

Hernán de Solminihac T.
Joaquín Dagá K.
Javiera Perry V.

www.clapesuc.cl

Redundancia de Puentes de la Ruta 5 entre Caldera y Pargua

Documento de Trabajo N° 54

Informe CLAPES UC

Redundancia de Puentes de la Ruta 5 entre Caldera y Pargua

Hernán de Solminihac Tampier, Joaquín Dagá Kunze y Javiera Perry Vives

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 determinar el grado de debilidad de la ruta, por medio del cociente del tiempo de viaje entre una ruta óptima entre los puntos A y B, cada uno ubicado a 20 km en línea recta del puente, y el tiempo de viaje de la ruta alternativa óptima, donde para el mismo trayecto se considera el corte del puente. Se definió como puente crítico aquel que tiene un grado de debilidad mayor o igual a 2,0 en ambos sentidos, y semi-críticos en solo un sentido. Tras evaluar la redundancia de los 195 puentes de la Ruta 5 se identificaron 27 puentes críticos y 20 semi-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, en base a un umbral de distancia de viaje, donde para una ruta alternativa óptima que excede 1,5 veces la ruta óptima se propone la construcción de un nuevo puente. En otro caso, se propone mejorar el estándar de la ruta alternativa óptima. Es por esto que se recomienda la formulación de 13 rutas y mejorar el estándar de 275 km. Finalmente se propone soluciones para las 13 rutas.

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

Abstract

This paper analyzes the resilience of Ruta 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 of determining the degree of weakness of the route, by means of the quotient of the travel time between an optimal route and the travel time of the optimal alternative route. The alternative route is defined as the route with shorter time between points A and B, each located 20 km in a straight line of the bridge. A critical bridge was defined as one that has a degree of weakness greater than or equal to 2.0 in both directions and semi-critical in any direction. After evaluating the redundancy of the 195 bridges of Route 5 it was obtained that 27 bridges are critical and 20 semi-critical under this criteria. Measures were proposed to increase the resilience of the road network in the area of critical bridges of Route 5. The solution was based on a travel distance threshold estimated at 1,5 times de distance of the original route. For routes that exceed the threshold is proposed the construction of a new bridge, in another case, aims to improve the standard of the optimal alternative. That is why it is recommended to formulate 13 routes and improve the standard of 275 km of the network. Finally, were propose solutions for the 13 routes

Keywords: Resilience, Redundancy, Bridges, Ruta 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.

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 aspecto. 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 & 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.

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). 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, a esto se debe agregar la exposición de los puentes de la Ruta 5 a eventos hidrometeorológicos, debido a los numerosos ríos, esteros y quebradas que cruzan la vía

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.

desde la Cordillera de los Andes hasta el mar. En la Figura 1 se muestran las principales características de los puentes pertenecientes a la Ruta 5 en el tramo Caldera-Pargua.

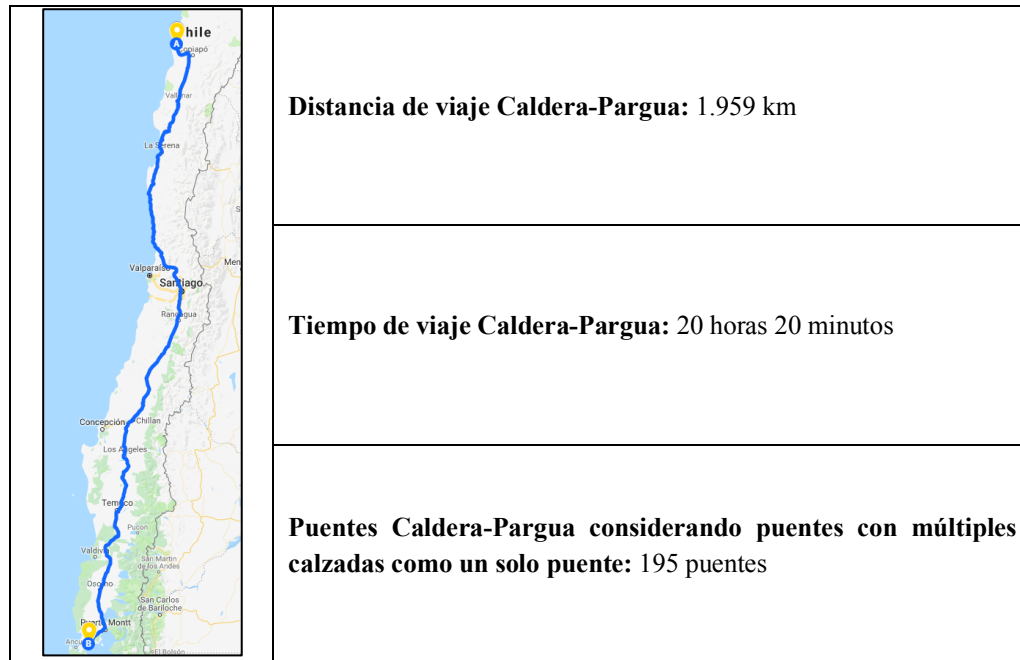


Figura 1. Características generales de la Ruta 5 en el tramo Caldera-Pargua

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, es decir, la resiliencia desde una dimensión física.

Considerando la resiliencia de la infraestructura vial nacional desde un punto de vista 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 en algunos casos un significativo aumento de tiempo de viaje para cruzar el cauce. Esto se debe a una menor velocidad de tránsito en las rutas alternativas y a un aumento en la distancia de viaje de dichas rutas, lo que genera a su vez mayores 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 (punto celeste), el usuario debe transitar por rutas

alternativas de largas distancias (rutas en azul) para ir de un punto específico a otro (puntos amarillos).

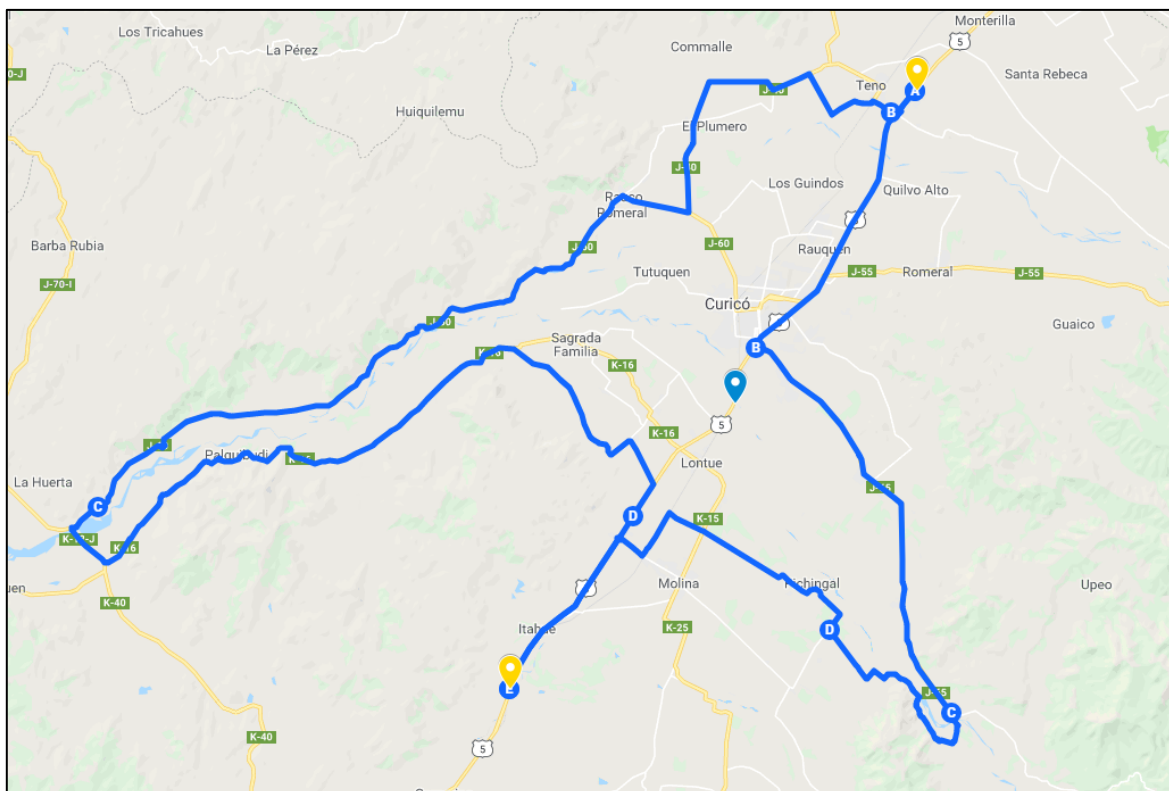


Figura 2. Baja redundancia en Puente Lontué de Ruta 5.

Un caso concreto que ejemplifica esta situación fue lo que sucedió en el terremoto del 27 de febrero de 2010, en que se dañaron los puentes que unen San Pedro de la Paz y Concepción en la Región del Biobío. Los daños estructurales generaron la necesidad de restringir el tránsito de camiones por estos puentes. Con este corte, los camiones debían cruzar el Río Biobío por la Ruta 5 para viajar desde San Pedro de la Paz, lo que implicó que el viaje entre estas dos localidades demorará 2 horas y 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.

Esta situación de vulnerabilidad de la red vial estructurante del país 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 de este análisis es identificar los puentes críticos de la Ruta 5 en cuanto a su baja redundancia y altos aumentos de tiempos de viaje al ocurrir una falla en la infraestructura. Asimismo, mediante este documento se busca entregar propuestas para aumentar la redundancia, y, por ende, la resiliencia de la Ruta 5 en las zonas de los puentes críticos identificados.

El presente informe se basa en el documento “Análisis de Resiliencia Estratégica de Puentes de la Ruta 5 entre Caldera y Pargua” (De Solminihac & Dagá, 2018). Comienza con una definición conceptual de la resiliencia y redundancia de la red vial. Posteriormente, se presenta la revisión bibliográfica, para luego discutir y proponer 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. Se establecen criterios para definir la propuesta de mejora a las rutas críticas y así aumentar la resiliencia de la Ruta 5, luego, se procede a proponer soluciones particulares para los puentes críticos. Finalmente, el documento culmina con las conclusiones y recomendaciones del estudio.

2. Resiliencia y Métodos de Evaluación de Resiliencia

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 UNDRO (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 cuantifica el riesgo y vulnerabilidad de elementos críticos de la red vial nacional ante eventos naturales. Asimismo, se evalúan las distintas estrategias de mitigación de riesgo.

El ya mencionado caso del cierre del puente que une San Pedro de la Paz y Concepción frente al terremoto en Chile el 27 de febrero de 2010 genera la pregunta de qué implicancias tiene la falla de un puente determinado en el funcionamiento de la red como sistema. Por lo mismo es importante evaluar qué ocurre con la conectividad producto de este cierre. En la definición de resiliencia, se establece no solo la capacidad de recuperarse, sino también de resistir, absorber y adaptarse.

De acuerdo con la MCEER (Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research) de la Universidad de Buffalo, la resiliencia de una ruta, para efectos de desastres naturales, se basa en las propiedades de robustez, redundancia, recursos y rapidez. Particularmente, la redundancia es la propiedad de la ruta de reemplazar elementos, de modo que el sistema mantenga un comportamiento estable por medio de alternativas a los elementos (MCEER, 2006).

Con el fin de medir esta capacidad de una ruta cualquiera, en la literatura se estudian diversos parámetros con los cuales se mide la resiliencia de un sistema por medio de la redundancia de este. En la Tabla 1 se muestra un cuadro resumen de las principales variables ocupadas para determinar esta capacidad. Es importante destacar que estos estudios no buscan determinar medidas de restauración de la red, sino más bien evaluar el intertanto cuando el sistema tiene un menor nivel de desempeño, es decir, evaluar las rutas alternativas frente a fallas en un puente. Es bajo esta consigna que estudiar las capacidades de resiliencia asociadas a resistir, absorber y adaptarse de un sistema se relaciona con el estudio del comportamiento de una ruta alternativa frente a la ocurrencia de un evento puntual, y, por ende, a la redundancia de la ruta.

Tabla 1. Parámetros utilizados para medir resiliencia en la literatura.

LITERATURA	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
CRITERIO												
Distancia de viaje		X			X				X			X
Tiempo de viaje	X	X								X		X
Conectividad	X	X	X			X			X	X		
Accesibilidad	X		X	X	X			X	X	X	X	X
Costo de viaje				X	X	X	X		X	X	X	X

(1) Bengtsson & Tomasson (2008).

(2) Berdica & Mattsson (2007).

(3) Bautista (2018).

(4) Echaveguren, Azocar, Felez & Sanhueza (2011).

(5) Erath, Birdsall, Axhausen & Hajdin (2009).

(6) Furtado (2015).

(7) Jenelius, Peterson & Mattsson (2006).

(8) Lu & Peng (2011).

(9) Nicholson (2007).

(10) Pokharel & Ieda (2016).

(11) Taylor & D'Este (2007).

(12) Taylor, Sekhar & D'Este (2006).

De la Tabla 1 se destaca que los parámetros que más se repiten en la literatura respecto a la evaluación de la resiliencia son la conectividad, accesibilidad y costo de viaje. La conectividad estudia la probabilidad que un par de nodos se mantenga unido frente a algún evento, lo que implica que exista un enlace entre ambos nodos. Bengtsson & Tomasson, (2008) particularmente estudian el comportamiento de una ruta en caso de que un enlace se vea afectado y/o eliminado. Berdica & Mattsson (2007) presentan diversos escenarios variando tráfico, la eventualidad de accidentes, clima y cierre parcial o completo de algún puente. Para determinar conectividad y la resiliencia, el estudio mide el tiempo, distancia y velocidad de viaje. La conectividad como criterio de resiliencia busca establecer la capacidad de resistir de la ruta.

La accesibilidad, similar a la conectividad, estudia la probabilidad de que algún nodo quede sin enlaces. Esto implica que no se puede llegar a cierta locación. En ese sentido, Bautista (2018) y Furtado (2015) relacionan la capacidad de adaptarse con el cociente entre el número de arcos y la cantidad de nodos de una ruta. Este concepto se conoce como Índice Betha (β) y busca identificar la factibilidad de llegar a un nodo.

Con respecto al costo de viaje, este sirve como parámetro para establecer el aumento en los costos al fallar un elemento en la ruta. En cierta medida, el costo de viaje evalúa la factibilidad de absorber el impacto económico del evento. En la literatura hay quienes consideran directa o indirectamente los costos como medida de resiliencia. Para Erath *et al.* (2009) y Nicholson (2007), el costo es calculado indirectamente, de modo que a la distancia y/o tiempo de viaje se le asigna un costo por kilómetro y luego se comparan los costos de la ruta base y la ruta alternativa. Por otro lado, para Taylor, Sekhar & D'Este (2006) el costo es un parámetro directo para estimar la resiliencia de una ruta, tal que consideran el costo como un input en su modelo, y se comparan los costos de la ruta base respecto a los costos de la ruta alternativa.

Otros indicadores que destacan para determinar la resiliencia son el tiempo de viaje y la distancia de viaje, los cuales se pueden usar directa o indirectamente, al igual que el costo. El tiempo de viaje es un parámetro que busca estimar la adaptación de una ruta al comparar su tiempo de viaje con el de una ruta alternativa. El Ministerio de Tierra, Infraestructura, Transporte y Turismo (MLIT) japonés propuso el indicador de grado de debilidad, el cual se define como el cociente entre el tiempo de viaje entre la ruta base y la ruta alternativa (Pokharel & Ieda, 2016).

Con respecto a la distancia de viaje, la lógica detrás de este es la misma que con el tiempo de viaje: obtener una comparación con la distancia base. Sin embargo, para evaluar la vulnerabilidad es necesario transformar la distancia a costos, como se mencionó anteriormente.

3. Metodología de Identificación de Puentes Críticos

Un puente crítico será definido según la redundancia de este. Para el análisis de redundancia de puentes de la Ruta 5 se utiliza el parámetro de tiempo de viaje; generando la comparación entre el tiempo de viaje base y el tiempo de viaje al considerar rutas alternativas, esta última permite la conexión total, a pesar del cierre de un puente. De esta forma, se integra de manera parcial la accesibilidad y conectividad, siendo un parámetro que permite definir indicadores adimensionales simples de medir, comparar y replicar en otros estudios.

Se descartaron los parámetros asociados a costos de viaje puesto que en la mayoría de los estudios que utilizan el costo como parámetro, los autores relacionan el costo de viaje con el tiempo de viaje, de modo que el costo se calcula utilizando como parámetro base el tiempo. Al utilizar directamente el tiempo de viaje se estandariza el estudio y permite replicarse en cualquier lugar o momento, y ser comparable unos con otros.

Con respecto a la distancia de viaje, se determina que este parámetro es redundante respecto al tiempo de viaje en la identificación de puentes críticos, puesto que, de existir una ruta alternativa con distancia excesiva, dicha ruta ya tiene un tiempo de viaje excesivo, considerando las velocidades límites en Chile. Esto no ocurre en el caso contrario, donde existen caminos con una velocidad de diseño baja, de modo que, para igual distancia, el

tiempo de viaje es muy alto, el detalle del análisis se genera en el Anexo A. Sin embargo, el parámetro de distancia será utilizado para definir criterios para la generación de propuesta de solución.

Se estableció una metodología lineal de identificación de puentes críticos (Figura 4). Esta consiste en cinco 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 para determinar la ruta alternativa óptima al puente evaluado según el criterio de tiempo. En la tercera etapa se determina el grado de debilidad de la ruta en torno al tiempo de viaje asociado a la ruta alternativa óptima y la ruta base. Finalmente, si el grado de debilidad del puente P supera el umbral establecido para el grado de debilidad, entonces este elemento P es considerado crítico desde el punto de vista estratégico. Se destaca que la ruta base es aquella que pasa por el elemento P de la Ruta 5, lo que no implica que sea la óptima.

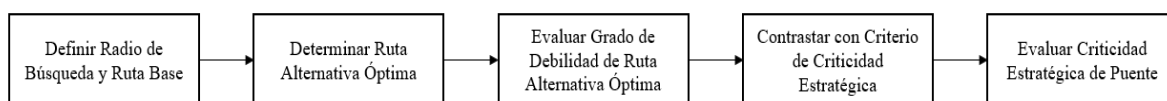


Figura 4. Metodología de identificación de puentes críticos.

Fuente: Elaboración Propia

Previo a la descripción de las etapas, resulta importante destacar que, para esta evaluación, los puentes con más de una calzada (oriente y poniente) son considerados como un solo puente. Para evaluar la redundancia de puentes de la Ruta 5 se simula el corte del arco que incluye el conjunto P, el cual contiene todas las calzadas y tableros del puente potencialmente afectado por un evento natural, y no existe rapidez de recuperación. Así, para la búsqueda de rutas alternativas se considera que falló la calzada oriente y poniente, y que este no puede reponerse en un tiempo cercano.

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 (RO_{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 (RAX_{A-B}). Se reitera que la ruta base es la que contiene al elemento P, y no es necesariamente la óptima.

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, de modo que los parámetros iniciales son similares para todas las rutas, considerando un estándar de diseño igual en toda la Ruta 5.

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 línea recta y en direcciones contraria.

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 destino 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 al radio de búsqueda, delimitado por los puntos A y B, que corresponden al origen y destino de la ruta base y los límites de la búsqueda de rutas alternativas.



Figura 5. Radio de búsqueda para Ruta Alternativa Óptima (RA^*).

El estudio se realiza de Caldera a Pargua, y a lo largo de este todos los puentes permiten considerar un radio de 20 km, salvo el último puente evaluado, Puente de la Máquina, en este caso se consideraron 20 km de radio hacia el norte y tan sólo 3 km hacia el sur, siendo el máximo permitido.

3.2 Algoritmo de Búsqueda de Ruta Alternativa Óptima

La identificación de los puentes de la Ruta 5 que la hacen más vulnerable 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 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 todos los tableros del puente (oriente y poniente).

Una vez delimitado el radio de búsqueda y localizados los puntos A y B, en primer lugar, se determina el tiempo de viaje entre los puntos A y B asociados a la ruta base (sin corte puente P). En segundo lugar, se realiza una búsqueda de la ruta alternativa óptima (RA^*). En este sentido, se considera como criterio de redundancia el tiempo de viaje, es decir, 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.

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. Se consideran las rutas que unen A y B desde A hacia B y desde B hacia A

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 la distancia y el tiempo de viaje entre A y B por cada ruta alternativa se utiliza Google Maps, el que considera la velocidad de operación y el tráfico medio 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. De existir una ruta RA_i con tiempo de viaje igual a RA_j se define como óptima aquella con menor distancia 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.

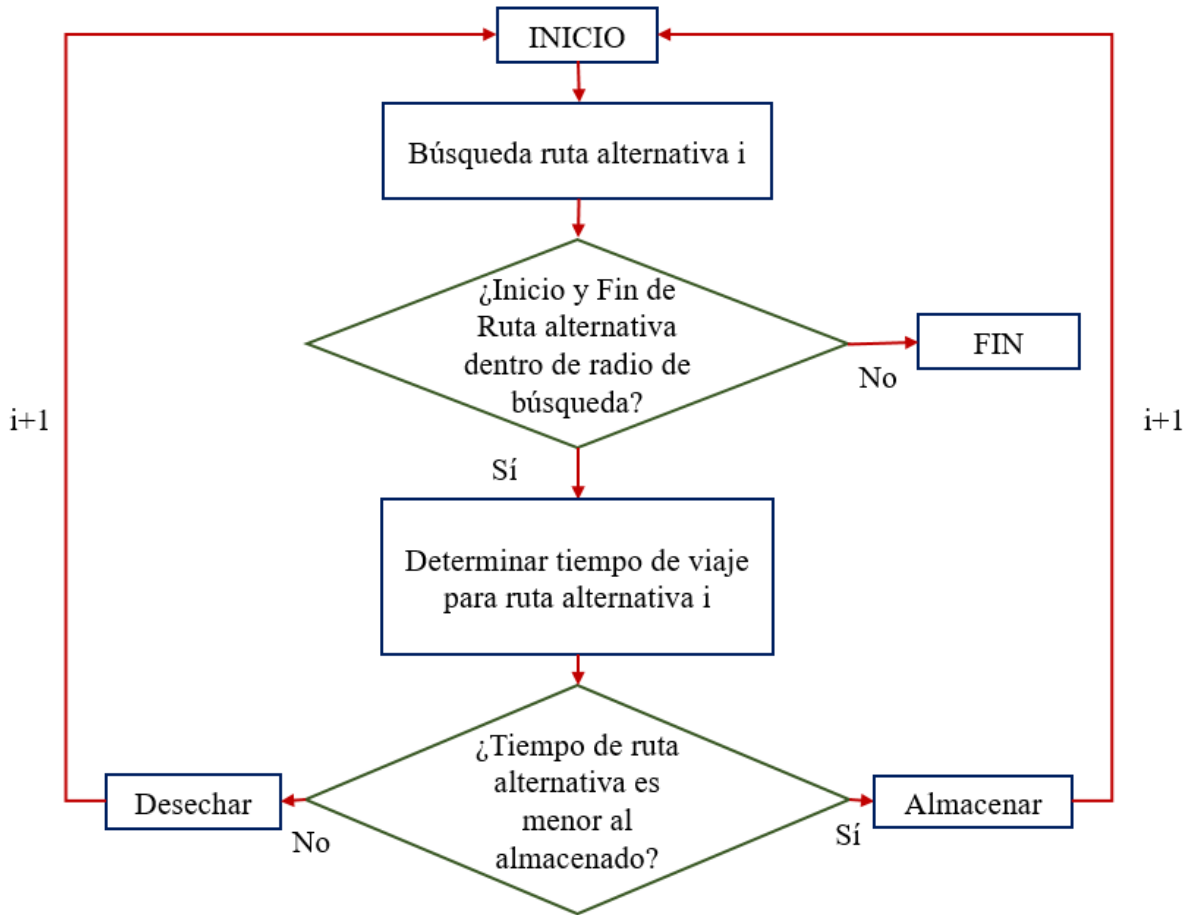
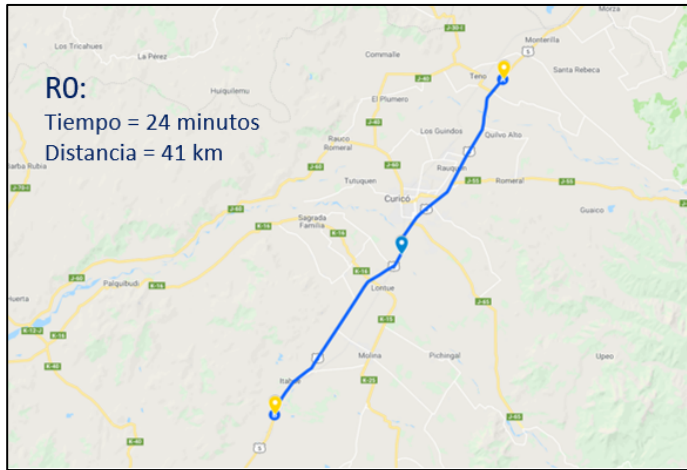
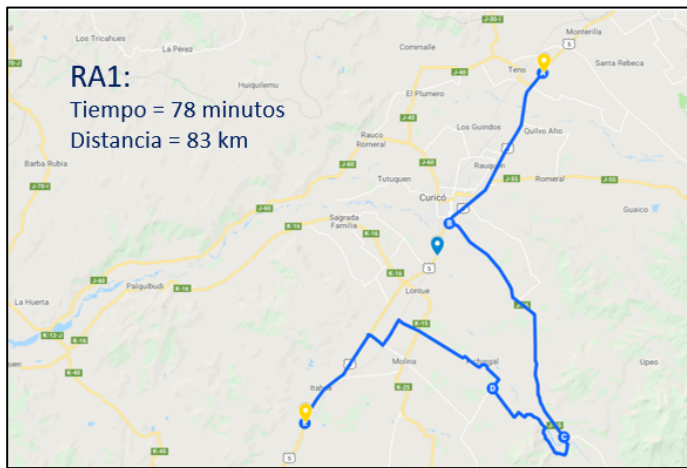


Figura 6. Diagrama de flujo de búsqueda de ruta alternativa óptima ante corte de puente.

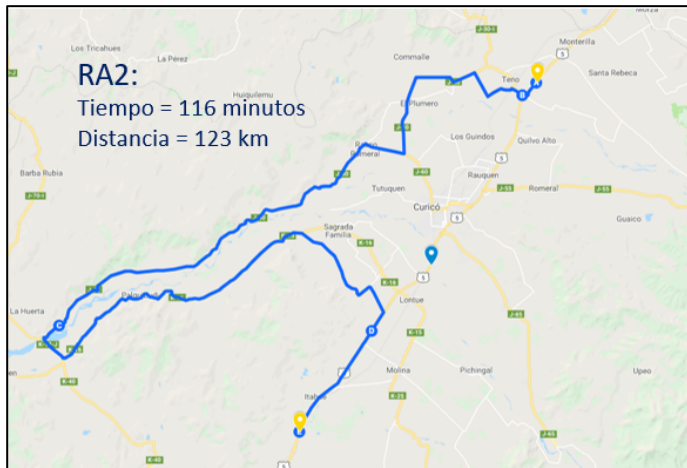
En la Figura 7 se presenta el mismo ejemplo del puente del cauce Lontué, mostrando la ruta base (RO_{A-B}) y dos rutas alternativas existentes que unen A y B que no pasan por el puente P ($RA1_{A-B}$ y $RA2_{A-B}$). Para cada una de estas rutas alternativas se cuantifica el tiempo de viaje entre A y B. Dado que el tiempo de viaje de la ruta alternativa 1 (78 min) es menor al tiempo de la ruta alternativa 2 (116 min), se tiene que la $RA1_{A-B}$ es la ruta alternativa óptima (RA^*).



$R0$



$RA1_{A-B} = RA^*$



$RA2_{A-B}$

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, Echaveguren & Chamorro, 2018). 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.

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.

En el presente estudio, los puentes de la Ruta 5 se consideraron críticos en cuanto a su redundancia al cruzar el umbral de criticidad impuesto por el grado de debilidad de tiempo de viaje (Pokharel & Ieda, 2016).

Un puente P es considerado crítico si su grado de debilidad es mayor o igual a 2,0. Este umbral de criticidad permite conocer de manera preliminar cuáles son los puentes de la Ruta 5 más vulnerables estratégicamente en término del aumento de tiempo de viaje ante una falla del puente. El grado de debilidad (α) se define matemáticamente como:

$$\alpha = \frac{t_{RA^*}}{t_{RO}} \quad (2)$$

De esta forma se define el tiempo crítico ($t_{critico}$) igual a $2t_{RO}$. En otras palabras, si la ruta alternativa óptima de un puente P tiene un tiempo de viaje asociado entre A y B mayor a $2t_{RO}$, el puente P es considerado crítico por su baja redundancia a nivel de red.

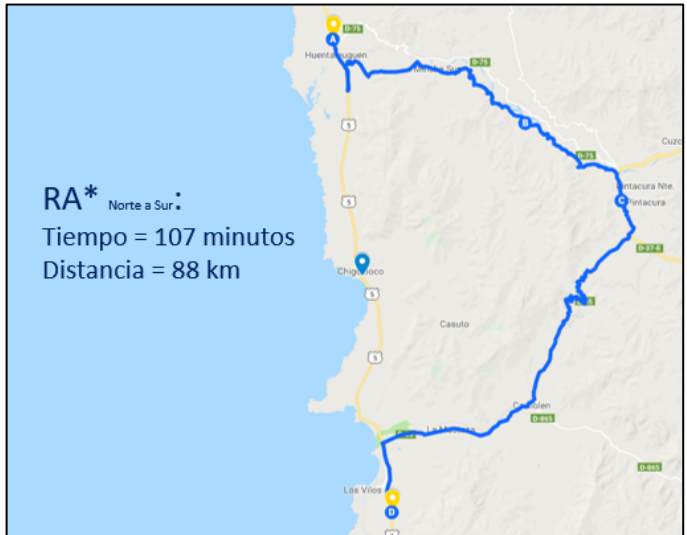
$$t_{RA^*} > t_{critico} = 2,0 * t_{RO} \quad (3)$$

Para efectos del estudio se considera crítico aquellas rutas donde al existir un corte en el elemento P se cruza el umbral de criticidad en ambos sentidos. Esto implica que, al recorrer de norte a sur o de sur a norte por la Ruta 5, el tiempo de viaje de la ruta alternativa alcanza valores mayores o iguales a 2,0 veces la ruta base. Aquellas rutas que presentan criticidad en una de las dos direcciones son denominadas semi-críticas.

En la Figura 8 se presenta como ejemplo el caso de la ruta que cruza el Puente Chigualoco, el cual desde norte a sur tiene un tiempo de viaje de 107 minutos ($\alpha = 4,28$), y de sur a norte tiene un tiempo de viaje de 28 minutos ($\alpha = 1,28$).



R0



RA Norte a Sur*



RA Sur a Norte*

Figura 8. Rutas alternativas óptimas ante corte de Puente Chigualoco

4. Puentes Críticos de la Ruta 5

A partir del criterio de criticidad de redundancia definido se identificaron 27 puentes críticos en el tramo de la Ruta 5 evaluado (Caldera-Pargua), el cual contiene 195 puentes. Nuevamente se destaca que los puentes con doble calzada (oriente-poniente) fueron considerados como un solo conjunto de puentes en la evaluación, pues se analiza la redundancia simulando la falla de todas las estructuras en la vecindad del puente evaluado. En el Anexo B se encuentra el detalle de los 195 puentes.

Los 27 puentes identificados superan el umbral de tiempo de viaje establecido. En otras palabras, la ruta alternativa óptima ante el corte de alguno de estos puentes tiene un tiempo de viaje asociado mayor a 2 veces el tiempo base ($2t_{R0}$).

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 Figura 9 se presenta el número de puentes críticos de la Ruta 5 identificados para cada macro-zona del país.



Zona	Desde	Hasta	Nº Puentes Evaluados	Nº Puentes Críticos	% Puentes Críticos
Norte	Caldera	Santiago	27	5	18,5%
Centro	Santiago	Chillán	60	7	11,7%
Centro-Sur	Chillán	Temuco	49	6	12,2%
Sur	Temuco	Pargua	58	9	15,5%
TOTAL			195	27	13,8%

Figura 9. Cantidad de puentes críticos de la Ruta 5 por macro-zona de Chile

En términos absolutos, la mayor cantidad de puentes críticos de la Ruta 5 se encuentran ubicados principalmente entre Temuco y Pargua. Sin embargo, en términos relativos se observa que el tramo Caldera-Santiago 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 macrozona, mostrando su ubicación junto con los aumentos porcentuales de 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 5 puentes críticos, los que cruzan los cauces Choapa, Conchalí, Los Molles, el Pangal y Petorca. Así, hay dos puentes críticos en la Región de Coquimbo y tres puentes críticos en la Región de Valparaíso.

Se resalta que los puentes correspondientes a Los Molles y el Pangal tienen una ruta alternativa óptima con tiempo de viaje superior a 5 veces el tiempo de la ruta base por el puente sin falla. Además, es importante mencionar que, debido a la cercanía entre ambos puentes, estos elementos tienen la misma ruta alternativa óptima. Por otro lado, el tercer puente perteneciente a la región de Valparaíso, que cruza el río Petorca, sobrepasa por 2% el umbral.

La Figura 10 presenta la información de aumento de tiempo de viaje ante un eventual corte puntual para los 5 puentes críticos identificados en el tramo Caldera-Santiago.



N°	Región	Río/Estero	Tiempo (min)		
			R0	RA	α
1	Coquimbo (IV)	Choapa	25	66	2,64
2	Coquimbo (IV)	Conchalí	25	67	2,68
3	Valparaíso (V)	Los Molles	25	154	6,16
4	Valparaíso (V)	El Pangal	26	154	5,92
5	Valparaíso (V)	Petorca	26	53	2,04

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 7 puentes críticos con bajo nivel de redundancia. Se destaca que los 7 puentes identificados se encuentran en la Región del Maule. El puente que cruza el cauce Perquilauquén, delimita la Región del

Maule y la Región del Biobío y se resalta que este puente es el elemento con mayor grado de debilidad ante una falla de la infraestructura.

En la Figura 11 se muestra el detalle de los 7 puentes críticos de la Ruta 5 en la macrozona Centro-Sur.

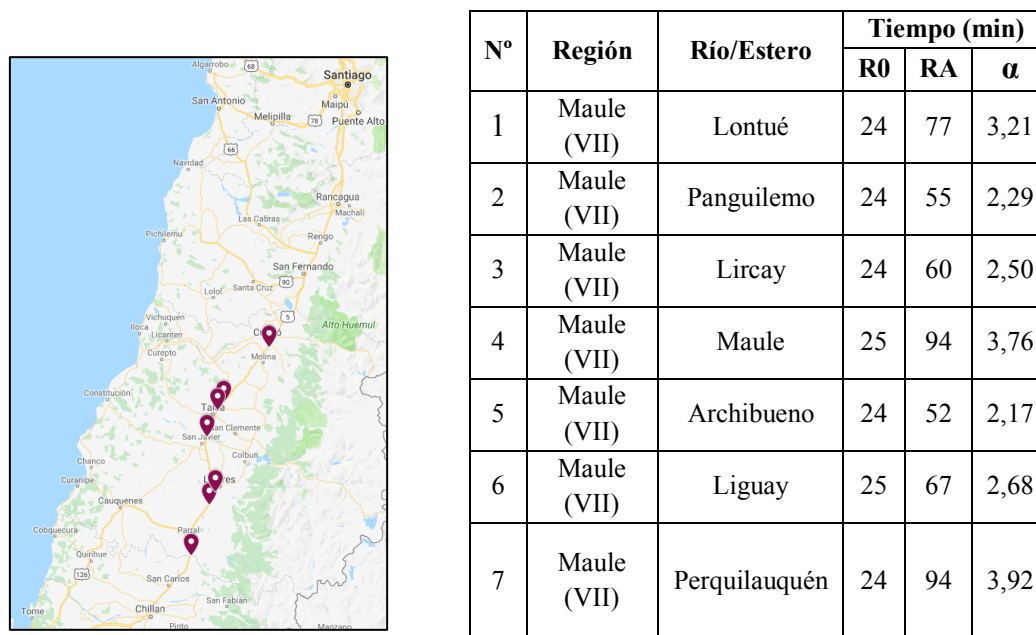


Figura 11. Puentes críticos de la Ruta 5 entre Santiago y Chillán

c) Zona Centro-Sur (Chillán-Temuco)

Al estudiar la redundancia de los puentes de la Ruta 5 entre Chillán y Temuco se identificaron 6 puentes críticos. De este conjunto de puentes, 5 se ubican en la Región del Biobío y el restante en la Región de La Araucanía.

El puente que cruza el río Renaico es el segundo con mayor grado de debilidad, al igual que en la macro zona anterior, este puente es también quien delimita la Región de Biobío y la región de La Araucanía. En específico, un corte de dicho puente implica que el tiempo de viaje entre A y B sea más de 3 veces el tiempo base de viaje sin corte. El puente que presenta mayor grado de debilidad es el que atraviesa el río Malleco, alcanzando sobre 3,5 veces el tiempo base de viaje.

La Figura 12 resume la información del aumento de distancia y tiempo de viaje asociado al corte de los 6 puentes críticos de esta macro-zona del país.

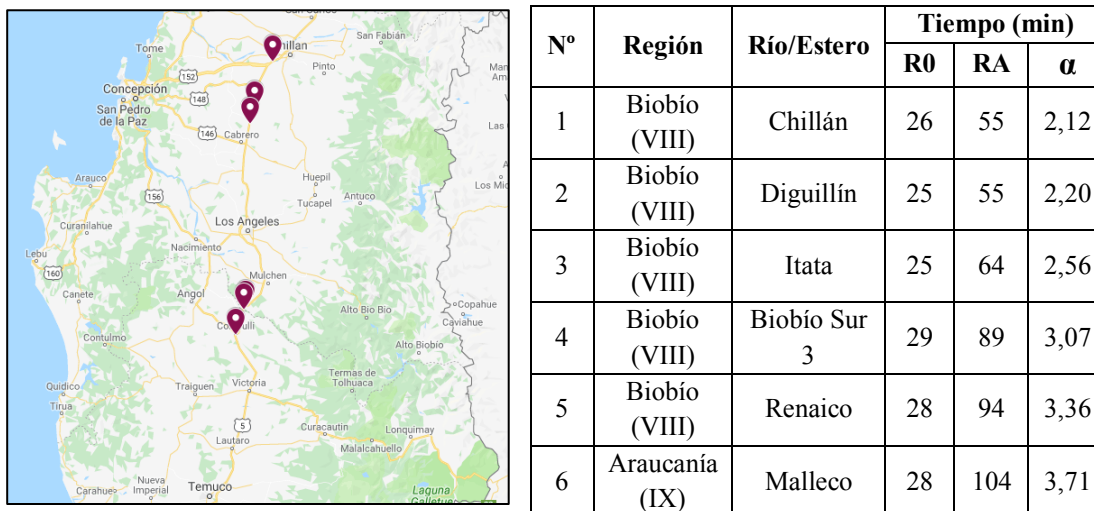


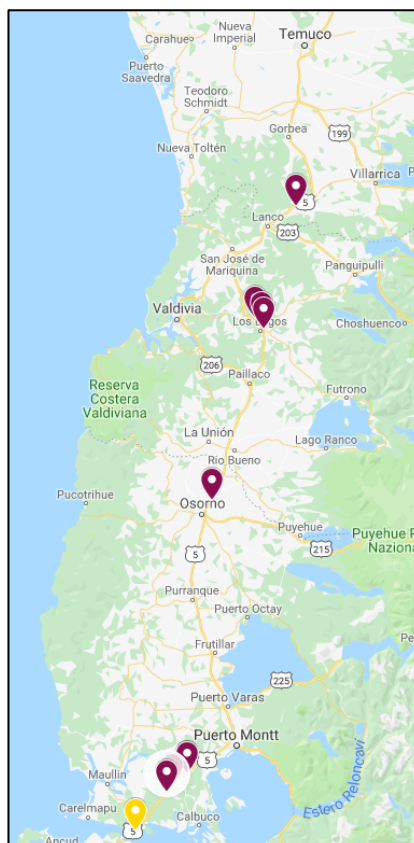
Figura 12. Puentes críticos de la Ruta 5 entre Chillán y Temuco

d) Zona Sur (Temuco-Pargua)

En el último tramo evaluado de la Ruta 5 (Temuco-Pargua) se identificaron 9 puentes con baja redundancia. El único de la Región de la Araucanía es el puente Lo Vásquez 2; los puentes de Cuni, Calle-Calle y Curaco son los 3 puentes críticos de la Región de Los Ríos; los puentes de Yutrecó, Gómez, Guada, Tenio y Tambor son los puentes críticos de la Región de Los Lagos.

Los dos puentes críticos con mayor grado de debilidad corresponden a Huillinco, Cuni y Calle-Calle. Cabe destacar que estos 3 puentes tienen la misma ruta alternativa óptima. Lo mismo ocurre con los puentes Gómez, Guada, Tenio y Tambor, donde la ruta alternativa es similar para todos.

En la Figura 13 se muestra el listado y ubicación de los 9 puentes críticos identificados entre Temuco y Pargua.



N°	Región	Río/Estero	Tiempo (min)		
			R0	RA	α
1	Araucanía (IX)	Lo Vasquéz 2	30	74	2,47
2	Los Ríos (XIV)	Huillinco	29	65	2,24
3	Los Ríos (XIV)	Cuni	29	67	2,31
4	Los Ríos (XIV)	Callecalle	29	65	2,24
5	Los Lagos (X)	Yutreco	25	54	2,16
6	Los Lagos (X)	Gomez	26	53	2,04
7	Los Lagos (X)	Guada	25	53	2,12
8	Los Lagos (X)	Tenio	25	51	2,04
9	Los Lagos (X)	Tambor	25	51	2,04

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

5. Puentes Semi-Críticos de la Ruta 5

Se identificaron 20 puentes semi-críticos, esto quiere decir que solo en un sentido de la vía la ruta alternativa óptima supera el umbral de criticidad, es decir, el tiempo de viaje de la ruta alternativa óptima es mayor o igual a 2,0 veces el tiempo base. En la Figura 14 se presentan los puentes semi-críticos.



Zona	Desde	Hasta	N° Puentes Evaluados	N° Puentes Semi-Críticos	% Puentes Semi-Críticos
Norte	Caldera	Santiago	27	5	18,5%
Centro	Santiago	Chillán	60	5	8,3%
Centro-Sur	Chillán	Temuco	49	6	12,2%
Sur	Temuco	Parga	58	4	6,9%
TOTAL			195	20	10,3%

Figura 14. Cantidad de puentes Semi-críticos de la Ruta 5 por macro-zona de Chile

La mayor cantidad de puentes semi-críticos de la Ruta 5 se encuentran ubicados entre Chillán y Temuco. Sin embargo, en términos relativos, al igual que con los puentes críticos, se observa que el tramo Caldera-Santiago es el que presenta el mayor porcentaje de puentes semi-críticos de la Ruta 5.

A continuación, se presenta el detalle de los puentes semi-críticos identificados en cada macro-zona, mostrando su ubicación junto con los aumentos porcentuales de tiempo de viaje para los dos sentidos, y señalando el sentido que no cumple con el criterio de criticidad (N = de norte a sur / S = de sur a norte).

a) Zona Norte (Caldera-Santiago)

Se identificaron 5 puentes semi-críticos en esta macro-zona. Los que cruzan los cauces Chigualoco, y Quilimari pertenecen a la Región de Coquimbo; Guanquen y El Cobre pertenecen a la Región de Valparaíso; el puente Chacabuco pertenece a la Región Metropolitana.

Se resalta la repetición de patrón encontrada en los puentes críticos, donde entre más al norte de la macro-zona, el grado de debilidad es mayor. Para Chigualoco, Quilimari y Guanquen en el sentido de norte a sur, el tiempo de viaje óptimo supera en más de 4 veces el de la ruta base.

De igual forma, se destaca que la dirección que no posee una ruta alternativa óptima es, para la macro-zona norte, siempre la dirección de norte a sur.

La Figura 15 presenta la información de aumento de tiempo de viaje ante un eventual corte puntual para los 5 puentes semi-críticos identificados en el tramo Caldera-Santiago.



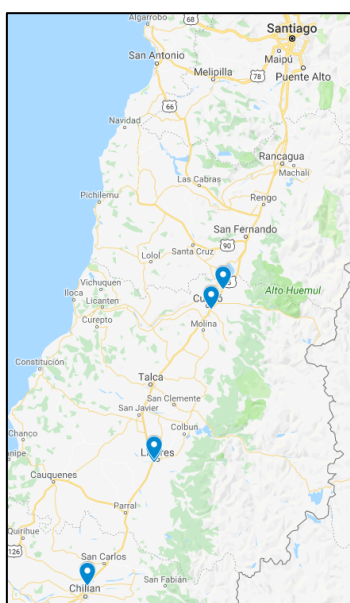
Nº	Región	Río/Estero	Tiempo (min)			
			R0	D	RA	α
1	Coquimbo (IV)	Chigualoco	25	N	107	4,28
				S	28	1,12
2	Coquimbo (IV)	Quilimari	25	N	135	5,40
				S	35	1,40
3	Valparaíso (V)	Guanquen	24	N	148	6,17
				S	37	1,54
4	Valparaíso (V)	El Cobre	26	N	66	2,54
				S	33	1,27
5	Metropolitana (XIII)	Chacabuco	26	N	54	2,08
				S	30	1,15

Figura 15. Puentes semi-críticos de la Ruta 5 entre Caldera y Santiago

b) Zona Centro (Santiago-Chillán)

Se identificaron 5 puentes semi-críticos, que corresponden a Teno 1, Guaquillo, Batuco 2 y Achibueno 1 que se encuentran en la Región de Maule, y el último, que cruza el Río Ñuble, en la Región de Biobío.

De los puentes 3 presentan criticidad en el sentido de norte a sur, y 2 de ellos en la dirección de sur a norte. Se destaca que los puentes que cruzan los ríos/esteros Teno, Guaquillo y Ñuble, la ruta alternativa óptima en la dirección que cruza el umbral, lo supera en tan solo un 2%.



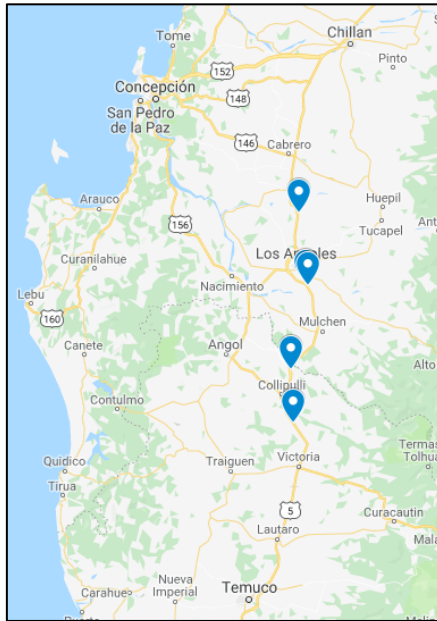
N°	Región	Río/Estero	Tiempo (min)			
			R0	D	RA	α
1	Maule (VII)	Teno 1	25	N	51	2,04
				S	38	1,52
2	Maule (VII)	Guaquillo	24	N	43	1,79
				S	49	2,04
3	Maule (VII)	Batuco 2	23	N	55	2,39
				S	33	1,43
4	Maule (VII)	Achibueno 1	24	N	56	2,33
				S	33	1,38
5	Biobío (VIII)	Ñuble	26	N	44	1,69
				S	53	2,04

Figura 16. Puentes semi-críticos de la Ruta 5 entre Santiago y Chillán

c) Zona Centro-Sur (Chillán-Temuco)

En el tramo Chillán a Temuco se encontraron 6 puentes semi-críticos. Los que atraviesan los Ríos/Esteros las Pozas, Nancagua, Cholguane y Duqueco pertenecen a la Región de Biobío, mientras lo que atraviesan Mininco y Huequen pertenecen a la Región de la Araucanía.

Todos los puentes semi-críticos de la Región de Biobío superan el umbral de criticidad en el sentido de norte a sur, por el contrario, los pertenecientes a la Región de la Araucanía lo superan en la ruta alternativa con sentido de sur a norte.



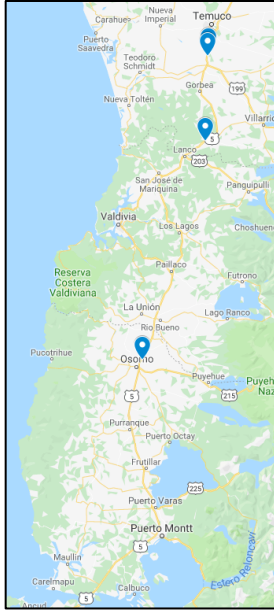
Nº	Región	Río/Estero	Tiempo (min)			
			R0	D	RA	α
1	Biobío (VIII)	las Pozas	24	N	48	2,00
				S	32	1,33
2	Biobío (VIII)	Nancagua	27	N	63	2,33
				S	47	1,74
3	Biobío (VIII)	Cholguahue	27	N	64	2,37
				S	49	1,81
4	Biobío (VIII)	Duqueco	27	N	64	2,37
				S	47	1,74
5	Araucanía (IX)	Mininco	29	N	50	1,72
				S	75	2,59
6	Araucanía (IX)	Huequen	28	N	33	1,18
				S	77	2,75

Figura 17. Puentes semi-críticos de la Ruta 5 entre Chillán y Temuco.

d) Zona Sur (Temuco-Pargua)

El último tramo, la Ruta 5 presenta 4 puentes semi-críticos, de los cuales Huilquico, Pelales y Lo Vásquez pertenecen a la Región de la Araucanía, y la ruta que atraviesa Tufilco es de la Región de Los Lagos.

En este tramo, las 4 rutas superan el umbral de criticidad cuando se recorre en sentido de norte a sur. Es importante destacar que los puentes que pasan por los ríos/esteros Huilquico, Pelales y Tufilco superan el umbral en apenas 8%, y el puente restante correspondiente a Lo Vásquez 2 lo supera en 24%. Sin embargo, en sentido de sur a norte toma un tiempo extra de 10% de la ruta base del tramo.



Nº	Región	Río/Estero	Tiempo (min)			
			R0	D	RA	α
1	Araucanía (IX)	Huilquico	28	N	59	2,11
				S	48	1,71
2	Araucanía (IX)	Pelales	28	N	58	2,07
				S	48	1,71
3	Araucanía (IX)	Lo Vásquez 1	30	N	74	2,47
				S	33	1,10
4	Los Lagos (X)	Tufilco	25	N	54	2,16
				S	48	1,92

Figura 18. Puentes semi-críticos de la Ruta 5 entre Temuco y Parga

6. Propuestas de Aumento de Resiliencia Estratégica de la Ruta 5 a Nivel de Red

6.1 Estrategias de Aumento de Redundancia de Rutas Críticas en Ruta 5

Tras la identificación de los 27 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 críticos de la Ruta 5. Estas soluciones se determinan en base de la definición de un umbral de distancia estimado como 1,5 veces la distancia de la ruta base.

El umbral se define en base a la velocidad máxima de una ruta estándar de caminos urbanos y a la brecha otorgada por el grado de debilidad de la ruta. De esta forma, al admitir un grado de debilidad de 2,0, el tiempo extra de la ruta alternativa equivale a 1,0 veces el tiempo de la ruta base. Por otro lado, se reconoce como que 60 km/hr es la velocidad máxima de caminos urbanos (Decreto N°1728, 2003).

Con ambos antecedentes, y en consideración que la Ruta 5 admite una velocidad máxima de 120 km/hr (Decreto N°1728, 2003), se determina que en el tiempo extra con la velocidad estándar es posible recorrer 0,5 veces la distancia de la ruta base. Puesto lo anterior, se define el umbral (β) en 1,5 veces la distancia base de la ruta.

$$\beta = \frac{d_{RA*}}{d_{RO}} \quad (4)$$

Se definen así dos estrategias para aumentar la redundancia de la Ruta 5.

Estrategia 1 – E1

En este ejercicio, la ruta alternativa óptima es considerada como de bajo estándar si la distancia de viaje asociada entre A y B (sin pasar por P) (d_{RA^*}) es menor a 1,5 veces la distancia base de la Ruta 5.

$$d_{RA^*} < 1,5 * d_{R0} \quad (5)$$

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 construir un puente nuevo que permita acortar la ruta alternativa en términos de distancia recorrida, más bien conviene mejorar el estándar de la infraestructura de la ruta alternativa óptima actual.

Estrategia 2 – E2

La ruta alternativa óptima es considerada como de alta distancia si la distancia de viaje asociada entre A y B (sin pasar por P) (d_{RA^*}) es mayor a 1,5 veces la distancia base de la Ruta 5. Se definió este umbral debido a que las rutas que superan esta cota presentan un aumento sustancial de distancia de viaje (más de 50%), permitiendo así, descartar la opción de mejorar el estándar de la ruta en post de disminuir el tiempo de viaje.

$$d_{RA^*} \geq 1,5 * d_{R0} \quad (6)$$

Para este escenario, se propone como solución la formulación de una nueva ruta alternativa para aumentar la resiliencia de la Ruta 5. Dicha ruta puede o no cruzar por el río/estero que cruza el elemento P. Lo relevante es permitir recorrer de A a B (y viceversa) cumpliendo con el criterio de criticidad.

a) Mejoramiento de estándar de caminos alternativos (Estrategia 1 – E1)

El hecho de que la ruta alternativa óptima entre A y B, considerando corte en P, 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 una velocidad media de viaje significativamente menor a la de diseño de la Ruta 5.

La Tabla 2 ilustra los 14 puentes críticos de la Ruta 5 que no sobrepasan el umbral β de distancia. Para esas rutas, se propone mejorar el estándar de los caminos que conforman la ruta alternativa óptima a estos puentes críticos, la distancia que es necesaria mejorar (Δd) se presenta en la tabla.

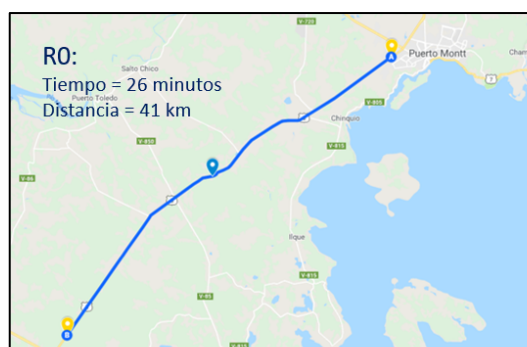
En resumen, se requiere mejorar el estándar de 275 km de caminos secundarios alternativos, cabe destacar que aquellas rutas alternativas que coinciden con otra, se contabiliza exclusivamente una vez.

Tabla 2. Puentes críticos de la Ruta 5 con ruta alternativa de baja distancia.

Nº	Región	Zona	Río/Estero	Distancia (d)			
				R0	RA*	β	Δd
1	Coquimbo (VI)	Norte	Conchali	43	51	1,19	17,00
2	Valparaíso (V)	Norte	Petorca	44	65	1,48	13,00
3	Maule (VII)	Centro	Lircay	41	54	1,32	31,00
4	Maule (VII)	Centro	Achibueno	41	49	1,20	16,00
5	Biobío (VIII)	Centro - Sur	Chillán	42	52	1,24	16,00
6	Biobío (VIII)	Centro - Sur	Diguillín	41	48	1,17	19,00
7	Araucanía (IX)	Sur	Lo Vasquez 2	48	63	1,31	27,00
8	Los Ríos (XIV)	Sur	Cuni	45	52	1,16	30,00
9	Los Ríos (XIV)	Sur	Callecalle	45	66	1,47	43,00
10	Los Lagos (X)	Sur	Yutreco	41	59	1,44	24,00
11	Los Lagos (X)	Sur	Gomez	41	51	1,24	5,00
12	Los Lagos (X)	Sur	Guada	41	51	1,24	0,00
13	Los Lagos (X)	Sur	Tenio	41	59	1,44	0,00
14	Los Lagos (X)	Sur	Tambor	41	60	1,46	34,00

La Figura 19 muestra el puente del cauce Gómez de la Región de Los Lagos. La ruta alternativa de este puente tiene una distancia de viaje de 51 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 53 minutos, lo que implica un grado de debilidad de 2,04 respecto al tiempo base de viaje.

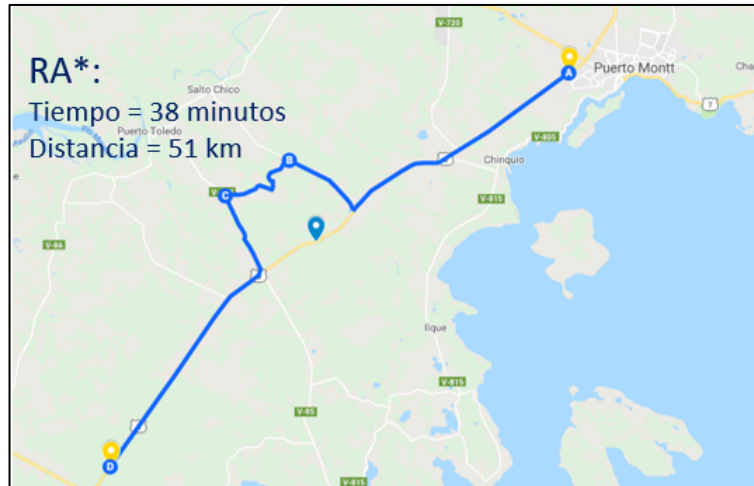
Este es una de las rutas que presentan puentes críticos de la Ruta 5 en la que se propone mejorar el estándar del camino alternativo. Dicha ruta también es utilizada como alternativa para los puentes que cruzan Guada, Tenio y Tambor. Esta solución mantendría la distancia de viaje alternativa, pero permitiría reducir sustancialmente el tiempo de viaje por esa ruta alternativa óptima.



a) Ruta Base



b) Ruta Alternativa Óptima



c) Ruta Alternativa Óptima con mejoramiento de estándar

Figura 19. Mejoramiento de estándar de camino alternativo a Puente Gómez

b) Construcción de rutas alternativas (Estrategia 2 – E2)

Para casos de puentes que superan el umbral β de distancia, la implementación de esta estrategia produciría un cambio en la ruta alternativa óptima, pues el nuevo puente alternativo formaría una nueva ruta con un menor tiempo de viaje respecto a la ruta alternativa óptima actual.

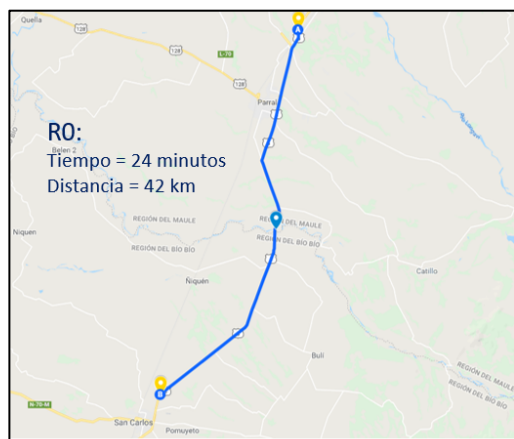
En la Tabla 3 se muestran los 13 puentes críticos de la Ruta 5 que traspasan el umbral de distancia. De esta forma, se propone construir un puente alternativo para cada uno de los puentes listado.

Tabla 3. Puentes críticos de la Ruta 5 con ruta alternativa de alta distancia.

N°	Región	Zona	Río/Estero	Distancia (d)		
				R0	RA*	β
1	Coquimbo (IV)	Norte	Choapa	41	64	1,56
2	Valparaíso (V)	Norte	Los Molles	43	132	3,07
3	Valparaíso (V)	Norte	El Pangal	44	132	3,00
4	Maule (VII)	Centro	Lontué	41	83	2,02
5	Maule (VII)	Centro	Panguilemo	41	64	1,56
6	Maule (VII)	Centro	Maule	41	94	2,29
7	Maule (VII)	Centro	Liguay	42	72	1,71
8	Maule (VII)	Centro	Perquillauquén	42	93	2,21
9	Biobío (VIII)	Centro - Sur	Itata	41	66	1,61
10	Biobío (VIII)	Centro - Sur	Biobío Sur 3	46	114	2,48
11	Biobío (VIII)	Centro - Sur	Renaico	45	120	2,67
12	Araucanía (IX)	Centro - Sur	Malleco	44	97	2,20
13	Los Ríos (XIV)	Sur	Huillinco	45	68	1,51

La ubicación, dimensionamiento y diseño de los puentes alternativos a los puentes listados en la Tabla 3 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. Una ruta propuesta puede no incluir un puente en ella.

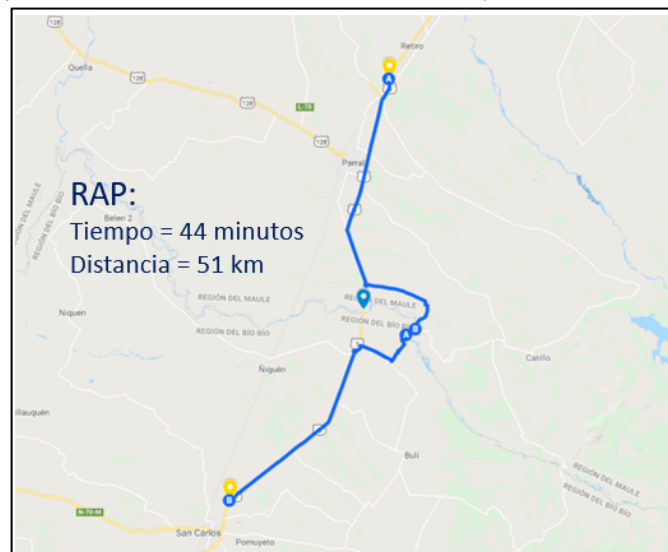
La Figura 20 ilustra el Puente Perquilauquén, el cual tiene una ruta alternativa óptima asociada a un grado de debilidad de 3,92 ($RO = 24$ min y $RA^* = 94$ min) y un coeficiente β de 2,21 ($RO = 42$ km y $RA^* = 93$ km). Para este puente, que presenta un importante aumento de tiempo de viaje y de distancia de viaje, se propone la construcción de un puente alternativo (Figura 18c y 18d). 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 18 es solo un ejemplo.



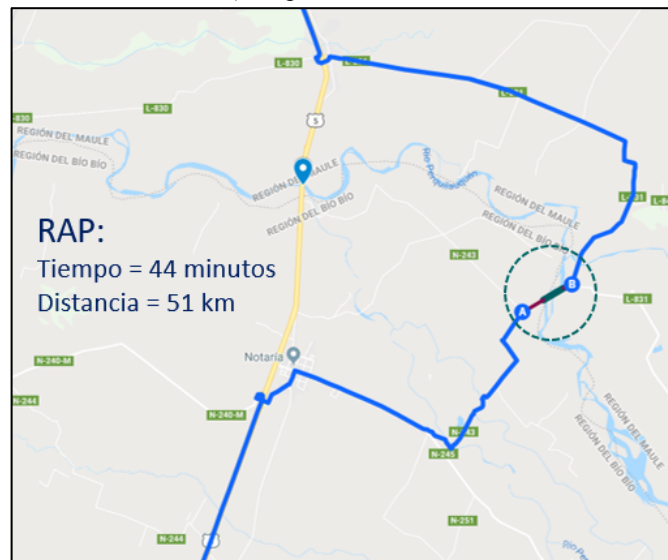
a) Ruta Base



b) Ruta Alternativa Óptima



c) Propuesta de Puente



d) Propuesta de Puente ampliado; Camino de 557 metros y Puente de 393 metros.

Figura 20. Construcción de puente alternativo a Puente Perquilauquén

6.2 Estrategias de Aumento de Redundancia de Rutas Semi-Críticas en Ruta 5

Con respecto a los puentes semi-críticos, no se propone una solución puntual para el puente y/o la dirección que trasgrede el umbral de criticidad; sino que es propuesto un plan de acción. El presente estudio de redundancia, se enmarca en la resiliencia de las redes frente a eventos naturales, por lo que el plan de acción se adscribe al mismo marco.

Las rutas consideradas como semi-críticas, por definición tienen una ruta alternativa, en alguno de los dos sentidos (norte a sur o sur a norte), que tiene un tiempo de viaje mayor a 2,0 veces el de la ruta base. Sin embargo, en la otra dirección el tiempo de viaje es menor y no se traspasa el umbral de criticidad de tiempo.

Frente a un evento natural se deberá colocar un quiebre en la vía que permita el acceso desde ambos sentidos, por medio de bandereros. Esto implica colocar un puesto de control en el inicio y final donde el camino está restringido y permitir la circulación de vehículos en la calzada contraria. Ahora bien, la Ruta 5 tiene la particularidad de presentar 2 pistas por calzada, de modo, que se permite el flujo simultáneo en ambas direcciones.

En la Figura 21 se presenta un ejemplo de este para el Puente Chigualoco. Los puntos en rojo corresponden a los puntos de control. Esto permite el tránsito en ambos sentidos, y por ende, una ruta alternativa con tiempo de viaje menor al crítico ($2t_{RO}$).



Figura 21. Puntos de control para Puente Chigualoco.

7. Propuesta de Solución para Puentes Críticos

Con el fin de enriquecer el estudio, en la siguiente sección se presentan soluciones para todos los puentes críticos, basándose en las estrategias E1 y E2, mejoramiento de estándar de vías y construcción de nuevas vías respectivamente.

E1 – Mejoramiento de Estándar

Los puentes críticos que presentan rutas alternativas de baja distancia ($\beta < 1,5$) tienen como propuesta de solución el mejoramiento en el estándar. Esto se resume en una mejora de 275 km a lo largo de la ruta 5 en el tramo de Caldera a Pargua, el detalle por macro-zona se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4. Mejoramiento de estándar según macro-zona.

Zona	Desde	Hasta	Km Mejorar	% Mejora
Norte	Caldera	Santiago	30	10,9%
Centro	Santiago	Chillán	47	17,1%
Centro-Sur	Chillán	Temuco	35	12,7%
Sur	Temuco	Pargua	163	59,3%
TOTAL			275	100%

E2 – Construcción de nuevas vías

Para los casos de ruta alternativa óptima de alta distancia ($\beta > 1,5$), se propone la construcción de una nueva ruta alternativa para cada caso; existen rutas críticas que comporten la solución, buscando disminuir los costos que estás producirían. Se presenta una ruta alternativa propuesta (RAP) para los 13 puentes que entran dentro de esta categoría.

Las soluciones propuestas se basan en las imágenes satelitales de GoogleMaps, determinando, no solo un camino óptimo en términos de tiempo, sino que también una solución geográficamente factible. Las propuestas están integradas por el mejoramiento de estándar de caminos, desarrollo de nuevos caminos y/o puentes; para efectos de velocidad en nuevos caminos o caminos mejorados, se considera una velocidad de 60 km/hr.

1. Puente Choapa



Figura 22. Ruta Alternativa Óptima Puente Choapa

RAP = Camino de 1.030 metros y puente de 132 metros.

$$\alpha_{RA^*} = 2,64 ; \beta_{RA^*} = 1,56$$

$$\alpha_{RAP} = 1,56 ; \beta_{RAP} = 1,12$$

2. Puente Los Molles



Figura 23. Ruta Alternativa Óptima Puente Los Molles

RAP = Camino de 251 metros y puente de 27 metros.

$$\alpha_{RA^*} = 6,16 ; \beta_{RA^*} = 3,14$$

$$\alpha_{RAP} = 1,20 ; \beta_{RAP} = 1,02$$

3. Puente el Pangal

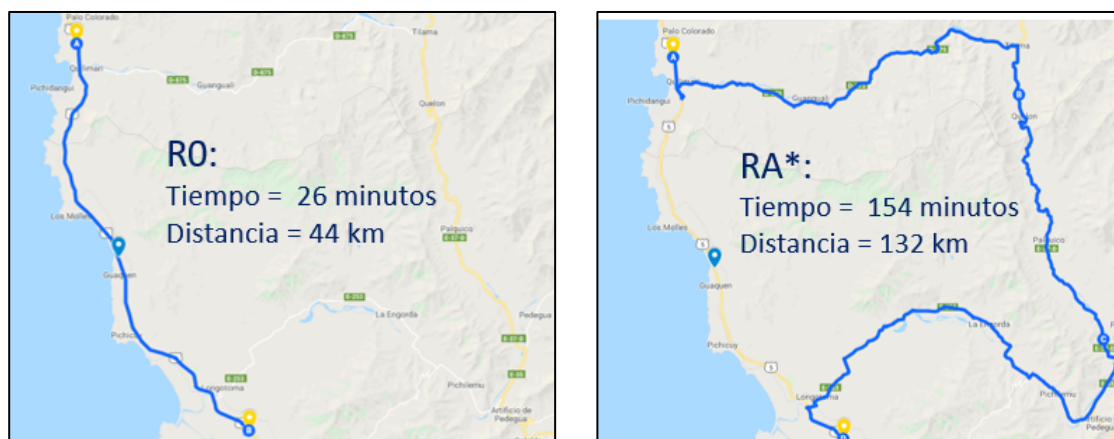




Figura 24. Ruta Alternativa Óptima Puente el Pangál

RAP = Camino de 105 metros.

$$\alpha_{RA^*} = 2,64 ; \beta_{RA^*} = 1,56$$

$$\alpha_{RAP} = 1,56 ; \beta_{RAP} = 1,12$$

4. Puente Lontué



Figura 25. Ruta Alternativa Óptima Puente Lontué

RAP = Camino de 264 metros y puente de 132 metros.

$$\alpha_{RA^*} = 3,46 ; \beta_{RA^*} = 1,88$$

$$\alpha_{RAP} = 1,25 ; \beta_{RAP} = 1,37$$

5. Puente Panguilemo

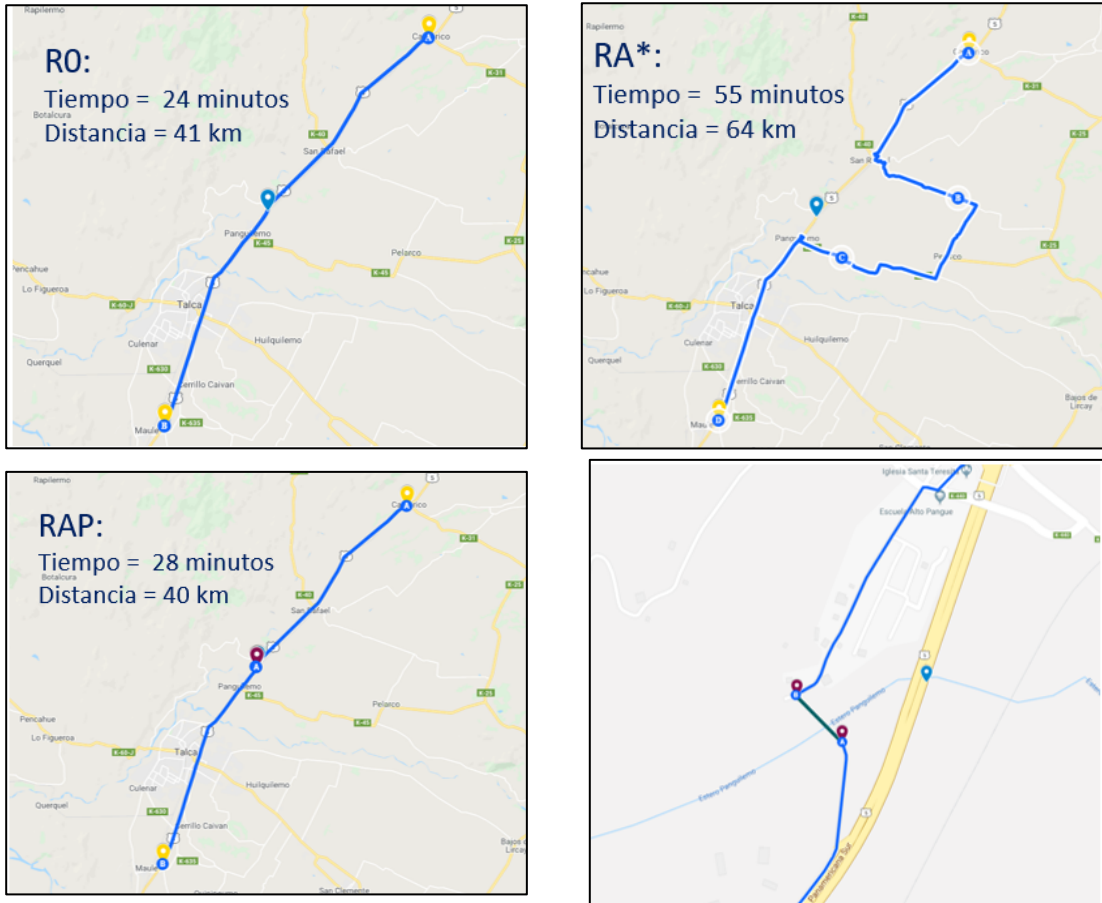


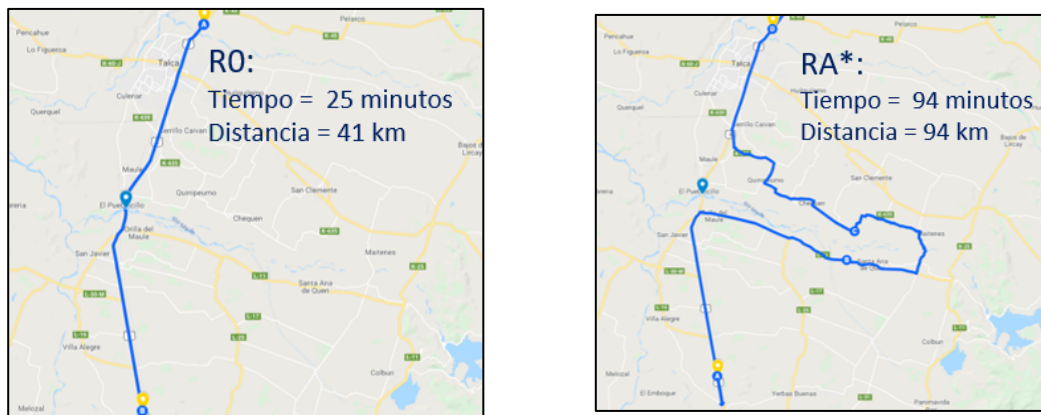
Figura 26. Ruta Alternativa Óptima Puente Panguilemo

RAP = Puente de 107 metros.

$\alpha_{RA^*} = 2,29$; $\beta_{RA^*} = 1,56$

$\alpha_{RAP} = 1,17$; $\beta_{RAP} = 0,98$

6. Puente Maule



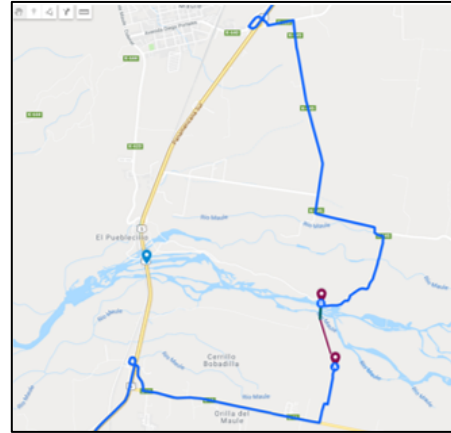


Figura 27. Ruta Alternativa Óptima Puente Maule

RAP = Camino de 768 metros y Puente de 233 metros.

$$\alpha_{RA^*} = 3,76 ; \beta_{RA^*} = 2,29$$

$$\alpha_{RAP} = 1,72 ; \beta_{RAP} = 1,15$$

7. Puente Liguay

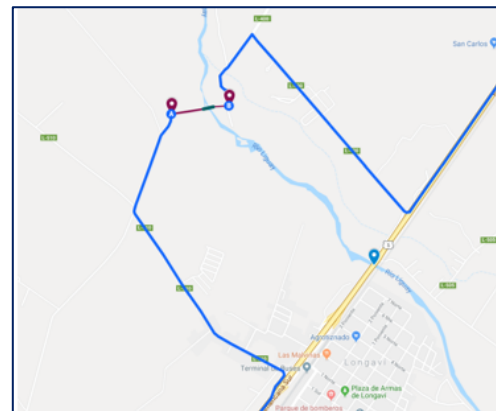
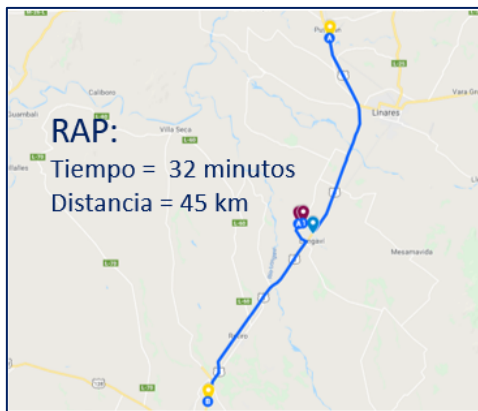
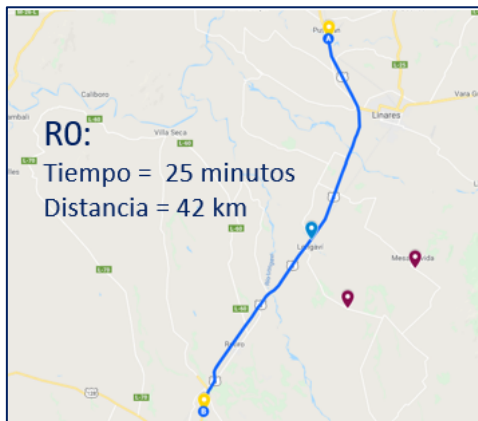


Figura 28. Ruta Alternativa Óptima Puente Liguay

RAP = Camino de 339 metros y Puente de 69 metros.

$$\alpha_{RA^*} = 2,68 ; \beta_{RA^*} = 1,71$$

$$\alpha_{RAP} = 1,28 ; \beta_{RAP} = 1,07$$

8. Puente Perquilauquén

En la Figura 20 se presenta la propuesta de solución para este puente.

Camino de 557 metros y Puente de 393 metros

$$\alpha_{RA^*} = 3,92 ; \beta_{RA^*} = 2,21$$

$$\alpha_{RAP} = 1,83 ; \beta_{RAP} = 1,21$$

9. Puente Itata

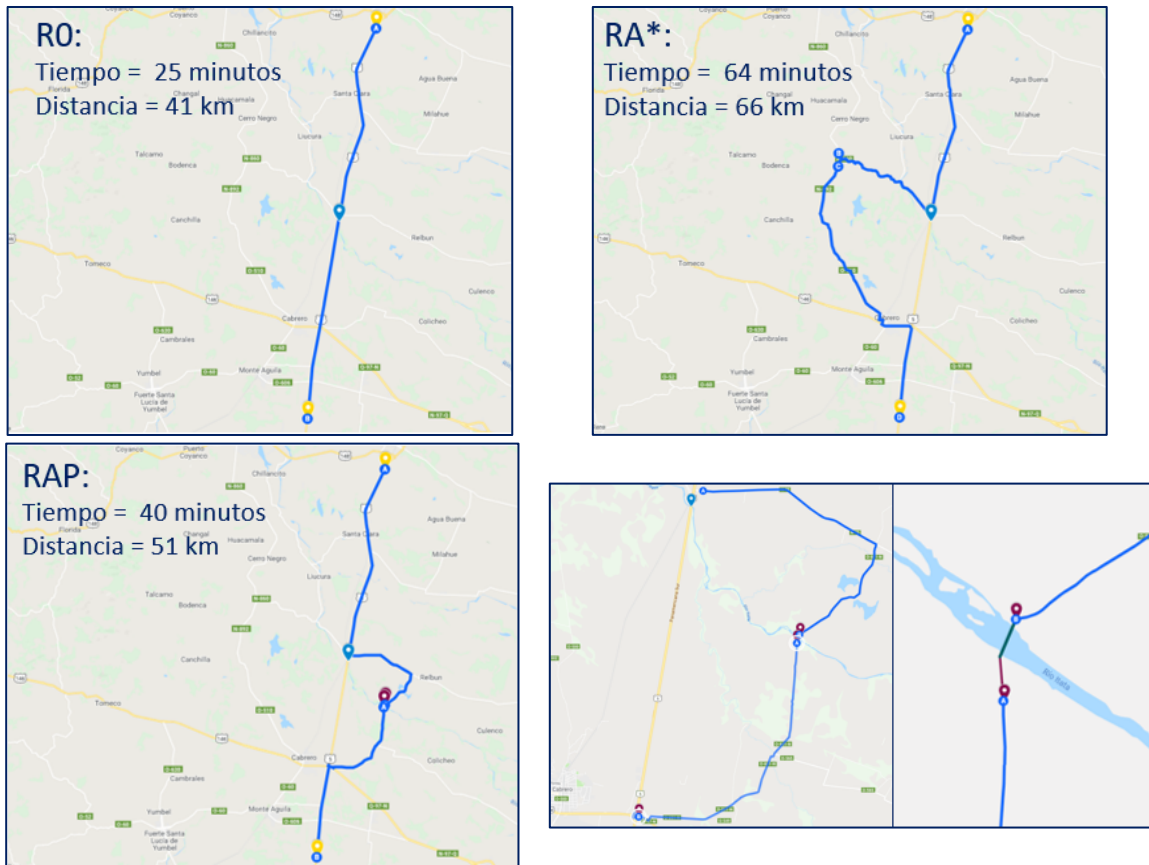


Figura 29. Ruta Alternativa Óptima Puente Itata

RAP = Mejorar estándar de 22 kilómetros, Camino de 143 metros y Puente de 136 metros.

$$\alpha_{RA^*} = 2,56 ; \beta_{RA^*} = 1,61$$

$$\alpha_{RAP} = 1,60 ; \beta_{RAP} = 1,24$$

10. Puente Biobío Sur

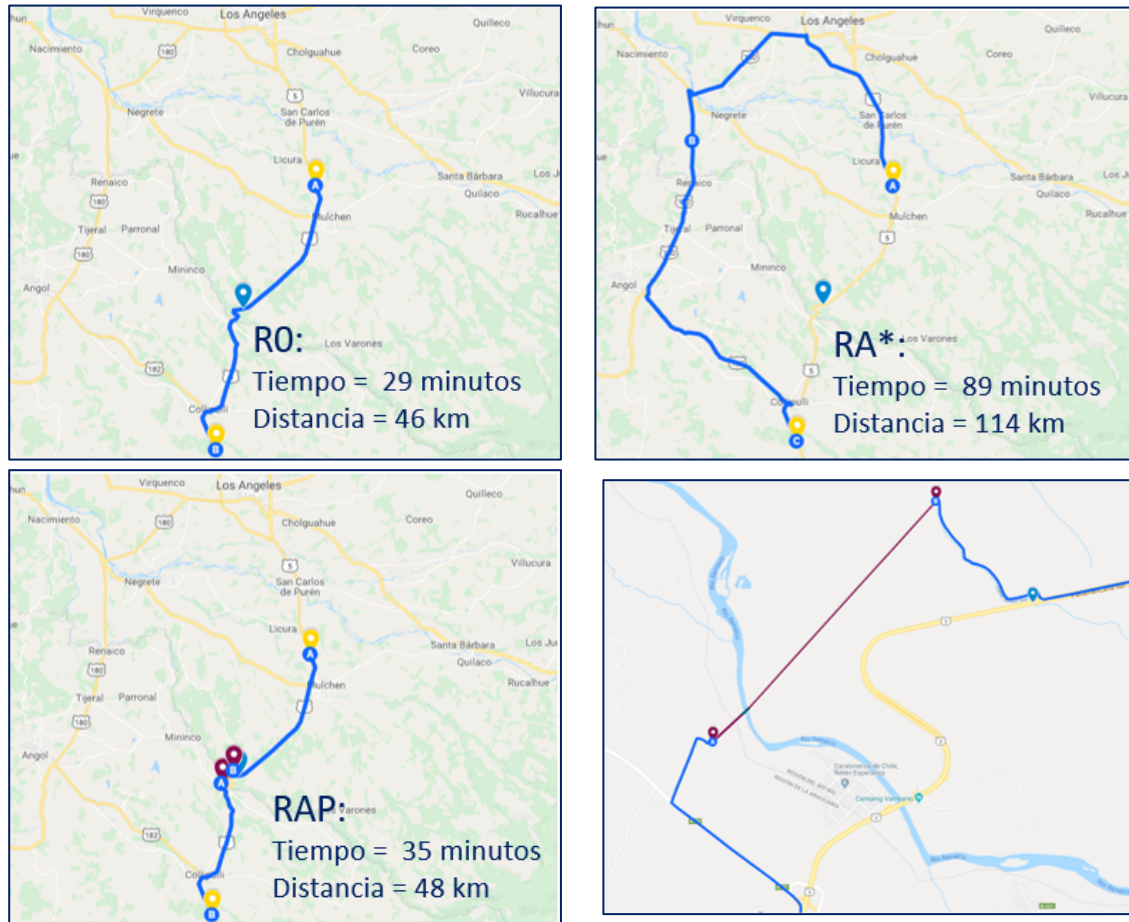


Figura 30. Ruta Alternativa Óptima Puente Biobío Sur

RAP = Camino de 2.309 metros y Puente de 66 metros.

$$\alpha_{RA^*} = 3,07 ; \beta_{RA^*} = 2,48$$

$$\alpha_{RAP} = 1,21 ; \beta_{RAP} = 1,04$$

11. Puente Renaico

Como propuesta de solución para el puente Renaico se utiliza la misma desarrollada para el puente de Biobío Sur, de modo que para dos puentes críticos se desarrolla una ruta alternativa óptima.

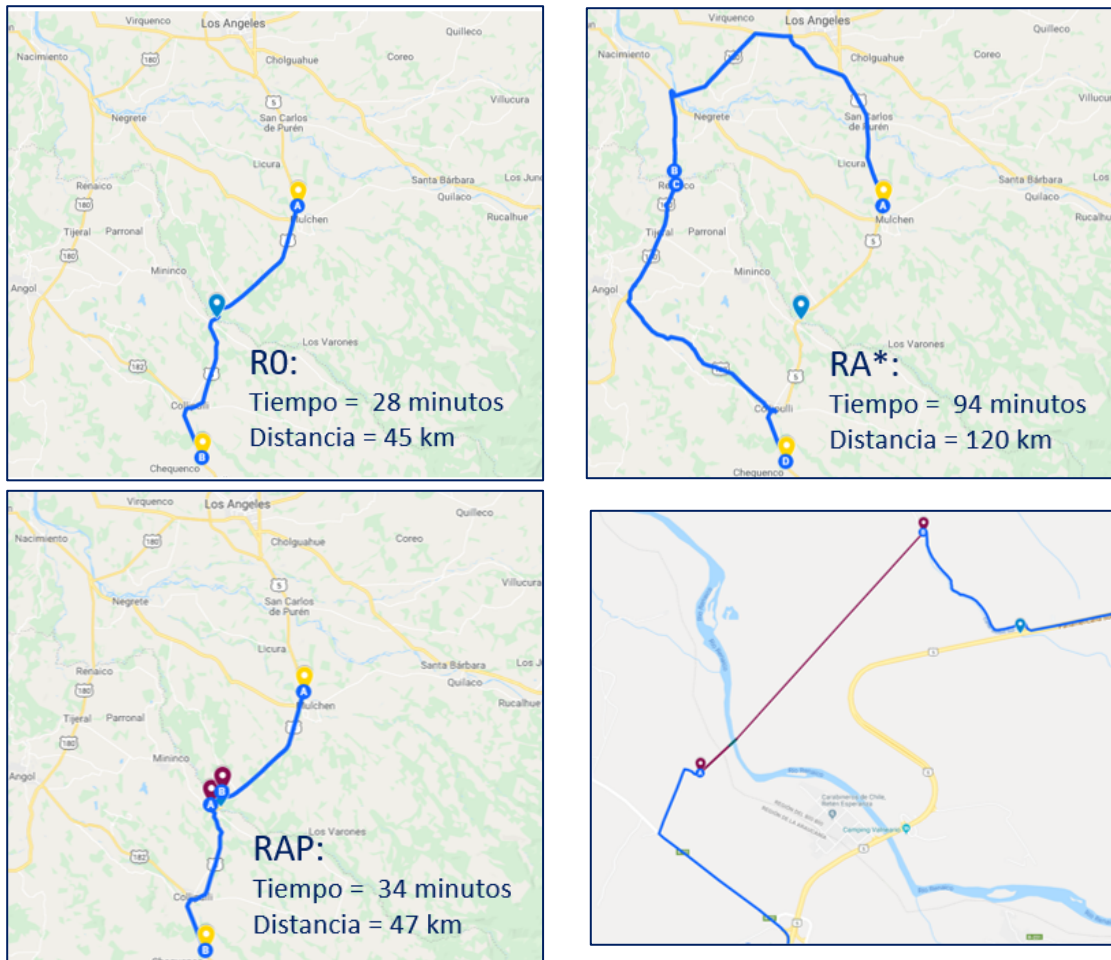


Figura 31. Ruta Alternativa Óptima Puente Renaico

RAP = Camino de 2.309 metros y Puente de 66 metros.

$$\alpha_{RA^*} = 3,36 ; \beta_{RA^*} = 2,67$$

$$\alpha_{RAP} = 1,21 ; \beta_{RAP} = 1,04$$

12. Puente Malleco

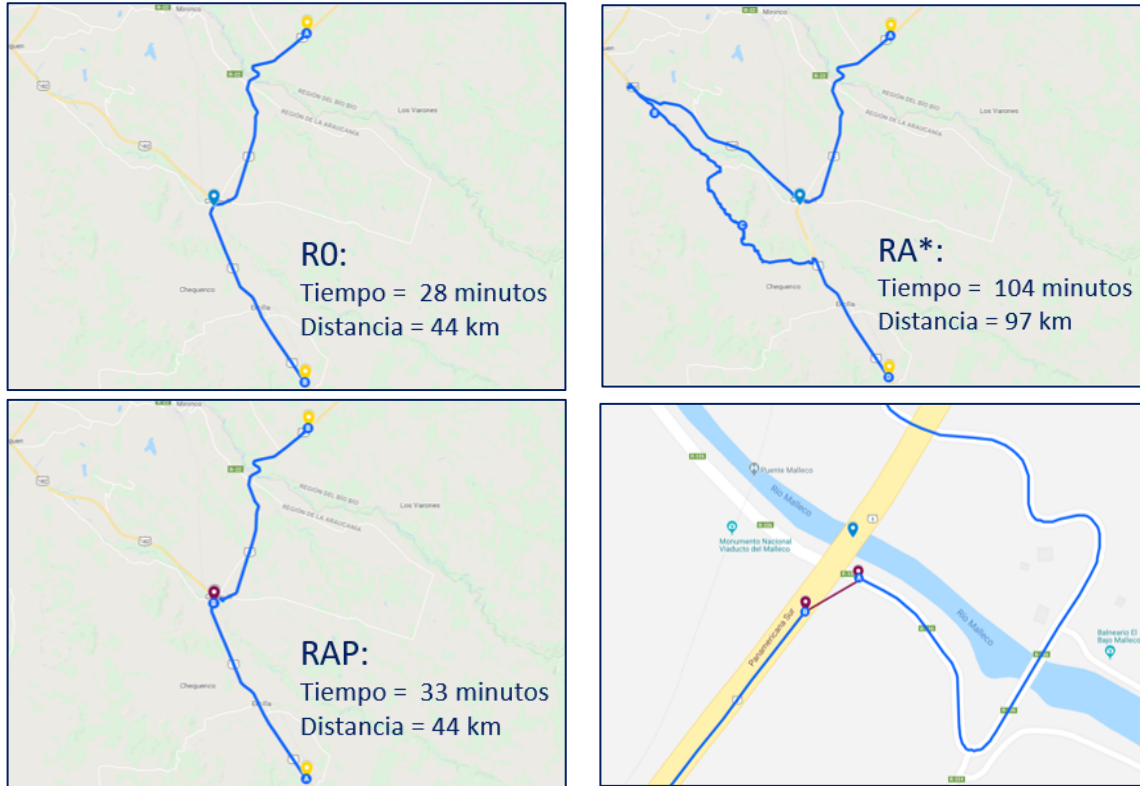


Figura 32. Ruta Alternativa Óptima Puente Malleco

RAP = Camino de 53 metros.

$$\alpha_{RA^*} = 3,71 ; \beta_{RA^*} = 2,20$$

$$\alpha_{RAP} = 1,18 ; \beta_{RAP} = 1,00$$

13. Puente Huillinco



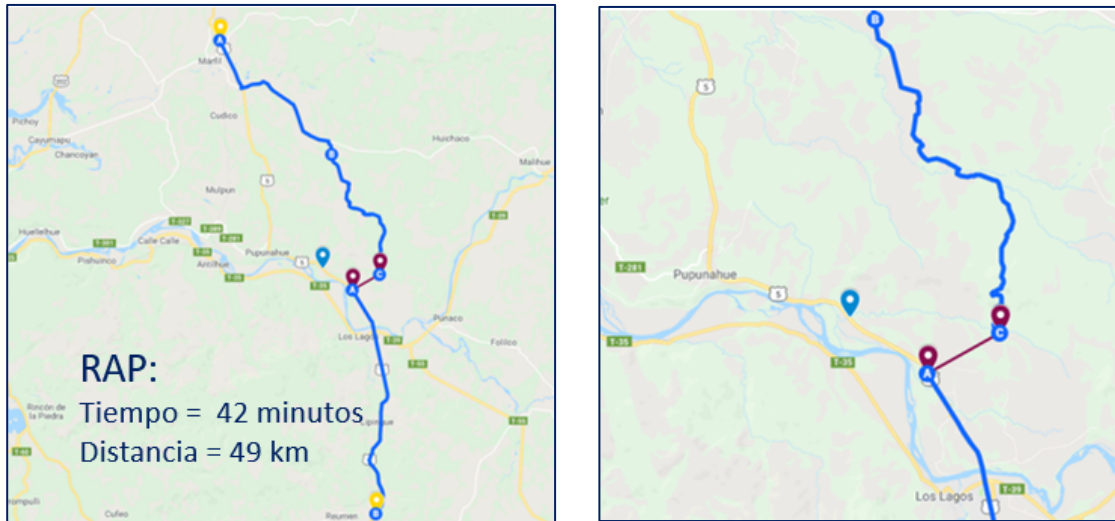


Figura 33. Ruta Alternativa Óptima Puente Huillincó

RAP = Mejorar estándar de 24 kilómetros y Camino de 2.501 metros.

$$\alpha_{RA^*} = 2,24 ; \beta_{RA^*} = 1,51$$

$$\alpha_{RAP} = 1,45 ; \beta_{RAP} = 1,09$$

8. 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 los 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 27 puentes críticos en la Ruta 5 entre Caldera y Pargua, a través del criterio de grado de debilidad, y 20 puentes semi-críticos, lo que representa el 13,8% y 10,5% de los puentes de ese tramo, respectivamente. Esto se traduce en que un 24,1% de los puentes presentan baja redundancia, ya sea en ambos sentidos permitidos o uno de ellos. La medición del tiempo de viaje asociado a la ruta alternativa óptima de cada puente, y su posterior contraste con las 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 Biobío. Respecto a su ubicación también resulta interesante mencionar que 2 puentes críticos están en límites regionales.

Vale destacar que la macro-zona relativamente más vulnerable corresponde a la zona norte (Caldera-Santiago), donde se alcanza un 18,5% de puentes críticos y 18,5%, también, de

puentes semi-críticos. Esto implica que el 37% de los puentes de la zona presentan algún grado de debilidad.

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. El estudio de redundancia realizado en este informe analiza la vulnerabilidad en su dimensión estratégica. En otras palabras, se estudia el caso de cómo variaría el 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.

En concreto, para robustecer estratégicamente dichos puentes y dotar así de resiliencia a la Ruta 5 se propone construir 13 rutas alternativas y mejorar el estándar de 275 km de caminos secundarios o alternativos a la Ruta 5. De igual modo, se propone una metodología para el comportamiento de los puentes semi-críticos frente a la ocurrencia de un evento natural.

En el presente informe, se propone soluciones para la construcción de los 9 puentes, junto a la continuidad de caminos. La clasificación de los puentes alternativos requeridos según su longitud total (Ministerio de Obras Públicas, 2016b) es la siguiente:

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

Se propone la construcción de 8.320 metros y el mejoramiento de 46 kilómetros, a una velocidad máxima de 60 km/hr.

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.

9. 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.

Bautista, A. F. (2018). Análisis de accesibilidad y conectividad de la red vial intermunicipal en el micro-sistema regional de la provincia Centro en Boyacá, Colombia. *Perspectiva Geográfica*, 23(1). doi: 10.19053/01233769.8058

Bengtsson, J., & Tómasson, B. (2008). *Vulnerability and risk analysis of the road infrastructure in Reykjavik*. Reykjavík, Islandia.

Berdica, K., & Mattsson, L. (2007). Vulnerability: A Model-Based Case Study of the Road Network in Stockholm. In A. Murray & T. Grubestic, *Critical Infrastructure Reliability and Vulnerability* (pp. 81 - 106). New York: Springer.

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 Solminiñac, H. & Dagá, J. (2018) *Análisis de Resiliencia Estratégica de Puentes de la Ruta 5 entre Caldera y Parga*. Documento de Trabajo N°38, CLAPES UC.

De Solminiñac, H, Echaveguren, T. & Chamorro, A. (2018). *Gestión de Infraestructura Vial*. Santiago, Chile: Ediciones Universidad Católica de Chile, 3ª Edición.

Decreto N° 1728. Ministerio de Obras Públicas. Santiago, Chile, 3 de enero de 2003.

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.

Erath, A., Birdsall, J., Axhausen, K., & Hajdin, R. (2009). Vulnerability Assessment Methodology for Swiss Road Network. *Transportation Research Record: Journal Of The Transportation Research Board*, 2137(1), 118-126. doi: 10.3141/2137-13

Furtado, M. (2015). *Measuring the Resilience of Transportation Networks Subject to Seismic Risk* (Master of Science in Civil Engineering). University of Massachusetts Amherst.

Jenelius, E., Peterson, T., & Mattsson, L. (2006). *Road network vulnerability: Identifying important links and exposed regions*. Conferencia Göteborg.

Lu, Q., & Peng, Z. (2011). Vulnerability Analysis of Transportation Network under Scenarios of Sea Level Rise. *Transportation Research Record: Journal Of The Transportation Research Board*, 2263(1), 174-181. doi: 10.3141/2263-19

MCEER. (2006). *MCEER'S Resilience Framework*. Buffalo, NY.

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.

Nicholson, A. (2007). Road network unreliability: impact assessment and mitigation. *International Journal Of Critical Infrastructures*, 3(3/4), 346. doi: 10.1504/ijcis.2007.014115

Pokharel, R., & Ieda, H. (2016). Road Network Evaluation from a Reliability Perspective: An Accessibility and Network Closure Vulnerability Approach. *Asian Transport Studies*, 4, pp 37 - 56. doi: <https://doi.org/10.11175/eastsats.4.37>

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.

Taylor, M., & D'Este, G. (2007). Transport Network Vulnerability: a Method for Diagnosis of Critical Locations in Transport Infrastructure Systems. *Critical Infrastructure*, 9-30. doi: 10.1007/978-3-540-68056-7_2

Taylor, M., Sekhar, S., & D'Este, G. (2006). Application of Accessibility Based Methods for Vulnerability Analysis of Strategic Road Networks. *Networks And Spatial Economics*, 6(3-4), 267-291. doi: 10.1007/s11067-006-9284-9

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.

10. Anexos

Anexo A: Determinación de Criterios de Criticidad

Inicialmente en el estudio se consideró utilizar los parámetros de tiempo de viaje (α) y distancia de viaje (β) para determinar criticidad, tal que:

$$\alpha = \frac{t_{RO}}{t_{RA*}} < 2 \quad \text{y} \quad \beta = \frac{d_{RO}}{d_{RA*}} < 1,5$$

Los criterios, siendo ambos independientes, fueron establecidos de modo que:

- T_b (tiempo bueno): es cuando el tiempo extra varía entre 0% y 50% extra.
- T_me (tiempo medio): es cuando el tiempo extra varía entre 50% y 100% extra.
- T_m (tiempo malo): es cuando el tiempo extra excede el 100% extra.
- D_b (distancia buena): es cuando el tiempo extra varía entre 0% y 50% extra.
- D_m (distancia mala): es cuando el tiempo extra excede el 50% extra.

\	T_b	T_me	T_m
D_b	0% - 50% \ 0% - 50%	0% - 50% \ 50% - 100%	0% - 50% \ > 100%
D_m	> 50% \ 0% - 50%	> 50% \ 50% - 100%	> 50% \ > 100%

Al utilizar estos dos criterios se pueden presentar 6 casos; los casos con su comportamiento se exponen a continuación.

Caso		Comportamiento
T_b	D_b	Caso factible, donde la distancia y el tiempo aumentan ligeramente.
T_me	D_b	Caso factible, donde la distancia aumenta ligeramente y el tiempo aumenta medianamente, esto se explica considerando una ruta alternativa de igual distancia, pero con una velocidad de diseño menor a la ruta principal.
T_m	D_b	Caso factible, donde la distancia aumenta ligeramente y el tiempo aumenta considerablemente, esto se explica considerando una ruta alternativa de igual distancia, pero con una velocidad de diseño menor a la ruta principal.
T_b	D_m	Caso no factible, donde la distancia aumenta considerablemente y el tiempo aumenta ligeramente, dado que la velocidad máxima es de 120 km/h, de aumentar la distancia considerablemente (más de 50%), entonces el tiempo deberá aumentar al menos en un 50% (caso hipotético donde la ruta alternativa también permite 120 km/hr).

T_me	D_m	Caso factible (pero poco probable), donde la distancia aumenta considerablemente y el tiempo aumenta medianamente, se debe cumplir un caso donde la distancia aumente en 50% y la velocidad de diseño de la ruta alternativa debería variar entre 120 km/hr y 90 km/hr.
T_m	D_m	Caso factible, donde la distancia aumenta considerablemente (más del 50%) y el tiempo aumenta considerablemente también (más del 100%).

Es por esto último que el criterio de DISTANCIA no entrega valor al trabajo, para determinar la redundancia de los puentes, los resultados obtenidos son igual con o sin este criterio; siendo solamente relevante el criterio de TIEMPO. Por lo tanto, se propone establecer los criterios como:

1. **Puente con redundancia alta:** El grado de debilidad de la ruta términos de tiempo de viaje es menor o igual a 1,5.
2. **Puentes con redundancia media:** El grado de debilidad de la ruta en términos de tiempo de viaje 1,5 y 2,0.
3. **Puente con redundancia baja (críticos):** El grado de debilidad de la ruta en términos de tiempo de viaje mayor a 2,0.

Anexo B: Estudio de Puentes de Ruta 5, tramo Caldera – Pargua

N°	Región	Zona	Río / Estero	Distancia (km)			Tiempo (min)		
				R0	RA	Rerruteo	R0	RA	Rerruteo
1	Atacama (III)	Norte	Copiapó	44	45	1,02	34	40	1,18
2	Atacama (III)	Norte	Huasco	43	49	1,14	26	38	1,46
3	Coquimbo (IV)	Norte	Elqui	44	45	1,02	35	40	1,14
4	Coquimbo (IV)	Norte	Limari	48	52	1,08	27	51	1,89
5	Coquimbo (IV)	Norte	Choapa	41	64	1,56	25	66	2,64
6	Coquimbo (IV)	Norte	Millahue	41	43	1,05	24	30	1,25
7	Coquimbo (IV)	Norte	X (Huentelauquén)	41	41	1,00	24	27	1,13
8	Coquimbo (VI)	Norte	Chigualoco	41	43	1,05	25	28	1,12
					88	2,15		107	4,28
9	Coquimbo (VI)	Norte	Conchali	43	51	1,19	25	67	2,68
10	Coquimbo (VI)	Norte	Quilimari	43	46	1,07	25	35	1,40
					127	2,95		135	5,40
11	Valparaíso (V)	Norte	Los Molles	43	132	3,07	25	154	6,16
12	Valparaíso (V)	Norte	El Pangal	44	132	3,00	26	154	5,92
13	Valparaíso (V)	Norte	Guaquen	42	47	1,12	24	37	1,54
					127	3,02		148	6,17
14	Valparaíso (V)	Norte	Petorca	44	65	1,48	26	53	2,04
15	Valparaíso (V)	Norte	la Ligua	44	46	1,05	26	33	1,27
16	Valparaíso (V)	Norte	Jaururo	43	46	1,07	26	34	1,31
17	Valparaíso (V)	Norte	Quebradilla	45	45	1,00	28	31	1,11
18	Valparaíso (V)	Norte	Madre	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
19	Valparaíso (V)	Norte	de la Retamilla	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
20	Valparaíso (V)	Norte	Blanquillo	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
21	Valparaíso (V)	Norte	el Cobre	42	45	1,07	26	33	1,27
					88	2,10		66	2,54
22	Valparaíso (V)	Norte	el Carreton	43	45	1,05	26	34	1,31
23	Valparaíso (V)	Norte	el Melon	44	49	1,11	27	38	1,41
24	Valparaíso (V)	Norte	Aconcagua	41	42	1,02	25	29	1,16
25	RM (XIII)	Norte	Chacabuco	45	63	1,40	26	54	2,08
					45	1,00		30	1,15

26	RM (XIII)	Norte	Peldehue	45	54	1,20	26	34	1,31
27	RM (XIII)	Norte	Colina	41	42	1,02	25	32	1,28
28	RM (XIII)	Centro	Mapocho	42	39	0,93	28	26	0,93
29	RM (XIII)	Centro	Maipo 1	41	45	1,10	25	35	1,40
30	RM (XIII)	Centro	Maipo 2	42	45	1,07	26	37	1,42
31	RM (XIII)	Centro	Paine	41	53	1,29	25	45	1,80
32	O'Higgins (VI)	Centro	Peuco	43	44	1,02	27	31	1,15
33	O'Higgins (VI)	Centro	Tronco	43	45	1,05	26	42	1,62
34	O'Higgins (VI)	Centro	Codegua	43	46	1,07	26	36	1,38
35	O'Higgins (VI)	Centro	Cadena	43	42	0,98	25	28	1,12
36	O'Higgins (VI)	Centro	Cachapoal	42	41	0,98	24	28	1,17
37	O'Higgins (VI)	Centro	Tipaume	41	42	1,02	24	29	1,21
38	O'Higgins (VI)	Centro	Claro	40	43	1,08	23	31	1,35
39	O'Higgins (VI)	Centro	Rigolemo	41	49	1,20	24	44	1,83
40	O'Higgins (VI)	Centro	Roma	41	48	1,17	24	37	1,54
41	O'Higgins (VI)	Centro	Antivero	41	42	1,02	24	30	1,25
42	O'Higgins (VI)	Centro	Tiguiririca	41	42	1,02	24	29	1,21
43	O'Higgins (VI)	Centro	Quintano	41	58	1,41	25	47	1,88
44	O'Higgins (VI)	Centro	Chimbarongo	43	59	1,37	26	48	1,85
45	Maule (VII)	Centro	Teno 1	42	51	1,21	25	38	1,52
					53	1,26		51	2,04
46	Maule (VII)	Centro	Teno 2	42	54	1,29	26	51	1,96
47	Maule (VII)	Centro	Guaiquillo	41	64	1,56	24	56	2,33
					47	1,15		43	1,79
49	Maule (VII)	Centro	Lontué	41	83	2,02	24	77	3,21
50	Maule (VII)	Centro	Perhuin	41	42	1,02	24	30	1,25
51	Maule (VII)	Centro	Panguilemo	41	64	1,56	24	55	2,29
52	Maule (VII)	Centro	Lircay	41	54	1,32	24	60	2,50
53	Maule (VII)	Centro	Piduco	41	42	1,02	25	30	1,20
54	Maule (VII)	Centro	Pejerreyes	41	42	1,02	25	27	1,08
55	Maule (VII)	Centro	Colin	41	43	1,05	25	31	1,24
56	Maule (VII)	Centro	Maule 1	41	41	1,00	25	25	1,00
57	Maule (VII)	Centro	Maule	41	94	2,29	25	94	3,76

58	Maule (VII)	Centro	Chanquico	41	42	1,02	24	30	1,25
59	Maule (VII)	Centro	Batuco 1	42	46	1,10	24	38	1,58
60	Maule (VII)	Centro	Abranquíl	42	55	1,31	24	41	1,71
61	Maule (VII)	Centro	Putagán	43	55	1,28	26	41	1,58
62	Maule (VII)	Centro	Batuco 2	41	44	1,07	23	33	1,43
					64	1,56		55	2,39
63	Maule (VII)	Centro	Achibueno 1	41	44	1,07	24	33	1,38
					64	1,56		56	2,33
64	Maule (VII)	Centro	Achibueno	41	49	1,20	24	52	2,17
65	Maule (VII)	Centro	Llollinco	41	44	1,07	24	30	1,25
66	Maule (VII)	Centro	Canoa	41	45	1,10	24	34	1,42
67	Maule (VII)	Centro	Coipo	42	45	1,07	25	40	1,60
68	Maule (VII)	Centro	Liguay	42	72	1,71	25	67	2,68
69	Maule (VII)	Centro	Tengue	42	43	1,02	25	33	1,32
70	Maule (VII)	Centro	Longavi	41	50	1,22	24	43	1,79
71	Maule (VII)	Centro	Guacaneco	41	42	1,02	24	28	1,17
72	Maule (VII)	Centro	Píguchen	40	43	1,08	24	29	1,21
73	Maule (VII)	Centro	Membrillo O Chimbarongo	41	42	1,02	24	28	1,17
74	Maule (VII)	Centro	Colliguay	41	44	1,07	24	33	1,38
75	Maule (VII)	Centro	Parral	41	43	1,05	25	35	1,40
76	Maule (VII)	Centro	Curipeumo	42	45	1,07	24	31	1,29
77	Maule (VII)	Centro	Zanion	43	51	1,19	25	36	1,44
78	Maule (VII)	Centro	la Vega	42	42	1,00	24	26	1,08
79	Maule (VII)	Centro	Perquilauquén	42	93	2,21	24	94	3,92
80	Biobío (VIII)	Centro	Niquen	42	44	1,05	24	32	1,33
81	Biobío (VIII)	Centro	Dollimo	42	43	1,02	25	29	1,16
82	Biobío (VIII)	Centro	Verquico	42	44	1,05	24	36	1,50
83	Biobío (VIII)	Centro	Navotayo	41	41	1,00	24	27	1,13
84	Biobío (VIII)	Centro	las Mercedes	41	43	1,05	25	30	1,20
85	Biobío (VIII)	Centro	Carbonero	41	42	1,02	25	29	1,16
86	Biobío (VIII)	Centro	Litirao	41	42	1,02	25	27	1,08
87	Biobío (VIII)	Centro	Rauco	42	42	1,00	25	33	1,32
88	Biobío (VIII)	Centro	Ñuble	42	59	1,40	26	44	1,69

					64	1,52		53	2,04
89	Biobío (VIII)	Centro - Sur	Chillán	42	52	1,24	26	55	2,12
90	Biobío (VIII)	Centro - Sur	Cauquenes	42	50	1,19	26	49	1,88
91	Biobío (VIII)	Centro - Sur	Larqui	42	46	1,10	25	37	1,48
92	Biobío (VIII)	Centro - Sur	Pitipiti	42	43	1,02	26	33	1,27
93	Biobío (VIII)	Centro - Sur	Gallipavo	42	43	1,02	26	32	1,23
94	Biobío (VIII)	Centro - Sur	Espinal	41	45	1,10	26	38	1,46
95	Biobío (VIII)	Centro - Sur	Palpal	41	42	1,02	25	29	1,16
96	Biobío (VIII)	Centro - Sur	Diguillín	41	48	1,17	25	55	2,20
97	Biobío (VIII)	Centro - Sur	Relbun	41	54	1,32	25	44	1,76
98	Biobío (VIII)	Centro - Sur	Itata	41	66	1,61	25	64	2,56
99	Biobío (VIII)	Centro - Sur	Batuco 3	42	47	1,12	24	36	1,50
100	Biobío (VIII)	Centro - Sur	Laja	42	41	0,98	24	28	1,17
101	Biobío (VIII)	Centro - Sur	Caliboro	42	42	1,00	24	28	1,17
102	Biobío (VIII)	Centro - Sur	las Pozas	42	43	1,02	24	32	1,33
					48	1,14		48	2,00
103	Biobío (VIII)	Centro - Sur	Bollontue	42	54	1,29	24	45	1,88
104	Biobío (VIII)	Centro - Sur	Guaqui	46	74	1,61	27	56	2,07
105	Biobío (VIII)	Centro - Sur	Rarincó	47	43	0,91	27	37	1,37
106	Biobío (VIII)	Centro - Sur	Salto del Perro	44	41	0,93	26	36	1,38
107	Biobío (VIII)	Centro - Sur	el Bolsón	43	39	0,91	25	35	1,40
108	Biobío (VIII)	Centro - Sur	Quilpue	43	39	0,91	25	35	1,40
109	Biobío (VIII)	Centro - Sur	Pailligüe	44	41	0,93	26	36	1,38
110	Biobío (VIII)	Centro - Sur	Nancagua	46	55	1,20	27	51	1,89
					65	1,41		63	2,33
111	Biobío (VIII)	Centro - Sur	Cholguahue	46	51	1,11	27	49	1,81
					65	1,41		64	2,37
112	Biobío (VIII)	Centro - Sur	Duqueco	46	51	1,11	27	47	1,74
					65	1,41		64	2,37
113	Biobío (VIII)	Centro - Sur	Biobío	43	43	1,00	25	29	1,16
114	Biobío (VIII)	Centro - Sur	Junquillos	44	49	1,11	26	42	1,62
115	Biobío (VIII)	Centro - Sur	Bureo	43	47	1,09	26	35	1,35
116	Biobío (VIII)	Centro - Sur	Chumulco	44	52	1,18	27	50	1,85

117	Biobío (VIII)	Centro - Sur	Biobío Sur 1	45	54	1,20	28	54	1,93
118	Biobío (VIII)	Centro - Sur	Biobío Sur 2	46	55	1,20	29	56	1,93
119	Biobío (VIII)	Centro - Sur	Biobío Sur 3	46	114	2,48	29	89	3,07
120	Biobío (VIII)	Centro - Sur	Renaico	45	120	2,67	28	94	3,36
121	Araucanía (IX)	Centro - Sur	Mininco	46	55	1,20	29	50	1,72
					85	1,85		75	2,59
122	Araucanía (IX)	Centro - Sur	Callin	47	48	1,02	29	37	1,28
123	Araucanía (IX)	Centro - Sur	Malleco	44	97	2,20	28	104	3,71
124	Araucanía (IX)	Centro - Sur	Huequen	46	48	1,04	28	33	1,18
					67	1,46		77	2,75
125	Araucanía (IX)	Centro - Sur	Chamichaco	46	48	1,04	28	41	1,46
126	Araucanía (IX)	Centro - Sur	Dumo	40	47	1,18	24	47	1,96
127	Araucanía (IX)	Centro - Sur	Colo	43	46	1,07	26	40	1,54
128	Araucanía (IX)	Centro - Sur	Traiguén	43	47	1,09	26	40	1,54
129	Araucanía (IX)	Centro - Sur	Triauco	43	46	1,07	26	39	1,50
130	Araucanía (IX)	Centro - Sur	Chanco	42	45	1,07	25	39	1,56
131	Araucanía (IX)	Centro - Sur	Quino	41	45	1,10	25	41	1,64
132	Araucanía (IX)	Centro - Sur	el Salto	41	46	1,12	24	40	1,67
133	Araucanía (IX)	Centro - Sur	Perquenco	41	44	1,07	25	32	1,28
134	Araucanía (IX)	Centro - Sur	Quillen	41	46	1,12	25	37	1,48
135	Araucanía (IX)	Centro - Sur	Cautín 1	44	43	0,98	27	42	1,56
136	Araucanía (IX)	Centro - Sur	Cautín 2	44	45	1,02	27	46	1,70
137	Araucanía (IX)	Centro - Sur	Truftruf	44	45	1,02	27	47	1,74
138	Araucanía (IX)	Sur	Metrengo	44	44	1,00	29	30	1,03
139	Araucanía (IX)	Sur	Vilcun	45	56	1,24	28	46	1,64
140	Araucanía (IX)	Sur	Huilquico	44	50	1,14	28	48	1,71
					60	1,36		59	2,11
141	Araucanía (IX)	Sur	Pelales	44	50	1,14	28	48	1,71
					57	1,30		58	2,07
142	Araucanía (IX)	Sur	Tolten	44	45	1,02	27	36	1,33
143	Araucanía (IX)	Sur	Chada	43	52	1,21	26	49	1,88
144	Araucanía (IX)	Sur	Donguil	42	46	1,10	26	34	1,31
145	Araucanía (IX)	Sur	Lo Vásquez 1	48	49	1,02	30	33	1,10

					63	1,31		74	2,47
146	Araucanía (IX)	Sur	Lo Vasquéz 2	48	63	1,31	30	74	2,47
147	Araucanía (IX)	Sur	Cruces 1	45	48	1,07	28	41	1,46
148	Los Ríos (XIV)	Sur	Cruces 2	45	44	0,98	28	30	1,07
149	Los Ríos (XIV)	Sur	Cruces 3	45	45	1,00	28	30	1,07
150	Los Ríos (XIV)	Sur	Cruces 4	45	46	1,02	28	40	1,43
151	Los Ríos (XIV)	Sur	Cruces 5	46	51	1,11	29	45	1,55
152	Los Ríos (XIV)	Sur	Curilelfu	46	46	1,00	29	36	1,24
153	Los Ríos (XIV)	Sur	Pichoy	48	49	1,02	30	36	1,20
154	Los Ríos (XIV)	Sur	Máfil	49	52	1,06	31	39	1,26
155	Los Ríos (XIV)	Sur	Huillinco	45	68	1,51	29	65	2,24
156	Los Ríos (XIV)	Sur	Cuni	45	52	1,16	29	67	2,31
157	Los Ríos (XIV)	Sur	Callecalle	45	66	1,47	29	65	2,24
158	Los Ríos (XIV)	Sur	Huinohuino	45	46	1,02	29	35	1,21
159	Los Ríos (XIV)	Sur	Curaco	45	58	1,29	29	50	1,72
160	Los Ríos (XIV)	Sur	Lumaco	42	45	1,07	27	34	1,26
161	Los Ríos (XIV)	Sur	Demaihue O Radal	42	44	1,05	26	33	1,27
162	Los Ríos (XIV)	Sur	Rucaquilen	41	44	1,07	26	38	1,46
163	Los Ríos (XIV)	Sur	Llollehue	41	48	1,17	25	40	1,60
164	Los Ríos (XIV)	Sur	Niscon	41	41	1,00	25	28	1,12
165	Los Ríos (XIV)	Sur	la Poza	41	54	1,32	25	43	1,72
166	Los Ríos (XIV)	Sur	Traiguén	40	48	1,20	25	42	1,68
167	Los Ríos (XIV)	Sur	Bueno	41	45	1,10	25	34	1,36
168	Los Ríos (XIV)	Sur	Pilmaiquén	41	41	1,00	25	33	1,32
169	Los Lagos (X)	Sur	Tralmahue	41	41	1,00	25	30	1,20
170	Los Lagos (X)	Sur	Chapilcahuín	41	43	1,05	25	38	1,52
171	Los Lagos (X)	Sur	Yutreco	41	59	1,44	25	54	2,16
172	Los Lagos (X)	Sur	Tufilco	41	64	1,56	25	48	1,92
					59	1,44		54	2,16
173	Los Lagos (X)	Sur	Pilauco	41	43	1,05	25	34	1,36
174	Los Lagos (X)	Sur	Llutun	41	42	1,02	25	32	1,28
175	Los Lagos (X)	Sur	Damas	41	42	1,02	25	32	1,28
176	Los Lagos (X)	Sur	Rahue	41	57	1,39	25	45	1,80

177	Los Lagos (X)	Sur	Sagllue	41	47	1,15	25	37	1,48
178	Los Lagos (X)	Sur	Chifin	40	45	1,13	25	35	1,40
179	Los Lagos (X)	Sur	Forrahue	40	44	1,10	25	38	1,52
180	Los Lagos (X)	Sur	Pichillaillay	41	41	1,00	24	28	1,17
181	Los Lagos (X)	Sur	Dollinco	41	48	1,17	25	40	1,60
182	Los Lagos (X)	Sur	la Guacha 1	41	42	1,02	24	30	1,25
183	Los Lagos (X)	Sur	la Guacha 2	41	42	1,02	24	31	1,29
184	Los Lagos (X)	Sur	Burro Chico	41	43	1,05	25	31	1,24
185	Los Lagos (X)	Sur	Burro	41	43	1,05	25	31	1,24
186	Los Lagos (X)	Sur	Mauullín	42	43	1,02	26	32	1,23
187	Los Lagos (X)	Sur	Negro	43	43	1,00	28	37	1,32
188	Los Lagos (X)	Sur	Arenas	42	43	1,02	28	37	1,32
189	Los Lagos (X)	Sur	Trapen	44	44	1,00	29	32	1,10
190	Los Lagos (X)	Sur	Gomez	41	51	1,24	26	53	2,04
191	Los Lagos (X)	Sur	Guada	41	51	1,24	25	53	2,12
192	Los Lagos (X)	Sur	Tenio	41	59	1,44	25	51	2,04
193	Los Lagos (X)	Sur	Tambor	41	60	1,46	25	51	2,04
194	Los Lagos (X)	Sur	Murror	41	60	1,46	28	54	1,93
195	Los Lagos (X)	Sur	de la Maquina	28	21	0,75	20	16	0,80



 [clapesuc](#)

 [@clapesuc](#)

 [clapes_uc](#)

 [clapesuc](#)