para el mismo caso de Yutreco implica un aumento de 132% del tiempo de viaje respecto a la ruta base con el puente operativo.

En la Figura 13 se muestra el listado y ubicación de los 9 puentes críticos identificados entre Temuco y Pargua. En azul se muestran los puentes que superan tanto el umbral de distancia como el de tiempo de viaje, mientras que en rojo los puentes solo con alto aumento de tiempo de viaje.



N°	Río/Estero	Región	Distancia (d)		Tiempo (t)	
			d_{RA}^* (km)	Δd (%)	t_{RA}^* (min)	Δt (%)
1	Chada	IX	49,2	23%	48,0	118%
2	Huillinco	XIV	61,4	54%	78,0	255%
3	Calle-Calle	XIV	61,4	54%	78,0	255%
4	Curaco	XIV	53,5	34%	46,0	109%
5	Yutreco	X	43,9	10%	51,0	132%
6	Gómez	X	50,2	26%	46,0	109%
7	Murror	X	58,6	47%	45,0	105%

Figura 13. Puentes críticos de la Ruta 5 entre Temuco y Parga

5. Propuestas para aumentar la Resiliencia Estratégica de la Ruta 5 a Nivel de Red

5.1 Estrategias para robustecer estratégicamente la Ruta 5

Tras la identificación de 26 puentes críticos de la Ruta 5 se procede a entregar propuestas para aumentar la resiliencia de esta vía en su dimensión estratégica a nivel de red. Las medidas a implementar para robustecer la Ruta 5 deben considerar y ser consistentes con las causas que implican la criticidad de los puentes. Así, se proponen dos tipos de soluciones para robustecer estratégicamente los puentes de la Ruta 5, en función de los criterios de criticidad (espacial y/o temporal) que están activos en cada puente.

a) Construcción de puentes alternativos (Estrategia 1 - E1)

Tal como se analizó anteriormente, un conjunto importante de los puentes críticos identificados superan con los dos umbrales de criticidad definidos. En específico, 14 de los 26 puentes críticos tienen rutas alternativas óptimas con distancia y tiempo de viaje mayor a 1,5 y 2,0 veces la distancia y tiempo base.

Para estos casos de puentes que superan los criterios de criticidad de alta distancia y tiempo de viaje por la ruta alternativa óptima, se propone la construcción de un puente alternativo paralelo al existente. La implementación de esta estrategia produciría un cambio en la ruta alternativa óptima del puente, pues el nuevo puente alternativo formaría una nueva ruta con un menor tiempo de viaje respecto a la ruta alternativa óptima actual. Esta nueva ruta alternativa óptima también tendría una menor distancia de viaje, lo que permitirá cumplir con los dos criterios de criticidad definidos.

En la Tabla 2 se muestran los 14 puentes de la Ruta 5 que presentan alto incremento de distancia y tiempo de viaje ante una falla de la estructura. De esta forma, se propone construir un puente alternativo para cada uno de los puentes del listado de la Tabla 2.

Tabla 2. Puentes de la Ruta 5 con alto aumento de distancia y tiempo de viaje

N°	Río/Estero	Región	Zona	Distancia (d)		Tiempo (t)	
				d_{RA}^* (km)	Δd (%)	t_{RA}^* (min)	Δt (%)
1	Choapa	IV	Norte	107,9	170%	141,0	541%
2	Los Molles	V	Norte	125,2	213%	146,0	564%
3	El Pangal	V	Norte	125,2	213%	146,0	564%
4	Teno	VII	Centro	66,0	65%	54,0	145%
5	Lontue	VII	Centro	77,6	94%	72,0	227%
6	Panguilemo	VII	Centro	61,5	54%	62,0	182%
7	Lircay	VII	Centro	61,5	54%	62,0	182%
8	Maule	VII	Centro	81,5	104%	80,0	264%
9	Liguay	VII	Centro	72,0	80%	64,0	191%
10	Perquillauquén	VII-VIII	Centro	90,4	126%	95,0	332%
11	Itata	VIII	Centro-Sur	64,9	62%	61,0	177%
12	Renaico	VIII-IX	Centro-Sur	95,4	139%	92,0	318%
13	Huillinco	XIV	Sur	61,4	54%	78,0	255%
14	Calle-Calle	XIV	Sur	61,4	54%	78,0	255%

La ubicación, dimensionamiento y diseño de los puentes alternativos a los puentes listados en la Tabla 2 deben ser evaluados en detalle por los tomadores de decisiones. Esto ya que los atributos del puente alternativo a construir varían caso a caso en función de las características del cauce, de la población de la zona y de la configuración de la red vial local. En específico, la ubicación de los puentes alternativos debe ser analizada de tal forma que mitigue el efecto del aumento de distancia y tiempo de viaje y también facilite la movilidad de la población de la zona.

La Figura 14 ilustra el Puente Perquillauquén, el cual tiene una ruta alternativa óptima asociada con una distancia de viaje de 90,4 km (2,26 veces la distancia base) y un tiempo viaje de 95 minutos (4,32 veces el tiempo base). Para este puente, que presenta un importante aumento de distancia y tiempo de viaje, se propone la construcción de un puente alternativo. Esto generaría una nueva ruta alternativa óptima con una distancia y tiempo de viaje menor a la existente. Cabe señalar que la ubicación del puente alternativo presentado en la Figura 14 es solo un ejemplo.

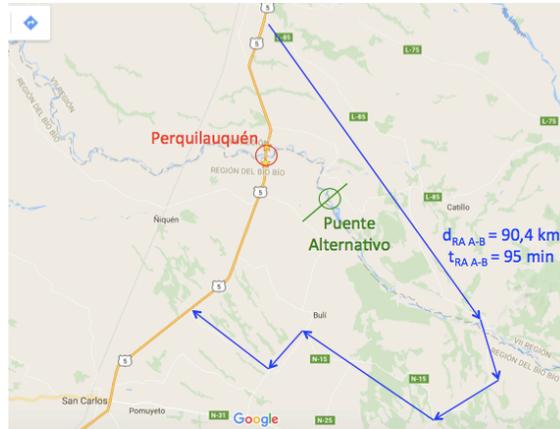


Figura 14. Construcción de puente alternativo a Puente Perquillauquén

b) Mejoramiento de estándar de caminos alternativos (Estrategia 2 - E2)

Los 12 puentes críticos restantes de la Ruta 5 solo superan el umbral de criticidad de tiempo de viaje, sin sobrepasar el umbral de aumento de distancia de viaje. En otras palabras, la Ruta 5 cuenta con 12 puentes que tienen rutas alternativas óptimas con tiempo de viaje mayor a 2,0 el tiempo base, pero una distancia alternativa menor a 1,5 veces la distancia base.

Para los puentes que presentan solo un alto aumento de tiempo de viaje pero un bajo incremento en la distancia se propone mejorar el estándar del camino alternativo óptimo existente. Dado que la distancia de viaje de la ruta alternativa óptima actual no supera el 150% de la distancia base sin corte del puente, no se requiere cambiar geoméricamente la ruta alternativa óptima. Así, no se debe construir un puente nuevo que permite acortar la ruta alternativa en términos de distancia recorrida.

El hecho de que la ruta alternativa óptima entre A y B sin pasar por el puente tenga un alto aumento de tiempo de viaje (más de 2,0 veces el tiempo base) y un menor incremento de distancia (menos de 1,5 veces la distancia base) implica que la ruta alternativa óptima tiene un velocidad media de viaje significativamente menor a la de diseño de la Ruta 5. De hecho, para estos 12 puentes críticos, la velocidad media entre A y B por la ruta alternativa óptima es en promedio 63,7 km/hr, representando el 53% de la velocidad máxima de la Ruta 5. El mejoramiento del estándar del camino alternativo óptimo de estos 12 puentes permitiría disminuir el tiempo de viaje entre A y B ante un eventual corte de dichos puentes. Con esto se podría cumplir con el criterio temporal de viaje de estos puentes, el único que no es cumplido actualmente.

La Tabla 3 ilustra los 12 puentes de la Ruta 5 que tienen solo un alto aumento de tiempo de viaje ante un eventual corte del puente. Se propone mejorar el estándar de los caminos que conforman la ruta alternativa óptima a estos puentes críticos. En resumen, se requiere mejorar el estándar de 603 km de caminos secundarios

alternativos para cumplir con los criterios de tiempo y distancia en estos 12 puentes críticos de la Ruta 5.

Tabla 3. Puentes de la Ruta 5 solo con alto aumento de tiempo de viaje

N°	Río/Estero	Región	Zona	Distancia (d)		Tiempo (t)	
				d_{RA^*} (km)	Δd (%)	t_{RA^*} (min)	Δt (%)
1	Putagán	VII	Centro	57,0	43%	45,0	105%
2	Achibueno	VII	Centro	47,1	18%	50,0	127%
3	Chillán	VIII	Centro-Sur	51,2	28%	53,0	141%
4	Diguillín	VIII	Centro-Sur	47,1	18%	50,0	127%
5	Guaqui	VIII	Centro-Sur	50,2	26%	45,0	105%
6	Mininco	IX	Centro-Sur	47,8	20%	46,0	109%
7	Dumo	IX	Centro-Sur	46,8	17%	46,0	109%
8	Chada	IX	Sur	49,2	23%	48,0	118%
9	Curaco	XIV	Sur	53,5	34%	46,0	109%
10	Yutreco	X	Sur	43,9	10%	51,0	132%
11	Gómez	X	Sur	50,2	26%	46,0	109%
12	Murror	X	Sur	58,6	47%	45,0	105%

La Figura 15 muestra el puente del cauce Gómez de la Región de Los Lagos. La ruta alternativa de este puente tiene una distancia de viaje de 50,2 km entre A y B, superando en tan solo 26% la distancia de viaje utilizando el puente. Sin embargo, si se observa el tiempo como desempeño se puede desprender que el uso de la ruta alternativa conlleva un tiempo de viaje de 46 minutos, lo que implica un aumento de 109% respecto al tiempo base de viaje.

Este es uno de los puentes críticos de la Ruta 5 en que se propone mejorar el estándar del camino alternativo. Esto mantendría la distancia de viaje alternativa pero permitiría reducir sustancialmente el tiempo de viaje por esa ruta alternativa óptima.



Figura 15. Mejoramiento de estándar de camino alternativo a Puente Gómez

5.2 Propuesta Metodológica para Priorización de Estrategias

Considerando la restricción de presupuesto de inversión en materia de infraestructura, se requiere establecer una metodología de priorización de estrategias para la eficiente asignación de recursos. Lógicamente, los escasos recursos disponibles deben ser focalizados en las estrategias que generan el mayor aumento de la resiliencia de los puentes de la Ruta 5 con el menor costo posible.

Ante la dificultad de valorizar monetariamente los beneficios asociados al aumento de la resiliencia de los puentes de la Ruta 5, se propone priorizar las distintas estrategias en base a la costo-efectividad marginal (CEM) de cada una de ellas respecto al caso actual (no hacer nada). Esta consiste en contrastar el beneficio marginal de la estrategia j sobre el puente P , en términos del aumento de resiliencia, con el costo marginal de la estrategia j . Así, permite valorar en cuánto se incrementa la resiliencia de un puente debido al aumento de redundancia por cada peso que se invierte en la actualidad. Cabe destacar que esta metodología es presentada solo como una propuesta para evaluar estrategias de mitigación, pero que aun no ha sido aplicada para el caso de la resiliencia de los puentes de la Ruta 5.

La costo-efectividad marginal asociada a la implementación de la estrategia j está dada por la siguiente expresión:

$$CEM_{Est\ j-Actual} = \frac{(R_{P-t})_{Actual} - (R_{P-t})_{Est\ j}}{VAN_{Est\ j}} \quad (9)$$

Donde $(R_{P-t})_{Actual}$ a la resiliencia estratégica actual del puente P utilizando el inverso del tiempo de viaje como medida de desempeño y $(R_{P-t})_{Est\ j}$ corresponde a la resiliencia del puente P si se implementa la estrategia j . Cabe recordar que la resiliencia se evalúa mediante la siguiente ecuación, la cual incluye el tiempo base de viaje (22 minutos), el tiempo de viaje de la ruta alternativa óptima entre A y B tras implementar la estrategia j y el tiempo de reposición del puente P :

$$(R_{P-t})_{Est\ j} = \frac{1}{\left(\frac{1}{22} - \frac{1}{(t_{RA^*})_{Est\ j}}\right) * t_R} \quad (10)$$

Además, resulta importante destacar que $VAN_{Est\ j}$ es el valor actual neto de la estrategia j , el cual debe considerar todos los flujos financieros del ciclo de vida de la estrategia a implementar. Así, se deben descontar la inversión inicial (I_0), los costos de mantenimiento (C_i) y el valor residual (VR) con la tasa social de descuento.

$$VAN_{Est\ j} = -I_0 - \sum_{i=0}^n \frac{C_i}{(1,06)^i} + \frac{VR}{(1,06)^n} \quad (11)$$

Una mayor costo-efectividad marginal de una estrategia j implica que su implementación genera un alto aumento de la resiliencia del puente P respecto al caso actual, con un bajo costo actual (VAN). El incremento de resiliencia estratégica quiere decir que disminuyan los tiempos de viaje ante un eventual corte del puente. Considerando esto, la estrategia de

mitigación a implementar corresponde a la que tenga una mayor costo-efectividad marginal.

En la Tabla 4 se presenta un ejemplo esquemático de la metodología de priorización de estrategias para aumentar la resiliencia del Puente Lontué. En la tabla se presenta la costo-efectividad marginal de distintas alternativas de mitigación para otorgar redundancia al puente. La resiliencia se cuantifica como función del tiempo de reposición del puente original (t_R), el que se asume igual para las tres alternativas pues es independiente de la redundancia. Cabe destacar que las cifras del tiempo de viaje por la ruta alternativa óptima (t_{RA^*}) y el costo de las estrategias E1, E2 y E3 no se ajustan necesariamente a la realidad.

Tabla 4. Ejemplo de metodología de costo-efectividad marginal para priorizar estrategias de mitigación

Puente	Estrategia	Descripción	t_{RA^*} (min)	Δ Resiliencia	VAN (MMS)	CEM
Lontué	Base	Actual (sin construir puente ni mejorar estándar de caminos).	72	0	0	0
	E1	Construir puente alternativo y 1,3 km de camino entre Ruta A-1 y A-2.	45	11,4/ t_R	-510	0,022/ t_R
	E2	Construir puente alternativo y 1,2 km de camino entre Ruta B-1 y B-2	36	24,9/ t_R	-560	0,044/ t_R
	E3	Mejorar estándar de 38 km de camino en Ruta C-1 y C-2	54	5,4/ t_R	-440	0,012/ t_R

Nota: Las rutas y valores de la Tabla 4 son solo para ejemplificar la metodología de priorización, por lo que no se ajustan necesariamente a la realidad.

En la Tabla 4 se observan tres estrategias de mitigación, las cuales se comparan con la situación actual sin hacer nada (caso base o cero). Las estrategias E1 y E2 se asocian a la construcción de distintos puentes alternativos al actual Puente Lontué. La estrategia E3 corresponde al mejoramiento de un camino secundario alternativo a la Ruta 5.

Tomando en cuenta los tiempos de viaje y costos actuales considerados en la Tabla 4, se pudo desprender que la estrategia E2 es la óptima, pues presenta la mayor costo-efectividad marginal. Así, tiene el mayor aumento de resiliencia por peso invertido. Esta estrategia en particular tiene el mayor costo de implementación pero también la mayor efectividad en términos de aumento de resiliencia del Puente Lontué. Esto ya que el tiempo de viaje entre A y B ante un eventual corte del puente disminuye de 72 minutos (caso actual) a 36 minutos con la estrategia E2.

6. Conclusiones y Recomendaciones

En el presente informe se analizó la resiliencia de los puentes de la Ruta 5 en su dimensión estratégica como eje estructurante de la red vial de Chile. Para ello se estudió la redundancia de puentes mediante el análisis del aumento de distancia y tiempo de viaje ante un eventual corte del puente en evaluación.

Tras el análisis realizado se obtuvo que la Ruta 5 presenta una alta vulnerabilidad estratégica en algunos de sus puentes. La falla de determinados puentes de la Ruta 5 genera importantes aumentos en las distancias y tiempos de viaje. Esto se traduce en pérdida de competitividad del país y una peor calidad de vida de la población.

En el estudio se identificaron 26 puentes críticos en la Ruta 5 entre Caldera y Parga, lo que representa el 13,7% de los puentes de ese tramo. La medición de la distancia y tiempo de viaje asociados a la ruta alternativa óptima de cada puente, y su posterior contraste con la condiciones normales de operación, permitió identificar preliminarmente cuáles son los más vulnerables estratégicamente. Los puentes críticos identificados se ubican principalmente en la Región del Maule y la Región del Bio-Bio. Respecto a su ubicación también resulta interesante mencionar que 2 puentes críticos están en límites regionales.

Resulta importante destacar que los puentes críticos identificados no necesariamente presentan una alta vulnerabilidad física. De hecho, dados los parámetros de diseño de puentes de la Ruta 5 puede que la probabilidad de falla de estos puentes sea baja. No obstante, el estudio de redundancia realizado en este informe analiza la vulnerabilidad en sus dimensión estratégica. En otras palabras, se estudia el caso de cómo variaría la distancia y tiempo de viaje dado que el puente falló. Este análisis a nivel estratégico basado en la redundancia de puentes de la Ruta 5 permite contribuir a una red vial más resiliente.

La alta exposición de la Ruta 5 ante eventos naturales junto con su importante vulnerabilidad social, económica y política hacen que la resiliencia y el riesgo deban ser considerados en la evaluación social de proyectos de inversión. La baja redundancia de puentes de la ruta principal de Chile implica que ante un eventual corte del puente el país pierda conectividad. Esto permite desprender que la evaluación social de proyectos de infraestructura vial no debe basarse exclusivamente en la demanda de la ruta, sino que también en la presencia de rutas alternativas y de aumentos de tiempos y distancias de viaje ante una falla.

Respecto a esto mismo, del estudio se desprende que la costo-efectividad marginal (CEM) resulta una herramienta útil para evaluar y priorizar distintas estrategias de mitigación. Ante la dificultad de evaluar monetariamente los beneficios del aumento de la resiliencia, la CEM permite asignar eficientemente los recursos a las medidas que presentan una mayor efectividad técnica (Δ Resiliencia) por recurso invertido actualmente (VAN).

En concreto, para robustecer estratégicamente dichos puentes y dotar así de resiliencia a la Ruta 5 se propone construir 14 puentes alternativos y mejorar el estándar de 603 km de caminos secundarios o alternativos a la Ruta 5. La clasificación de los puentes alternativos requeridos según su longitud total (Ministerio de Obras Públicas, 2016b) es la siguiente:

- 5 puentes menores ($10 \text{ m} < L \leq 40 \text{ m}$)
- 4 puentes medianos ($40 \text{ m} < L \leq 200 \text{ m}$)
- 5 puentes mayores ($L > 200 \text{ m}$)

La implementación de estas medidas permitiría reducir los tiempos y distancias de viaje en las rutas alternativas óptimas a los puentes críticos identificados. Con esto los puentes no superarían los umbrales mínimos de resiliencia establecidos en este estudio.

7. Referencias

Banco Interamericano de Desarrollo (2003). *La noción de riesgo desde la perspectiva de los desastres: marco conceptual para su gestión integral*. Manizales, Colombia: Instituto de Estudios Ambientales IDEA.

Basoz, N. & Kiremidjian, A. S. (1996). *Risk assessment for highway systems, Technical Report 118*. Stanford, United States: John A. Blume Earthquake Engineering Center.

Buckle, I. G. & Werner, S. D. (2013). *Quantifying the seismic resilience of highway networks using a loss-estimation tool*. 29th US-Japan Bridge Engineering Workshop. Tsukuba, Japan: Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research Public Works Research Institute.

Cashina, P., Mohaddesb, K. & Raissi, M. (2015). *Fair weather or foul? The macroeconomic effects of El Niño*. Recuperado de: http://www.econ.cam.ac.uk/people/cto/km418/GVAR_El_Nino.pdf

Comisión Nacional para la Resiliencia frente a Desastres de Origen Natural (2016). *Hacia un Chile resiliente frente a desastres: una oportunidad*. Santiago, Chile: Consejo Nacional de Innovación para el Desarrollo.

De Solminihaç, H. (2001). *Gestión de Infraestructura Vial*. Santiago, Chile: Ediciones Universidad Católica de Chile.

Dilley, M., Chen, R., Deichmann, U., Lerner-Lam, A., Arnold, M., Agwe, J., Buys, P., Kjekstad, O., Lyon, B. & Yetman, G. (2015). *Natural disaster hotspots: a global risk analysis*. Washington D.C., United States: World Bank.

Echaveguren, T., Azocar, G., Felez, J. & Sanhueza, R. (2011). *Including natural risk concepts in road maintenance planning*. 6th International Conference on Managing Pavement Assets. Santiago, Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.

Ministerio de Obras Públicas (2012). *Obras públicas y catástrofes: lecciones aprendidas*. Santiago, Chile: República de Chile.

Ministerio de Obras Públicas (2016a). *Red vial nacional: dimensionamiento y características*. Santiago, Chile: República de Chile.

Ministerio de Obras Públicas (2016b). *Manual de Carreteras Volumen 3: Instrucciones y criterios de diseño*. Santiago, Chile: República de Chile.

Porter, M., Logue, C., Savigny, K. W., Esford, F. & Bruce, I. (2004). *Estimating the influence of natural hazards on pipeline risk and system reliability*. In International

Pipeline Conference, october 4-8 (pp. 2587-2595). Calgary, Canada: The American Society of Mechanical Engineers.

Superintendencia de Valores y Seguros de Chile (2012). *Terremoto 2010: análisis e impacto del 27-F en el mercado asegurador*. Santiago, Chile: Superintendencia de Valores y Seguros de Chile.

Transportation Research Board (2010). *Highway Capacity Manual*. Washington D.C., Estados Unidos: Transportation Research Board.

United Nations Disaster Relief Office (1980). *Natural disasters and vulnerability analysis: Report of expert group meeting*. Geneva, Switzerland: United Nations.

United Nations Office for Disaster Risk Reduction (2015). *Global assessment report on disaster risk reduction*. Geneva, Switzerland: United Nations.



 [clapesuc](#)

 [@clapesuc](#)

 [clapes_uc](#)

 [clapesuc](#)