



UNIVERSIDAD DE CHILE



**Proyecto InnovaChile – CORFO 15BPE-47225**

---

Estudio y Recomendaciones sobre la  
resiliencia de la infraestructura de la Internet  
chilena

**INFORME TÉCNICO FINAL**

---

Versión 2.0

Diciembre 2018

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>4</b>
<b>2. Antecedentes</b>	<b>8</b>
2.1. Conceptos Generales . . . . .	8
2.2. Incidentes en la red chilena de Internet . . . . .	10
2.3. Proyecto Bienes Públicos . . . . .	11
<b>3. Desarrollo del proyecto</b>	<b>17</b>
3.1. Actividades de levantamiento y validación de información . . . . .	17
3.2. Actividades del estudio de diagnóstico . . . . .	18
3.3. Difusión del conocimiento . . . . .	18
3.3.1. Actividades académicas . . . . .	18
3.3.2. Actividades de transferencia de conocimientos con el mandante . . . . .	20
3.3.3. Difusión Pública . . . . .	21
3.4. Cumplimiento de indicadores y resultados esperados . . . . .	21
<b>4. Bien Público</b>	<b>22</b>
4.1. Información disponible para el presente proyecto . . . . .	22
4.2. Validación de la topología de la red chilena . . . . .	23
4.3. Base de datos geográficamente referenciada . . . . .	23
4.4. Modelo sustentabilidad y disponibilidad Bien Público . . . . .	24
<b>5. Métricas de resiliencia de la Internet chilena</b>	<b>28</b>
5.1. Marco teórico . . . . .	28

---

5.2. Métricas seleccionadas . . . . .	35
5.3. Evaluación de la Internet chilena . . . . .	37
<b>6. Propuestas de mejora para la Internet chilena</b>	<b>39</b>
6.1. Metodología . . . . .	39
6.2. Supuestos . . . . .	44
6.3. Propuesta de tendidos a construir para una Internet resiliente . . . . .	46
6.4. Propuestas alternativas . . . . .	57
6.4.1. Propuesta alternativa 1 . . . . .	57
6.4.2. Propuesta alternativa 2 . . . . .	65
6.5. Evaluación de la solución . . . . .	68
<b>7. Estructura y contenidos informe anual</b>	<b>70</b>
<b>8. Conclusiones</b>	<b>72</b>
<b>9. Anexos</b>	<b>76</b>
9.1. Correspondencia SUBTEL . . . . .	77
9.2. Descripción base de datos . . . . .	90
9.3. Revisión sistemática: métricas de robustez de redes . . . . .	94
9.3.1. Introducción . . . . .	94
9.3.2. Protocolo de estudio de mapeo sistemático . . . . .	96
9.3.3. Resultados . . . . .	100
9.3.4. Conclusiones . . . . .	119
9.4. Revisión sistemática: modelamiento de redes interconectadas . . . . .	120
9.4.1. Método de investigación . . . . .	120
9.4.2. Discusión . . . . .	132
9.4.3. Apéndice: Tablas . . . . .	137
9.5. Situaciones anómalas detectadas . . . . .	148
9.6. Calidad de servicios de telecomunicaciones en zonas extremas y rurales . . . . .	162
<b>10. Bibliografía</b>	<b>163</b>

# Capítulo 1

## Introducción

En los tiempos actuales, la ciudadanía, el gobierno y las empresas, se han ido volviendo cada vez más dependientes de las telecomunicaciones. La plataforma de Internet es una infraestructura habilitante para todos los servicios básicos de la economía nacional (sistemas de pago, transferencia de dinero, información, etc.) y de los servicios avanzados basados en TICs: Internet de las cosas, manejo de emergencias, instalación de servicios globales, etc. Prácticamente todas las áreas de desarrollo prioritarias<sup>1</sup> para el país requieren que Internet funcione correctamente y se mantenga operativa en caso de ataques, fallas parciales y desastres.

La enorme penetración de las redes sociales hace también de la Internet una infraestructura crítica para la ciudadanía en casos de emergencias y catástrofe. El riesgo de falla de este sistema existe, lo que ha quedado demostrado en caso de catástrofes. Para el terremoto del año 2010, muchos puentes se cayeron, causando como daño adicional el corte de fibras que iban en su interior y cortando de raíz la conectividad en las ciudades afectadas. Un estudio realizado por NIC Labs demostró que un 60 % de la Internet chilena quedó sin conectividad por varias horas (en esa época, a nadie le importó, Internet no era aún una plataforma crítica)<sup>2</sup>. En enero 2015, un incendio en la Región del Bío Bío dejó a buena parte del territorio nacional sin comunicación telefónica e Internet, lo mismo ocurrió en marzo del mismo año en la Región de la Araucanía. En 2015 también, un alud de barro en Atacama tuvo impactos similares, dejando sin Internet al norte de Chile. En diciembre 2017, un corte intencional de fibra óptica dejó a Osorno desconectado. Así encontramos eventos que periódicamente nos recuerdan lo poco robusta que es la infraestructura de Internet del país, mientras el desarrollo tecnológico nos va haciendo cada vez más dependientes de ella<sup>3</sup>.

La criticidad de la infraestructura de Internet puede ser medida, y un estudio reciente muestra como, al irse desarrollando un país, ésta se va volviendo cada vez más crítica [46]. Uno de los índices para medir cuán dependiente un país es hoy de Internet es el *Cyber-Attack Susceptibility*

---

<sup>1</sup>De acuerdo a los lineamientos de la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO)

<sup>2</sup><https://goo.gl/KFmBQ2>

<sup>3</sup><http://www2.latercera.com/noticia/conectividad-en-el-pais/>

---

(CAS), que permite saber qué tan grave resultaría un falla en su infraestructura. Los países más dependientes tienen un índice 0,8, los menos 0,2 aproximadamente. El promedio de Europa es 0,62 y el de América Latina es 0,36. En ese estudio, Chile figura con un CAS de 0,55, equivalente al índice de Italia, Polonia y Portugal, demostrando que nuestra Internet sí es una infraestructura crítica para el país.

Internet es una red resiliente por diseño, preparada para corregir fallas parciales y para continuar en operaciones mientras existan caminos alternativos disponibles. La mayoría de los países disponen de esos caminos alternativos en forma natural, al tener que aumentar la cobertura de los servicios para cubrir todo el territorio. Pero Chile, debido a su excepcional geografía de forma tan lineal y estrecha, no siempre cuenta con trazados alternativos. Por ejemplo, sus caminos están estructurados como una sola autopista central que conecta las principales ciudades, la Ruta 5, y una serie de caminos secundarios y terciarios que conectan el resto de las ciudades y pueblos hacia el interior. De igual forma, la infraestructura de Internet cuenta con una columna de fibra óptica a pasos de Ruta 5, y ramificaciones de las más diversas características hacia las ciudades y pueblos del interior, lo que la hace tremendamente vulnerable. A pesar de que contamos con muchas fibras de diversas empresas que cubren Chile de Norte a Sur, casi todas tienen tramos en los que dependen de la Ruta 5.

Pero más allá de la resistencia a fallas y el riesgo en caso de desastre, la infraestructura actual presenta también un problema en la calidad de las comunicaciones. El diseño actual de la red está pensado para entregar una buena conectividad a las grandes ciudades, pero no es capaz de proveer una conectividad de la misma calidad al resto de las ciudades, pueblos y localidades. De acuerdo a nuestro levantamiento en terreno, del total de 346 comunas del país, 309 tienen algún tendido de fibra óptica en el centro de la comuna (89,3 %). Por la falta de información disponible y la metodología de levantamiento en terreno, no podemos asegurar que esos tendidos están interconectados entre sí, porque algunas veces los tendidos están soterrados, se alejan de los caminos que fueron recorridos o siguen las rutas de las vías de alta tensión eléctrica. Dicho eso, solo podemos afirmar con certeza que 263 (76,6 %) de ellas están interconectadas entre sí.

Una política pública en esta materia debiese propender a que el país cuente con Internet disponible y operativa el 100 % del tiempo, incluso durante un gran desastre. Por esto, la Subsecretaría de Telecomunicaciones (SUBTEL) ha hecho grandes esfuerzos financiando proyectos de telecomunicaciones en todo el país<sup>4</sup>. Sin embargo, la infraestructura de Internet está principalmente en manos de las empresas de telecomunicaciones, donde la inversión en redes de datos está dada por un modelo de oferta y demanda. Este modelo lleva a que las ciudades con mayor densidad poblacional y disposición a pagar por Internet cuenten con mejores accesos vía fibra óptica que requieren una mayor inversión, mientras que en el mundo rural, las localidades cuentan usualmente con enlaces inalámbricos, que son más baratos en instalación y mantención, pero al mismo tiempo son mucho más limitados tanto en disponibilidad como en ancho de banda.

---

<sup>4</sup>Financiamiento mediante el Fondo de Desarrollo de las Telecomunicaciones, Ley N° 19.302 de 1994 <http://bcn.cl/1ysrn>

Si bien es claro el diagnóstico de que la infraestructura tiene falencias importantes, no existe actualmente claridad de la robustez de la red de datos y no se cuenta con un mapa detallado de los enlaces o tendidos de fibra existentes de forma de medir cuantitativamente su resiliencia. Una consecuencia de esto es que para las autoridades no es posible planificar acciones efectivas para mejorar la calidad de la conectividad del país ni para reducir los riesgos existentes frente ataques, fallas o desastres.

Este proyecto se presentó inicialmente para validar los mapas de la red física de datos del país, pero por motivos ajenos a NIC Labs nunca fue posible contar la información necesaria. A partir de eso, el proyecto fue reformulado como algo mucho más ambicioso: documentar la mayor cantidad de caminos principales y secundarios de todas las comunas del país, para luego poder proponer la forma más eficiente en que el país puede invertir para construir nuevos trazados de fibra óptica que aumenten la resiliencia de la red.

El proyecto reformulado busca avanzar en entender el problema de la resiliencia (tolerancia a fallas, ataques y catástrofes) de Internet en general y aplicar estos conocimientos a la Internet chilena en particular. Nuestro objetivo es realizar una propuesta innovadora de mejora de la conectividad del país en acceso, calidad y resiliencia de forma comunal, provincial y regional. Para esto, durante los 30 meses de ejecución del proyecto se trabajó en:

- Documentar el trazado de la red física chilena, almacenando de forma geográficamente referenciada los tendidos de fibra óptica, postación eléctrica o telefónica o ausencia de tendidos en las rutas que interconectan al país.
- Desarrollar una métrica basada en teoría de grafos para medir matemáticamente la resiliencia de una red de fibra óptica.
- Aplicar este conocimiento al trazado de la Internet chilena para medir qué tan robusta es nuestra infraestructura.

A continuación se presenta el informe final del proyecto que contiene la información de las actividades realizadas, el conocimiento generado y las propuestas de NIC LABS para mejorar la resiliencia de la Internet chilena. El documento se estructura como sigue: el capítulo 2 presenta antecedentes del proyecto, referidos a conceptos generales de redes e Internet, una breve descripción del contexto nacional en este ámbito y los antecedentes de la postulación del proyecto; el capítulo 3 entrega un resumen de las actividades realizadas durante los 30 meses del proyecto, tanto en terreno como las actividades de difusión académica relacionadas; a continuación, el capítulo 4 entrega los detalles del bien público desarrollado, así como de su sustentabilidad y compromiso de disponibilización de éste por los próximos 5 años; el capítulo 5 entrega los resultados sobre la evaluación de la infraestructura de Internet actual, desde el marco teórico que la sustenta hasta los resultados de la evaluación; el capítulo 6 entrega una propuesta de mejora a la Internet chilena para que el país pueda contar con una red robusta ante fallas y catástrofes al menor costo posible; el capítulo siguiente, 7, propone los contenidos y la estructura que debería

tener un informe anual que dé cuenta de la evolución de la resiliencia de la red; por último, el capítulo 8 presenta un análisis crítico de los resultados obtenidos en el marco del proyecto y propone futuras líneas de acción para avanzar en la robustez de la conectividad del país.

# Capítulo 2

## Antecedentes

### 2.1. Conceptos Generales

La mayoría de los usuarios de Internet ignora el recorrido que hacen los datos que consumen y simplemente usan Internet, sin pensar mucho en cómo funciona. Por lo general, discriminan si el servicio es bueno o malo (“rápido o lento”), pero no manejan información de cómo funciona Internet en su conjunto. Los usuarios saben cuando su aparato celular “tiene señal” o no, pero ignoran por completo si su dispositivo se conecta a una torre conectada con un enlace satelital, a un enlace microondas terrestre o vía fibra óptica.

A lo largo de los años, se han desarrollado numerosas tecnologías para transmitir datos, y actualmente se sigue usando una gran variedad para lo que se denomina “la última milla” de Internet, es decir el último tramo hasta el usuario final (casa, oficina o dispositivo móvil). Sin embargo, en las troncales de Internet, que son los enlaces que interconectan torres de transmisión y equipos de interconexión en los proveedores mismos, hay mucho menos diversidad y, finalmente, por lo general, sólo se utilizan masivamente tres tecnologías (ver cuadro 2.1).

La conectividad vía fibra óptica ofrece una capacidad de ancho de banda y de escalabilidad únicos. En los últimos 20 años, no hemos encontrado ninguna tecnología que supere su rendimiento ni su relación calidad/precio. Los cables actuales contienen en su interior 12, 24, 48 y hasta 192 pelos de fibra óptica. Cada uno de estos pelos permite canales de entre 2.5Gb/s (gigabits/segundo) a 100Gb/s (recientemente a 400Gb/s). Si esto no fuese suficiente, multiplexando en frecuencia, se pueden crear hasta 100 canales a partir de un pelo de fibra. Esto posibilita tener cables de fibra óptica que transportan varios Terabits por segundo<sup>1</sup>. Además, esta tecnología es inmune a la radiación solar, campos magnéticos, niebla, lluvia e incluso nieve. Por ello, en el mundo se han ido reemplazando los antiguos cables de cobre que se usaban en telecomunicaciones por fibra óptica.

---

<sup>1</sup>Un Terabit equivale a 10<sup>3</sup> Gigabits.

Cuadro 2.1: Tipos más comunes de conexiones troncales

Tipo de conexión	Descripción
Microondas terrestre	Transmisión de información en longitudes de onda que pertenecen al rango de las microondas. Se necesitan dos antenas de tipo parabólico que se miran una a otra. También es requisito que no haya obstáculos entre ellas o la comunicación se verá disminuida o incluso interrumpida. La altura de las antenas determina la distancia máxima entre ellas, que puede llegar a varios kilómetros. Es susceptible a las alteraciones climáticas y en caso de fuertes tormentas puede llegar a fallar. Es una solución barata para distancias medianas.
Microondas satelital	Los satélites geoestacionarios, ubicados a una altitud de 35,786 kms, reenvían la información que reciben desde la estación emisora ubicada en nuestro planeta, por lo tanto, también se requiere de otra estación receptora que es adonde se desea enviar la información. Los satélites orbitan en torno a la Tierra a la misma velocidad de su rotación, por lo que están siempre en la misma posición. Su funcionamiento se puede ver afectado por tormentas solares, eclipses y otros fenómenos asociados a la Luna o el Sol. La órbita utilizada está sobre el Ecuador, por lo que las latitudes extremas tienen más dificultad para conectarse bien. Es una solución cara y de baja capacidad debido a la escasez de satélites, ya que la órbita geoestacionaria está copada. Además, como recorre más de 100 mil kilómetros, la latencia es mucho peor.
Fibra óptica	Un cable de fibra óptica está compuesto por finos hilos de plástico o cristal (óxido de silicio o germanio) del grosor de un cabello humano que transmiten información en forma de señal luminosa. Por ello, la velocidad de transmisión es muy alta (velocidad de la luz en la fibra) y se han ido desarrollando tecnologías para lograr cada vez más ancho de banda en la fibra. Por otro lado, al no usar radiación electromagnética no es susceptible de interferencia climática o de otro tipo, por lo que es la forma más confiable y rápida de transferir información hoy en día. Es una buena solución para grandes distancias (aunque requiere amplificadores de señal cada cierto trecho) y se utiliza en forma submarina, soterrada o en postación. La fibra misma no es cara, pero su instalación sí lo es.

La conexión mundial entre continentes para Internet se realiza a través de cables submarinos de fibra óptica, alojados en el fondo marino, conectando a gran capacidad y baja latencia. Debido a que la velocidad de la información en la fibra es un poco menor que la velocidad de la luz en el vacío ( $200.000 \text{ km/s}$  contra  $300.000 \text{ km/s}$ )<sup>2</sup> y la distancia a recorrer es menor a  $20.000 \text{ km}$ , el retardo es de unos  $100$  milisegundos (ver figura 2.1). Al interior de los países, usualmente existe también una columna vertebral de fibra óptica (*backbone*) que conecta las ciudades. La figura 2.2 muestra por ejemplo del *backbone* de fibra óptica de Estados Unidos.

En cuanto a la infraestructura de la red chilena, durante el desarrollo del presente proyecto no se tuvo acceso a información detallada sobre los tipos de conexión que existe entre las diferentes ciudades o comunas del país (ver sección 4.1 para más detalles). Debido a esto, toda la información utilizada en los análisis corresponde al levantamiento en terreno realizado en el marco de este proyecto, que consideró el recorrido de más de  $26.500$  kilómetros a lo largo del país, registrando los tipos de conexión existentes en cada uno. La documentación de esta información es parte integrante de este documento y es uno de los elementos más valiosos del bien público desarrollado.

Aún cuando pueden existir ciertas sutilezas en las definiciones, para efectos prácticos de este trabajo, los conceptos de robustez y resiliencia serán utilizados indistintamente, ambos entendidos como la capacidad que tiene una red de soportar la caída de alguno de sus elementos, ya

<sup>2</sup>Algunos centros de investigación han creado en laboratorio fibras experimentales donde la luz se propaga a  $299.000 \text{ km/s}$ .

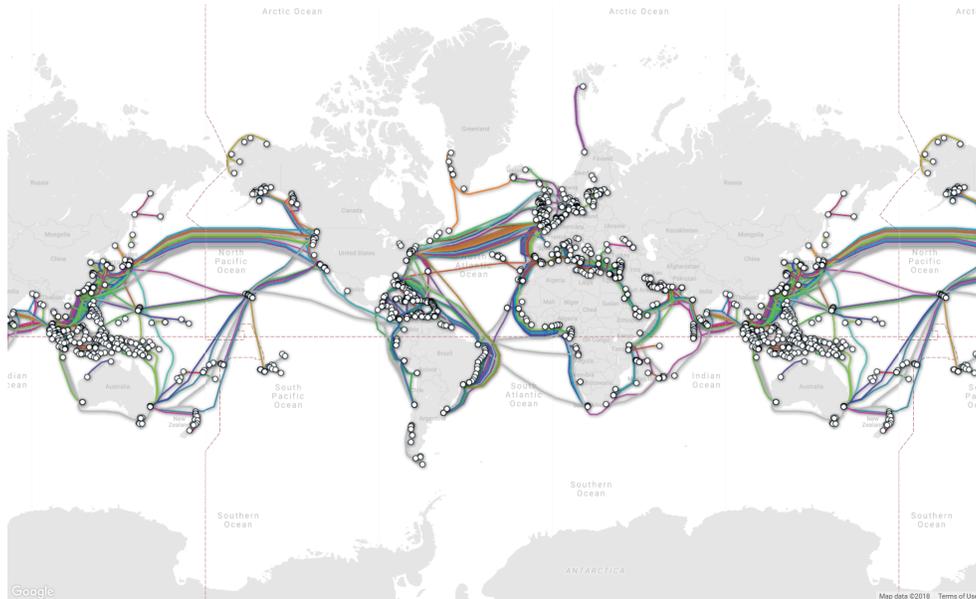


Figura 2.1: Mapa mundial de cables submarinos.

Fuente: <https://www.submarinecablemap.com/>

sea nodo (ejemplo: punto de interconexión que se queda sin energía) o enlace (ejemplo: corte de fibra óptica).

## 2.2. Incidentes en la red chilena de Internet

Las cuentas públicas de SUBTEL y las de las compañías de telecomunicaciones, dejan ver que Chile tiene una infraestructura de nivel mundial, tanto en cobertura, uso y capacidad. Sin embargo, eso no tiene relación con la calidad de servicio que los usuarios perciben, de hecho, el SERNAC tiene a las empresas de telecomunicaciones entre las con mayores reclamos del país. Si nuestra infraestructura es de nivel mundial, ¿por qué tenemos varios cortes al año que afectan a cientos de miles de usuarios?

Después del terremoto de 2010, nuestro laboratorio demostró que más del 60 % de la Internet chilena quedó desconectado por alrededor de 6 horas esa madrugada. Esta situación, totalmente evitable, se debió a una mala ingeniería de las interconexiones y respaldos dentro de Santiago. El desarrollo de Internet en el país no era tan avanzado en aquella época, por lo que la mayor parte de la ciudadanía no notó esta interrupción de suministro. Hoy, un hecho de estas características sería un desastre mayor. Los sismos y desastres recientes nos han demostrado que Internet es la plataforma clave para suministrar servicios mínimos de comunicaciones, y redes sociales como WhatsApp y Facebook (ambas totalmente dependientes de Internet), que son fundamentales para que la población se coordine, calme la ansiedad y evacue en forma tranquila cuando sea

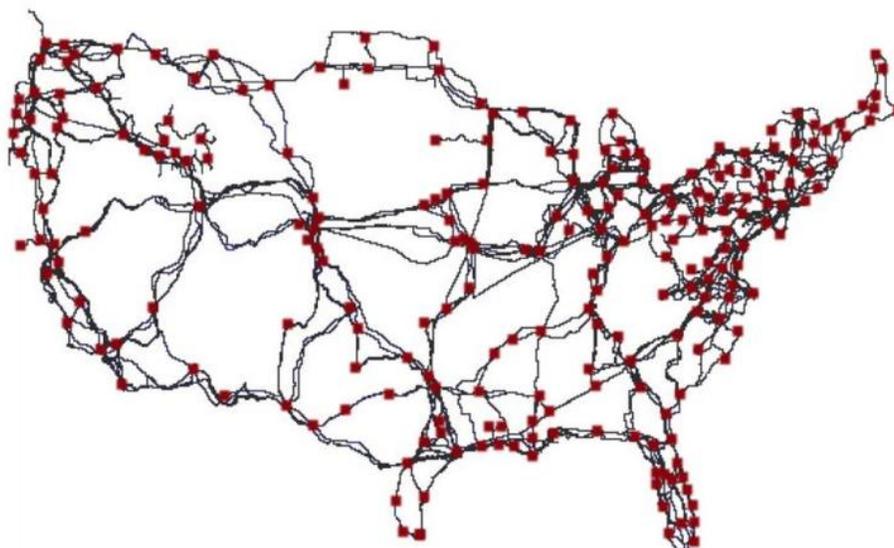


Figura 2.2: Mapa de la infraestructura de fibra óptica de larga distancia de EE.UU. hecho por la Universidad de Wisconsin y publicado en ACM SIGCOMM. Fuente:

<https://conferences.sigcomm.org/sigcomm/2015/pdf/papers/p565.pdf>

necesario.

Pero más allá del riesgo de catástrofes, durante este proyecto hemos constatado que no solo existe un problema de riesgo de la infraestructura actual, sino que la infraestructura en sí presenta en algunos lugares problemas de estándares de instalación y políticas de mantención y fiscalización que hacen que, en la práctica, se pueda cuestionar la información en la que se basa la opinión de que la totalidad de nuestra infraestructura es de nivel mundial. En nuestro recorrido de verificación recopilamos evidencia de problemas de estándares de instalación y falta de mantenimiento de los tendidos. Evidencia de los problemas detectados se presenta en el anexo 9.5.

## 2.3. Proyecto Bienes Públicos

El informe de Evaluación de la Estrategia Nacional de Innovación para la Competitividad<sup>3</sup> establece la necesidad de proporcionar bienes públicos que estimulen la innovación e incrementen la productividad del país. La provisión de estos bienes requiere la coordinación de diferentes instituciones, ya que el Estado carece del conocimiento y de la información para abordar los requerimientos específicos de los distintos sectores de la economía. En este contexto, la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) convocó el año 2015 a la postulación de proyectos destinados a desarrollar “Bienes Públicos Estratégicos para la Competitividad”, convocatoria en

<sup>3</sup>Evaluation report of national innovation strategy for competitiveness, Chile. CNIC 2010.

la que fue adjudicado el presente proyecto.

Nuestra motivación surge a partir de los estudios realizados en nuestro laboratorio sobre la resiliencia de Internet, donde detectamos que el Estado no cuenta con los mapas de la infraestructura existente ni tampoco dispone de un repositorio central que permita visualizar la red e información complementaria que permita hacer análisis relevantes para la toma de decisiones.

En este contexto, el bien público propuesto por la Universidad de Chile en conjunto con SUBTEL fue la construcción de una base de datos con información geográficamente referenciada de la topología de la red física chilena actual, incluyendo la validación en terreno de los tendidos de fibra óptica que interconectan al país, e información adicional relevante para las toma de decisiones de política pública. Con información adicional nos referimos a los poblados, la infraestructura de caminos, la postación existente por la franja fiscal, los pasos fronterizos de bajo trafico, comunidades indígenas, escuelas y postas rurales, y un sin fin de hitos que caracterizan cada rincón del territorio nacional. Contar con esta información sistematizada nos permite inferir futuros requerimientos de manera rápida, precisa y con herramientas que permiten su fácil visualización.

Este activo de información corresponde, en la práctica, a una base de datos relacional (PostgreSQL <sup>4</sup>) poblada con datos geo-referenciados Postgis <sup>5</sup>, que puede ser manipulada y analizada con cualquier sistema de información geográfica (GIS por sus siglas en inglés). Adicionalmente, la propuesta consideró la definición de la métrica utilizada para evaluar cuantitativamente la robustez de la Internet chilena y, en base a los resultados obtenidos, proponer mejoras para que nuestro país entero esté más preparado ante emergencias.

### **Objetivo general del proyecto**

Estudiar y medir la red de datos chilena para aumentar su resiliencia ante emergencias, catástrofes o ataques.

### **Objetivos específicos**

El cuadro 2.2 presenta los objetivos específicos del proyecto de acuerdo a lo presentado en la propuesta adjudicada. A continuación se entrega información sobre el cumplimiento de cada objetivo a junio 2018.

En cuanto al cumplimiento del primer objetivo, durante los meses de ejecución del proyecto se solicitó la información en reiteradas oportunidades de forma presencial y luego por escrito, mediante 3 oficios del Director del Proyecto a SUBTEL (ver anexo 9.1, página 77 para mayor detalle). Solo se tuvo respuesta en marzo 2018, indicando que la información no podía ser entregada al proyecto (más detalle en la sección 4.1 (página 22)). El segundo objetivo, que correspondía a la validación aleatoria de la información recibida según de acuerdo al objetivo 1, debió ser reemplazado por un levantamiento completo de las redes existentes, que se cumplió con el recorrido de más de 24.000 kilómetros de caminos, documentando la existencia de tendidos de

---

<sup>4</sup><https://www.postgresql.org/>

<sup>5</sup><https://postgis.net/>

fibra (simple, doble, triple o cuádruple), postación (tendido eléctrico o cable multipar de cobre) y caminos en que no había ningún tipo de cableado. Esta información es relevante para la posterior propuesta de una red de fibra óptica robusta, cuya construcción dependerá de los tendidos existentes y del costo de instalación de fibra que depende de la existencia o no de postación en el camino.

Para el cumplimiento del objetivo número 3, relacionado con la importancia de que la planificación de nuevos tendidos de fibra óptica dieran cobertura a lugares importantes para las comunas, se recorrieron y documentaron el 100 % de las comunas de Chile bicontinental, y se sostuvieron reuniones con los alcaldes, gobernadores e intendentes. Adicionalmente, por la relevancia social de la conectividad de las comunas, se sostuvieron reuniones con el Ministerio de Desarrollo Social (MDS) para proponer la integración de la resiliencia de servicios básicos como variables de la pauta de evaluación los proyectos sociales (ver anexo 9.1, página 77).

El cumplimiento del cuarto objetivo se realizó mediante el financiamiento parcial de dos tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Mención Ciencia de la Computación, de la Universidad de Chile. La primera tesis realizó a una revisión sistemática de las métricas utilizadas en la medición de robustez de redes complejas en diferentes contextos, y propuso métricas apropiadas para la red física chilena. La segunda tesis evaluó los diferentes *frameworks* utilizados en el estudio de redes interconectadas y definió la forma más apropiada de modelar las redes física y lógica de la Internet chilena junto a las métricas necesarias para evaluar su robustez. El modelamiento y la evaluación de robustez de la Internet chilena, considerando la red física y lógica, no fue posible en el marco de este proyecto por no contar con la información que fue solicitada.

En relación al objetivo 5, éste se cumple con la entrega del presente informe, que contiene la primera versión del informe anual (presentada en los capítulos 4, 5 y 6) y la estructura para versiones futuras, así como los contenidos mínimos de éste que se presentan en el capítulo 7. Por último, el objetivo 6 considera actividades de difusión a realizarse durante el segundo semestre de 2018 y primer semestre 2019.

### **Resultados esperados**

Los resultados esperados presentados en la propuesta se estructuraron en 3 etapas: 1) Generación de un diagnóstico y estudio de la resiliencia de la Internet chilena, 2) Grupo de trabajo NIC Labs define contenidos de informe de resiliencia, publica primer informe y fija contenidos mínimos para su publicación anual a futuro, y 3) Compartir la experiencia e información de este bien público con la comunidad nacional e internacional. El detalle se presenta en el cuadro 2.3.

Los resultados de la primera etapa corresponden a una base de datos con la información geográficamente referenciada de los tipos de tendido existentes en el país (descrita en la sección 4.3, página 23), la definición de métricas de resiliencia a aplicar (detalladas en la sección 5.1), y su aplicación (en la sección 5.2). Los resultados “Análisis de red lógica chilena” y “Análisis de servicios críticos de telecomunicaciones” no se pudieron desarrollar por falta de información (ver sección 4.1 para más detalle).

Objetivo	Descripción
1 Levantamiento de información red física	Se solicitará a la SUBTEL y a las compañías de telecomunicaciones pertinentes el trazado de todos los tendidos de fibra óptica y la ubicación de las torres que sirven de enlaces punto a punto.
2 Validación de la información	En las visitas a cada provincia, se hará revisión aleatoria en terreno de algunos tendidos, previa reunión con las empresas locales que ejecutaron los proyectos de infraestructura.
3 Rentabilidad social	Una componente importante al planificar nuevos tramos en la red chilena es la cobertura en lugares importantes para las comunas. Para validar esta información se presentará los alcances del bien público propuesto a cada gobernación, junto a los alcaldes y concejales de esa provincia. Este feedback nos permitirá validar la información de poblados, en especial en sectores rurales. También está considerado realizar presentaciones al Gobierno Regional de cada región (Intendente más consejeros regionales), ya que ellos definen el financiamiento de los FNDR.
4 Crear métrica basada en teoría de grafos	Con la información de la red física chilena validada, crearemos una métrica que permita analizar qué tan resiliente es la red actual. Dicha métrica será una herramienta que permitirá proponer mejoras a la red chilena para que resista mejor ante emergencias.
5 Estudio anual	Proponemos publicar un estudio anual con la documentación actualizada de la red física chilena, sus posibles mejoras y un análisis de los servicios críticos necesarios para la resiliencia de la red.
6 Compartir este bien público en la comunidad nacional e internacional	Ya en la etapa final de este proyecto, se propone exponer esta experiencia en algún seminario pertinente en el exterior, además de organizar un evento en Chile con expositores internacionales. Se usarán todos los medios disponibles para difundir este bien público. Creemos que esta métrica puede tener usos en otros sectores como la distribución eléctrica o el trazado de nuevos caminos.

Cuadro 2.2: Objetivos específicos presentados en la propuesta de la Universidad de Chile para el Proyecto de Bienes Públicos para la Competitividad

Los resultados de la etapa 2 se dividen en definición de contenidos y publicación del primer informe. En cuanto a la publicación del primer informe anual, este corresponde al presente documento, en sus capítulos 4, 5 y 6. En cuanto a la estructura y contenidos para las futuras ediciones del informe anual, éstas se presentan en el capítulo 7.

### Indicadores

El cuadro 2.4 presenta los indicadores comprometidos para el proyecto. Los resultados de los indicadores junto a los medios de verificación se presentan en el documento adjunto “Anexo medios de verificación”.

Etapa	Resultado esperado	Descripción
Etapa 1: Generación de un diagnóstico y estudio de la resiliencia de la Internet chileno	Levantamiento información	Luego de obtener información desde empresas de telecomunicaciones y autoridades regionales, además de comprobar en terreno la existencia de infraestructura de telecomunicaciones, toda esa información estará en base de datos georeferenciada.
	Métrica de resiliencia	Métrica desarrollada en base a teoría de grafos, que permite evaluar una red.
	Análisis de red física chilena	Aplicando métrica desarrollada, se podrá evaluar la red física actual.
	Análisis de red lógica chilena	Aplicando métrica desarrollada, se podrá evaluar la red IP ruteada con BGP4
	Análisis de servicios críticos telecomunicaciones	Se evaluará el estado de todos los servicios de telecomunicaciones críticos necesarios para enfrentar una emergencia.
Etapa 2: Grupo de trabajo NIC Labs define contenidos de informe de resiliencia, publica primer informe y fija contenidos mínimos para su publicación anual a futuro	Template tipo de estudio anual de la resiliencia de la red chilena	Después de completada la etapa 1, tendremos definido los componentes mínimos que debe tener el informe anual que sintetiza la esencia de este bien público.
	Publicación primer estudio de resiliencia red chilena	Se publicará el informe final de todo el trabajo desarrollado en este proyecto. Este documento es el bien público en sí, el que podrá actualizarse periódicamente según se necesite. Además de la publicación se enviara una copia a cada autoridad local del país.
Etapa 3: Compartir la experiencia e información de este bien público con la comunidad nacional e internacional	Publicación de resultados	Los resultados de este proyecto se publicarán en distintos congresos nacionales e internacionales, además de diversas publicaciones.
	Seminario sobre bien público desarrollado	Para concluir este proyecto, organizaremos un seminario con importante exponente internacional, atingente al bien público desarrollado.

Cuadro 2.3: Resultados esperados presentados en la propuesta de la Universidad de Chile para el Proyecto de Bienes Públicos para la Competitividad

Nombre indicador (descripción)	Fórmula	Meta (%)	Plazo (meses)	Medios de verificación	Supuestos / observaciones	Producto o resultado asociado al indicador
1. Cantidad de provincias informadas	Nº de charlas en gobernaciones / 54	90 %	20	Firma de gobernador asistente y foto charla		Cabecera de provincia estará al tanto de bien publico
2. Cantidad de comunas informadas	Nº de comunas asistentes a charlas / 345	70 %	20	Firma de alcalde o concejal de la comuna	se coordinará con alcaldes y concejales para tener idealmente asistencia completa	Municipios validarán la información de poblados y requerimientos locales
3. Cantidad de regiones informadas	Nº de charlas en intendencias	100 %	20	Firma de intendente asistente y foto charla	Se invitará también a todos los consejeros regionales de la región	Se busca articular financiamiento regional futuro para hacer la red física chilena más resiliente
4. Cantidad de validaciones	Nº de troncales o rutas de datos validadas	mínimo 1 por provincia	20	Mapa digital georeferenciado con los nodos y vértices de la ruta	Se trabajará junto a SUBTEL y Empresas de Telecomunicaciones, más visitas a terreno	Documentación de al menos una troncal de datos en cada provincia
5. Aumento de financiamiento F.N.D.R a proyecto F.D.T.	Número de proyectos F.D.T. con financiamiento regional a Enero 2019, comparado con Enero 2016	50 %	36	Listado proyectos F.D.T. financiados con aportes regionales antes y después de este proyecto	Este proyecto dura 30 meses, luego del cual pedimos 1 año de plazo para que los proyectos se elaboren, adjudiquen y se ejecuten.	Autoridades regionales interiorizadas en que la resiliencia de la Internet chilena es importante y por tanto deciden aportar recursos para su mejora
6. Propuesta de red para tener comunas de Chile con conectividad vía fibra óptica	Nº de comunas que tendrían acceso vía fibra óptica a la Internet chilena en caso de seguir recomendaciones de este bien publico / 345	90 %	24	En informe final de este proyecto en la sección de trazados propuestos para hacer la red chilena más resiliente, se considerara al menos dejar al 90 % de las comunas de Chile conectadas vía fibra óptica.		Propuesta de mejora a la red física chilena que considera incluir al menos al 90 % del total de comunas de Chile

Cuadro 2.4: Indicadores presentados en la propuesta de proyecto

# Capítulo 3

## Desarrollo del proyecto

Las actividades del proyecto se estructuraron de acuerdo a la propuesta en 3 etapas. La primera, generación de un diagnóstico y estudio de la resiliencia de la Internet chilena, se estructuró en dos líneas de trabajo: Levantamiento y validación de información, realizada principalmente en terreno y descritas en la sección 3.1; y Estudio sobre resiliencia de Internet, realizada en el Laboratorio de Investigación NIC Labs de la Universidad de Chile. Las actividades de esta última línea de trabajo se presentan en la sección 3.2.

La segunda etapa del proyecto, referida a la publicación del primer estudio de resiliencia de la Internet chilena, corresponde al resultado de la etapa 1, cuya consolidación se entrega en el presente informe. Mientras que la tercera etapa, se encuentra dividida en dos partes, la primera, referida a las actividades de difusión del conocimiento durante el desarrollo del proyecto, mediante presentaciones en conferencias, artículos científicos y otras actividades de difusión, cuyo detalle se presenta en la sección 3.3, y la segunda, destinada a las actividades de difusión de los resultados obtenidos, que se presentan en el siguiente informe y que se encuentran planificadas para ser desarrolladas durante el segundo semestre de 2018 para dar cumplimiento a los indicadores asociados cuyo plazo es el mes 36 desde el inicio del proyecto.

### **3.1. Actividades de levantamiento y validación de información**

Las actividades de levantamiento de información correspondieron a una serie de reuniones con autoridades y emisión de oficios de solicitud de información, así como también de investigación sobre la información publicada por los distintos organismos del Estado en cuanto a la geolocalización de los servicios prestados. En esta etapa se obtuvieron más de 20 bases de datos diferentes con información relevante para el desarrollo del bien público, que se encuentran descritas en el capítulo 4.

Las actividades de validación de información en terreno se realizaron en el periodo comprendido entre enero de 2016 a junio de 2018. Durante estos meses se recorrieron más de 26.500 kilómetros de caminos verificando la existencia de tendidos de fibra óptica, cableado eléctrico o telefónico, o ningún tipo de cableado. Este trabajo se realizó en las 345 comunas de Chile bicontinental y en varias de ellas se sostuvieron reuniones con las autoridades locales. El detalle de las fechas de las visitas a terreno, los caminos recorridos y medios de verificación asociados se presentan en el documento “Anexo Medios de Verificación”, adjunto al presente Informe Técnico.

## 3.2. Actividades del estudio de diagnóstico

El estudio de diagnóstico tuvo una importante componente académica en cuanto a la revisión de literatura para definición de métricas aplicables a la realidad chilena. Este trabajo se realizó mediante la realización de dos tesis de Magíster en Ciencia de la Computación de la Universidad de Chile [3, 64], y el trabajo de investigación de los académicos participantes del proyecto. El resultado de estas actividades se refleja en el capítulo 5.

## 3.3. Difusión del conocimiento

La difusión del conocimiento se realizó en dos niveles, en primer lugar, se realizaron una serie de actividades académicas en relación al desarrollo teórico hecho en el marco del proyecto, que consideran publicaciones, seminarios y participación en eventos. En segundo lugar, se realizaron acciones de transferencia del conocimiento a SUBTEL, que incluyeron: entrega de bases de datos, capacitación a funcionarios y presentaciones sobre los resultados.

### 3.3.1. Actividades académicas

A continuación se listan los artículos académicos desarrollados en el marco del proyecto y presentados en diferentes conferencias del área. Se listan también artículos publicados en revistas, participación en eventos académicos y otras presentaciones, y charlas realizadas en relación al proyecto.

#### Artículos académicos

- “Modelling the Internet as Spatially Constrained Interdependent Networks”. Bachmann, Ivana and Bustos, Javier. In Proceedings of III Spring School on Networks. CEUR-WS.

- “Can we break the Internet?: A Robustness Analysis of the Internet Exchange Points (IXP) Network Graph”. Ibarra, Alexandra and Bustos, Javier. In Proceedings of III Spring School on Networks. CEUR-WS.
- “Improving the Chilean Internet Robustness: Increase the Interdependencies or Change the Shape of the Country?” Bachmann, Ivana and Bustos-Jimenez, Javier. In Complex Networks and Their Applications VI, COMPLEX NETWORKS 2016 2017. Studies in Computational Intelligence series.: 689. Springer. Pages 646–657.
- “Multidimensional Network Resilience Analysis” Bachmann, Ivana and Reyes, Patricio and Bustos, Javier and Silva, Alonso. In Latin America Transactions: 14(6). IEEE. Pages 2912–2914.
- “Go-Index: Applying Supply Networks Principles as Internet Robustness Metrics” Bachmann, Ivana and Morales, Fernando and Silva, Alonso and Bustos-Jimenez, Javier. In Proceedings of International Conference on Network Games, Control, and Optimization. Springer. Pages 35–44.

### Publicaciones en revistas

- “El corte de Shakarian”, revista *Bits de la Ciencia*, año 2016, edición segundo semestre. <https://www.dcc.uchile.cl/Bitsdeciencia14.pdf>

### Participación en eventos

- Organización II Spring School on Networks (2016) bajo el tema Resiliencia de Internet"(<http://niclabs.cl/ssn/2016/>), con los siguiente invitados:
  - Giselle Font (Google SRE)
  - Álvaro Graves (Explorable Networks, USA)
  - Marcia Paiva (UFES, Brasil)
  - Andrés Pereira (gilt.com SRE)
  - Andrés Plaza (Twitter SRE)
  - Marcelo Segatto (UFES, Brasil)
  - Elisa Schaeffer (UANL, México)
  - Narseo Vallina (ICSI Berkeley, USA)
- Charla en “International School and Conference on Network Science” (NetSci-X) 2017, Haifa, Israel.

- Charla en “International School and Conference on Network Science” (NetSci) 2017, Indianapolis, USA.
- Presentación en “Complex networks: theory, methods, and applications” 2017, Como, Italia.

## Charlas y presentaciones

A lo largo del proyecto hemos presentado los resultados intermedios en varios foros y reuniones. Los más importantes fueron:

- 22 de noviembre 2016: Presentación a la SUBTEL, Santiago.
- 23 de mayo 2017: Estado de Avance al FDI-CORFO, Santiago.
- 28 de junio 2017: Presentación al CNID, Santiago.
- 25 de septiembre 2017: Presentación en el Open NIC, Santiago.
- 22 de noviembre 2017: Presentación en el LAC-i-Roadshow, La Serena.

### 3.3.2. Actividades de transferencia de conocimientos con el mandante

Para asegurar que el mandante tenga autonomía total en el uso y desarrollo futuro del sistema generado en este bien público, se le entregó a SUBTEL en comodato un servidor con toda la información del recorrido realizado, que considera el mapa geo-referenciado con acceso a la base de datos que contiene toda la información recopilada (más información en el capítulo 4).

El servidor fue instalado en el *datacenter* SUBTEL, en su quinto piso, y fue configurado de acuerdo a las restricciones de seguridad de la información solicitadas por la unidad de tecnología de SUBTEL. Para que los funcionarios de las distintas divisiones pudieran acceder a la base de datos, se crearon credenciales de acceso de seguridad para cada uno de ellos, además de la correcta instalación del software necesario en cada computador. Cada jefe de división determinó qué funcionarios a su cargo debían tener acceso a la información.

Adicionalmente, se capacitó individualmente a cada funcionario autorizado trabajo, para acceder a las distintas fuentes de información disponibles y se les realizó una prueba presencial, para que vieran en vivo en funcionamiento del sistema.

A la fecha de entrega del presente informe, aún se siguen incorporando más usuarios, en parte debido a que no hay restricciones técnicas sobre la cantidad de usuarios concurrentes al sistema instalado. También se realizan actualizaciones de seguridad de forma periódica al servidor, para tener garantías de que todo funciona adecuadamente.

**3.3.3. Difusión Pública**

En el marco del proyecto, se realizó el lunes 17 de diciembre 2018 un evento de difusión de los resultados obtenidos en Casa Central de la Universidad de Chile. A este evento se invitaron autoridades del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, de la Subsecretaría de Telecomunicaciones y de la Universidad de Chile. Fueron también convocadas las autoridades regionales, provinciales y comunales, además de la sociedad civil y la industria.

En esta actividad se dio a conocer los resultados del estudio, así como también la información que quedó disponible para futuros estudios en el sitio web de NIC Labs y SUBTEL.

**3.4. Cumplimiento de indicadores y resultados esperados**

El proyecto cumplió con los resultados esperados en cuanto a definición de métricas, evaluación de la resiliencia de la Internet chilena desde la infraestructura, difusión del conocimiento y construcción de un bien público de valor para la competitividad.

Los resultados esperados en relación a la evaluación de la red lógica y servicios críticos no fue factible obtenerlos por falta de información para análisis.

Los indicadores comprometidos para el mes 30 se cumplieron también superando ampliamente las metas en algunos. En el caso de las charlas de validación con municipalidades, gobiernos provinciales e intendencias para la presentación de resultados y la obtención de feedback, se solicitó una extensión del plazo hasta el mes 36. Respaldo de esta solicitud se presenta en el anexo 9.1.

El resultado detallado de los indicadores, los resultados esperados y medios de verificación se presentan en el documento adjunto “Anexo de Medios de Verificación”.

# Capítulo 4

## Bien Público

### 4.1. Información disponible para el presente proyecto

Este proyecto nace de la necesidad de entender por qué la red chilena no estaba teniendo un buen desempeño ante emergencias. En nuestro análisis previo habíamos notado que las rutas de la red lógica no tenían ninguna correlación con la cantidad de cables disponibles en el territorio, lo que hacía suponer una inmensa cantidad de enlaces virtuales en pocos cables físicos, aumentando el impacto de alguna falla de estos. En este contexto, la propuesta inicial de este proyecto fue tomar como insumo principal los mapas de la red física que dispusiera SUBTEL, mandante asociado del proyecto, y validar en terreno la información disponible, verificando una troncal de fibra óptica por provincia (54 en total país en esa fecha).

Lamentablemente, durante el desarrollo de este proyecto fue imposible obtener los mapas comprometidos. Para esto se solicitó la información basal en reiteradas reuniones durante los primeros 18 meses del proyecto y luego se enviaron desde NIC Labs 3 oficios con fechas 26 de julio de 2017, 20 de diciembre de 2017 y 24 de enero de 2018. Finalmente se recibió una respuesta oficial de SUBTEL con fecha 9 de marzo de 2018, en la que se indicó que los tendidos de fibra óptica son calificados como “estratégicos” para la seguridad nacional (En el anexo 9.1 se presenta copia de los oficios enviados y recibido). La información entregada por SUBTEL fue (textual) “Chile cuenta con grandes redes de transporte de fibra óptica desde Arica (en la frontera con Perú) hasta Puerto Montt. Estas redes están principalmente desplegadas en forma aérea y se conectan al backbone internacional de Internet mediante cables submarinos, hacia el norte por el Océano Pacífico y desde Santiago hacia Argentina. Así mismo, en las principales ciudades del país (Santiago, Valparaíso, Temuco y Concepción) existen anillos de fibra urbana soterrada y aérea”.

Al no contar con la información requerida, se debió modificar la programación y alcance de la etapa, multiplicando los esfuerzos requeridos. La solución alternativa fue no validar, sino levantar la información en terreno, recorriendo la mayor cantidad de caminos posibles en el tiempo de

ejecución del proyecto. Este cambio en la metodología y planificación involucró la adición de miles de horas hombre, que solo fue posible gracias al aporte pecuniario adicional por parte de NIC Chile, que casi igualó los montos entregados por CORFO.

A pesar de lo anterior, sí fue posible obtener distintas bases de datos geo-referenciadas con información adicional de distintas infraestructuras del país, publicada por los distintos ministerios y organismos públicos. Todas ellas fueron incorporadas a la base de datos del proyecto, normalizadas y guardadas en el mismo formato para poder ser utilizadas en su conjunto de manera simple y ordenada. Algunas fuentes requirieron ser preprocesadas para su almacenamiento estandarizado. Finalmente se consolidó una gran y valiosa colección de datos públicos.

## **4.2. Validación de la topología de la red chilena**

El cambio de alcance por la falta de información implicó un cambio en los objetivos del trabajo en terreno. Como mínimo nos propusimos documentar todas las intendencias, gobernaciones y municipalidades del país, junto a los caminos y poblados involucrados. Si bien ésta fue la meta inicial, finalmente se logró cubrir mucho más territorio, documentando caminos y localidades extremas que por lo general cuentan con ofertas muy limitadas de servicios de telecomunicaciones. La planificación de las visitas a terreno se realizó priorizando las localidades más estratégicas, de acuerdo a sus actividades económicas y sociales. Dentro de cada comuna, la selección de los caminos a documentar se realizó priorizando primero las vías principales y luego los caminos secundarios e, incluso, terciarios, muchos de ellos en muy mal estado.

La metodología utilizada para documentar las salidas a terreno fue recorrer los caminos in-situ, grabando videos y sacando fotografías constantemente de la postación y cables encontrados en el trayecto, además de tomar notas de lo observado. Luego esta información fue sistematizada, trasasándola manualmente a una base de datos geo-referenciada. Con esto obtuvimos la ubicación validada de los tendidos de fibra óptica existentes, cableado telefónico multipar de cobre y cableado eléctricos. Estos dos últimos fueron documentados porque permiten instalar fibra óptica a un precio menor que cuando un camino no cuenta con postación de ningún tipo y fue utilizada en el modelo de optimización de la construcción de una red robusta al menor costo posible.

## **4.3. Base de datos geográficamente referenciada**

La base de datos relacional usada fue PostgreSQL por su excelente desempeño y fiabilidad para trabajar con grandes cantidades de datos. Para incorporar objetos geo-referenciados se usó Postgis. Para trabajar los datos y calcular métricas se utilizaron los lenguajes computacionales

Python <sup>1</sup> para la creación de aplicaciones y R <sup>2</sup> para el análisis de datos. Todos los anteriores son software libre que no necesita pago de licencias de uso. La descripción técnica de la base de datos se presenta en el anexo 9.2.

La información contenida en la base de datos corresponde a los datos geográficos de cada tendido documentado en el proceso de validación de la topología de la red (sección 4.2), registrada manualmente. Los tipos de tendido documentados se detallan en el cuadro 4.1. Adicionalmente, se incorporó a la base de datos información complementaria que podría contribuir al análisis de la infraestructura y a la toma de decisiones sobre ella. Para ello fue necesario recabar la mayor cantidad de información en formato vectorial desde variados organismos públicos durante el desarrollo de este proyecto. Un resumen de la información incorporada se presenta en el cuadro 4.2.

La información geográfica contenida en la base de datos está estructurada en capas (layers), que pueden ser visualizadas en un sistema de información geográfica (GIS). Cada tabla corresponde a un layer distinto que puede ser visualizado por sí solo o en conjunto con otros. En la figura 4.1 se presenta a modo de ejemplo una captura de pantalla del sistema de información geográfica que muestra información validada de acuerdo a lo descrito en la sección 4.2. La imagen muestra en color verde todos los caminos en los que se validó la existencia de tendidos de fibra óptica, ya fuera simple, doble, triple o cuádruple; en azul los caminos con cableado eléctrico o de cobre; y en gris los caminos recorridos en los que no había cableado de ningún tipo.

Nombre layer	Descripción	Kms. documentados
mapa_fibra	Camino en que se detectó un único tendido de fibra óptica aérea	7.188
mapa_fibra_doble	Camino en que se detectaron dos tendidos de fibra óptica aérea	2.244
mapa_fibra_triple	Camino en que se detectaron tres tendidos de fibra óptica aérea	622
mapa_fibra_cuadruple	Camino en que se detectaron cuatro tendidos de fibra óptica aérea	110
mapa_fibra_soterrada	Camino con fibra óptica soterrada	178
mapa_electricidad	Camino con postación y cableado eléctrico	6.461
mapa_cobre	Camino con cable telefónico multipar de cobre	258
mapa_ferry	Trayecto recorrido náuticamente por Ferry	1.618
mapa_nada	Camino sin postación ni cableado de ningún tipo	7.869
TOTAL DOCUMENTADO		26.534

Cuadro 4.1: Tipos de tendido validados en terreno

## 4.4. Modelo sustentabilidad y disponibilidad Bien Público

Los resultados de este proyecto han sido puestos a disposición del público en los sitios web de Nic Labs y SUBTEL. La información corresponde a:

1. Informe técnico proyecto InnovaChile - CORFO 15BPE-47225:

<sup>1</sup><https://www.python.org/>

<sup>2</sup><https://www.r-project.org/>

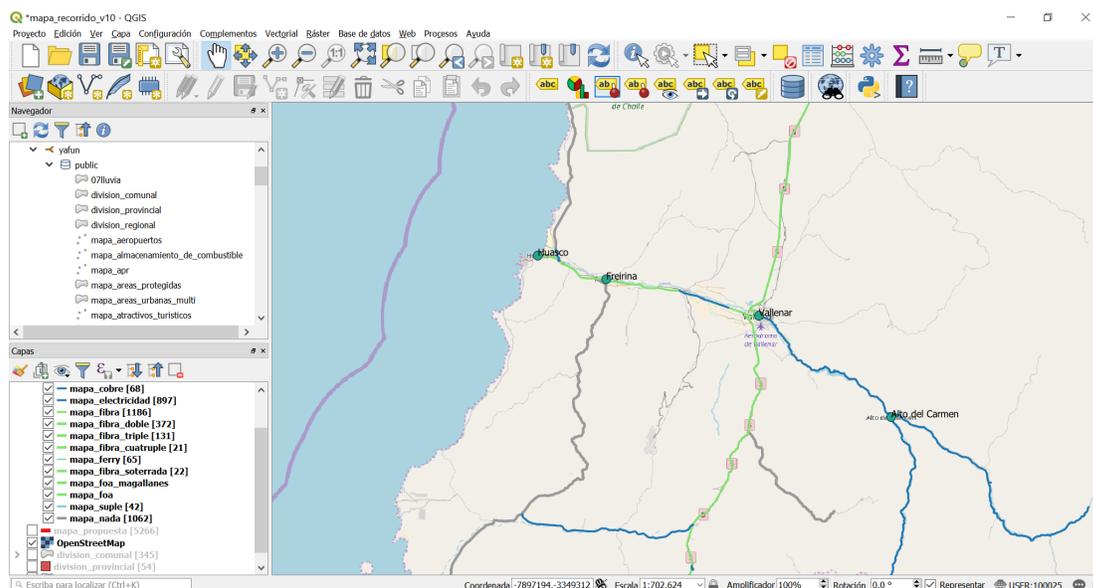


Figura 4.1: Captura de pantalla del sistema de información geográfica QGIS con los datos validados en terreno (<https://qgis.org/es/>)

Se ha publicado el presente documento, que da cuenta detallada del trabajo realizado, la metodología y los resultados del proyecto.

## 2. Base de datos geo-referenciada

Se ha puesto a disposición de SUBTEL la base de datos completa desarrollada durante este proyecto, que considera todo el levantamiento en terreno, así como también información adicional que se obtuvo durante la ejecución del proyecto y que puede ser útil para complementar el análisis.

## 3. Visualización de resultados:

Se ha puesto a disposición un sitio web en el que se puede visualizar tanto las rutas verificadas en terreno durante el proyecto, así como la propuesta presentada en este documento y otra información de interés.

## 4. Informe Anual:

Se ha puesto a disposición un Informe Anual que da cuenta de forma resumida de los resultados del estudio y evaluación de la resiliencia de la Internet Chilena.

Adicionalmente, la base de datos creada durante el desarrollo de este proyecto, fue traspasadas en su integridad al mandante (SUBTEL), para que ellos también puedan participar tanto en la actualización de datos, como en el ingreso de nuevas variables e información pertinente para calcular métricas de resiliencia y cobertura. Este traspaso consideró, además de los datos, la capacitación a personal de la institución para el uso de la herramienta.

Todo lo descrito se encuentra en la URL <http://www.niclabs.cl/yafun/>. La disponibilidad de este bien publico, de acuerdo a lo descrito, se mantendrá disponible por parte de la Universidad al menos hasta marzo 2024.

Nombre layer	Descripción	Fuente
division_comunal	División comunal (póligonos con límites comunales)	Biblioteca del Congreso Nacional de Chile
division_provincial	División provincial	Biblioteca del Congreso Nacional de Chile
division_regional	División regional	Biblioteca del Congreso Nacional de Chile
mapa_aeropuertos	Puntos con aeródromos y aeropuertos de Chile	Biblioteca del Congreso Nacional de Chile
mapa_almacenamiento_de_combustible	Ubicación de almacenes de combustibles	Superintendencia de Electricidad y Combustibles
mapa_areas_protegidas	Áreas protegidas de Chile	Ministerio del Medio Ambiente
mapa_areas_urbanas_multi	Áreas urbanas de Chile	Biblioteca del Congreso Nacional de Chile
mapa_atractivos_turisticos	Puntos con atractivos turísticos	Servicio Nacional de Turismo
mapa_bienes_nacionales_protegidos_multi	Bienes nacionales protegidos	Ministerio de Bienes Nacionales
mapa_bocatomas	Puntos de ubicación de bocatomas	Dirección General de Aguas
mapa_cables_submarinos_arcos	Líneas de tendidos submarinos de fibra óptica	<a href="https://www.submarinecablemap.com">https://www.submarinecablemap.com</a>
mapa_cables_submarinos_nodos	Puntos con nodos de los cables submarinos	<a href="https://www.submarinecablemap.com">https://www.submarinecablemap.com</a>
mapa_caletas	Puntos con ubicación de caletas artesanales	Servicio Nacional de Pesca
mapa_centrales_biomasa	Puntos ubicación de centrales biomasa	Comisión Nacional de Energía
mapa_centrales_eolicas	Puntos ubicación de centrales eólicas	Comisión Nacional de Energía
mapa_centrales_hidroelectricas	Puntos ubicación de centrales hidroeléctricas	Comisión Nacional de Energía
mapa_centrales_solares	Puntos ubicación de centrales solares	Comisión Nacional de Energía
mapa_centrales_termoelectricas	Puntos ubicación de centrales termoeléctricas	Comisión Nacional de Energía
mapa_comunidades_indigenas	Puntos con ubicación de comunidades indígenas	Corporación Nacional de Desarrollo Indígena
mapa_establecimientos_salud	Puntos con ubicación de establecimientos de salud	Ministerio de Salud
mapa_estaciones_de_servicio	Puntos con ubicación de estaciones de servicio	Superintendencia de Electricidad y Combustibles
mapa_foa	Líneas trayecto Proyecto Fibra Óptica Austral (en ejecución)	FDT SUBTEL
mapa_foa_magallanes	Líneas trayecto Proyecto Fibra Óptica Austral - Magallanes (en ejecución)	FDT SUBTEL
mapa_gaseoductos_multi	Líneas con trazados de gaseoductos	Comisión Nacional de Energía
mapa_oleoductos_multi	Líneas con trazados de oleoductos	Comisión Nacional de Energía
mapa_integra	Puntos con ubicación de jardines Integra	Fundación Integra
mapa_junji	Puntos con ubicación de jardines Junji	Junji
mapa_red_ferroviaria	Líneas con tendido de red ferroviaria	Biblioteca del Congreso Nacional de Chile
mapa_red_hidrografica_multi	Líneas con drenes del país	Biblioteca del Congreso Nacional de Chile
mapa_red_vial_2016	Líneas con trazado de carreteras y caminos de Chile - 2016	Ministerio de Obras Públicas
mapa_subestaciones_sea mapa_subestaciones_sem mapa_subestaciones_sic mapa_subestaciones_sing	Puntos con ubicación de subestaciones eléctricas	Superintendencia de Electricidad y Combustibles
mapa_sea, mapa_sem, mapa_sic_multi, mapa_sing_multi	Líneas con trazados eléctricos de alta tensión	Superintendencia de Electricidad y Combustibles

Cuadro 4.2: Selección de la información adicional contenida en el bien público desarrollado

# Capítulo 5

## Métricas de resiliencia de la Internet chilena

Este capítulo corresponde al trabajo realizado en la etapa 1 del proyecto, específicamente a la definición de métricas de evaluación de la resiliencia de Internet en términos generales, y la aplicación de éstas a la red chilena para establecer un diagnóstico de la misma. A continuación se presenta una revisión del marco teórico que respalda la selección de métricas a utilizar, y la aplicación de éstas a la red física actual. Finalmente se presenta una conclusión sobre los resultados obtenidos.

### 5.1. Marco teórico

La infraestructura de la Internet chilena corresponde a una red de comunicaciones que conecta las diferentes ciudades y pueblos entre sí y a la Internet mundial. Esta es una red compleja, usualmente modelada matemáticamente en base a grafos que permiten entender su topología y características, y que poseen ciertas propiedades estadísticas y topológicas no triviales que no ocurren en redes simples. La capacidad de una red compleja para resistir fallos y perturbaciones es llamada robustez o resiliencia, y existen diferentes formas de medirla, que dependen del contexto y tipo de red, entre otros factores.

El funcionamiento de la Internet requiere, además de una red física (infraestructura) que conecte los diferentes puntos o nodos de la red, de una capa lógica, que corresponde al ruteo IP manejado por el Border Gateway Protocol (BGP)[99]. En esta capa se encuentra el ruteo de los sistemas autónomos (AS, Autonomous Systems)[43], que a su vez corresponden a colecciones de direcciones IP. Ambas redes están relacionadas estrechamente, pues la red lógica se encuentra repartida por los equipos de la red física y estos dependen de que los AS alojados en ellos sigan funcionando para considerarse como activos dentro de la red física. Esto es lo que llamamos "redes interconectadas". Un fallo en una de estas redes provocará un fallo también en la otra. El

tipo de interacción entre redes puede ser entre nodos (equipos de ruteo), aristas (conexiones o enlaces) o ambos. Un ejemplo clásico de redes interconectadas es el de las redes de distribución de energía eléctrica y sus respectivas redes de comunicación [12]. En este caso se tiene que los nodos dentro de la red de comunicación requieren energía para funcionar, por lo que dependen de los nodos en la red eléctrica que se encargan de distribuir la energía.

Esta sección presenta el marco teórico que respalda la definición de las métricas a utilizar para evaluar la robustez de la Internet chilena, que considera la definición de grafos complejos, métricas de robustez, redes interconectadas y métricas asociadas.

## Modelamiento de redes complejas

Las redes complejas son aquellas redes cuya estructura es irregular, compleja y evoluciona dinámicamente en el tiempo. Su foco principal va desde el análisis de redes pequeñas al de sistemas con miles o millones de nodos. El estudio de estas redes ha sido usado para contextos como redes sociales, redes de transporte, redes telefónicas, Internet y la World Wide Web, colaboración científica mediante coautoría de artículos, entre otros [10]. El estudio de redes complejas ha dado pie a la identificación de una serie de características topológicas y propiedades estadísticas comunes a la mayoría de las redes reales.

El modelamiento matemático de las redes complejas se realiza mediante teoría de grafos, que formaliza características topológicas y propiedades estadísticas de estas redes. Formalmente, un grafo  $G$  se define como un par de conjuntos  $(V, E)$ , donde  $V$  corresponde al conjunto de *vértices* (también conocidos como nodos) y  $E$  al conjunto de *aristas* (también conocidas como arcos o enlaces). Cada vértice  $v \in V$  representa un elemento de interés (como personas o ciudades) que puede estar asociado a un vector de propiedades (como el nombre, costo, capacidad, tipo). Cada arista  $(u, v) \in V \times V$  conecta el vértice  $u \in V$  con el vértice  $v \in V$ , y pueden tener también un vector de propiedades asociado (representando la distancia, tasa de transferencia, etc.).

Una arista  $(u, v)$  es *dirigida* si la conexión que representa es solo admitida en una dirección, desde el origen  $u$  hasta el destino  $v$ , mientras que una arista *no dirigida* representa una conexión bidireccional. Una arista es *reflexiva* si su origen y destino son el mismo vértice. En adelante nos concentraremos solo en conexiones no dirigidas, dada la naturaleza de las redes estudiadas.

El *grado* de un vértice  $d(v)$  es el número de aristas que conectan a  $v$  con otros vértices. El conjunto de vértices adyacentes a  $v$  en  $G$  es denotado como  $\Lambda(v)$  y llamado *vecinos*. La *secuencia de grados* de un grafo es un vector formado por los grados de los vértices y la *distribución de grados* se refiere a la relación entre los grados presentes en el grafo y su frecuencia. El *grado máximo* es denotado comúnmente como  $\Delta$  y aquellos vértices con alto grado son llamados *hubs* (“centro de actividad” en español), sobre todo cuando la distribución de grados está lejos de ser una distribución uniforme. En redes naturales, una forma común de la distribución de grados es la llamada *ley de potencias* (power law), donde la frecuencia del grado es proporcional a la potencia negativa,  $\Pr[d(v) = k] \sim k^{-\gamma}$  [4], aquellos grafos son llamados *libres de escala* (scale-free).

Típicamente, los grafos que representan redes del mundo real son esparcidos, es decir que el conjunto de vértices  $E$  es un conjunto relativamente pequeño de  $V \times V$ . Una medida típica para capturar tal fenómeno del grafo  $G = (V, E)$ , expresado en términos de  $n = |V|$  (llamado el *orden* del grafo) y  $m = |E|$  (*tamaño* del grafo) es el *grado medio* (ver ecuación 5.1).

$$d = m/n \quad (5.1)$$

Una variante, con el objetivo de normalizar este valor entre un rango específico (dependiendo si las aristas son dirigidas, reflexivas, etc) es la llamada *densidad* ( $\delta$ ) que corresponde a la proporción del tamaño del grafo en relación al máximo tamaño posible dado el orden del mismo (ver ecuación 5.2). La densidad de un grafo alcanza un valor 1 si todos los pares de vértices están conectados por una arista, y 0 si no existen aristas en el grafo.

$$\delta = \frac{2m}{n(n-1)} \quad (5.2)$$

Un *camino* es una secuencia de aristas que parten de un vértice  $v$  a un vértice  $u$ . Un camino es *simple* si no contiene aristas repetidas. El *largo de un camino*  $\ell(v, u)$  es el número de aristas que contiene un camino simple. Dado un par de vértices  $u$  y  $v$ , puede haber varios caminos que los conecten. El largo del camino más corto es llamado *distancia*  $D(u, v)$ . La máxima distancia entre todos los pares de vértices del grafo es llamado *diámetro* del grafo,  $\mathcal{D}$ . La distancia promedio es, evidentemente, el promedio de todas las distancias para todo par distinto de vértices. La distancia de un vértice consigo mismo es considerada 0 dado que el conjunto vacío es un camino válido.

Un conjunto de vértices que están conectados entre sí dentro de un grafo es llamada *componente (conectada)*. Un grafo con solo una componente se le llama *conexo*, mientras que uno con múltiples componentes se llama *disconexo*. En los grafos dirigidos, una conectividad fuerte se refiere a la existencia de caminos en ambas direcciones, mientras que la *k-conectividad* se refiere a la existencia de múltiples caminos que no comparten aristas y/o vértices intermedios.

Las aristas de un grafo pueden ser fácilmente expresadas a través de la *matriz de adyacencia*  $\mathbf{A}$ , donde el conjunto de vértices es etiquetado como  $V = \{1, 2, \dots, n\}$  de manera que cada elemento  $a_{ij}$  de la matriz indicará si los vértices  $i$  y  $j$  están conectados entre sí:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si } (i, j) \in E, \\ 0, & \text{en caso contrario.} \end{cases} \quad (5.3)$$

Donde la matriz  $\mathbf{D}$  es la matriz diagonal de grados derivada de  $\mathbf{A}$  como la suma por filas:

$$d_{ij} = \begin{cases} d(i), & \text{si } i = j, \\ 0, & \text{en caso contrario.} \end{cases} \quad (5.4)$$

Donde  $d(i) = \sum_j (a_{ij})$ .

## Topología de redes

La topología física de la red es la estructura que tiene ésta en cuanto a la ubicación de los nodos y las conexiones entre estos. Una red conexas puede tener diferentes topologías, como árbol, anillo o estrella (ver ejemplos en figura 5.1), y esta topología determina cuán resistente será la red ante fallas. Por ejemplo, en una red anillo, cada nodo tiene dos arcos que la conectan al resto de la red, por lo que la falla de un enlace no afecta la provisión del servicio en ninguno de los nodos, pero no soporta la falla de un segundo enlace. Un grafo en que cada nodo que tiene  $k$  diferentes enlaces hacia el resto de la red lo llamamos  $k$ -conexo, y es capaz de soportar  $k-1$  fallas en sus enlaces. El hecho de que cada nodo tenga a lo menos dos conexiones se denomina redundancia.

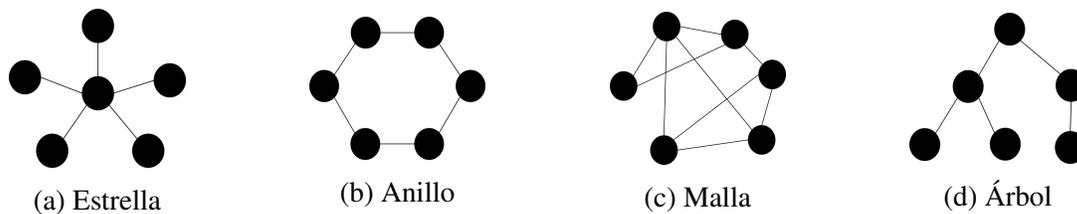


Figura 5.1: Ejemplo de diferentes topologías de redes

## Métricas de robustez en redes complejas

En el marco del presente proyecto se realizó una revisión sistemática de literatura sobre las métricas de robustez utilizadas en distintos contextos, y en particular aquellas utilizadas en el ámbito de las telecomunicaciones [64]. Esta búsqueda encontró un total de 128 artículos, en los cuales se hacía referencia a 57 métricas de robustez aplicadas en redes de transporte, eléctricas, de telecomunicaciones, gestión de cadena de suministros, biología y medicina, redes sociales y redes complejas generales.

Las métricas encontradas pueden ser divididas en dos tipos, métricas basadas en eliminación y métricas basadas en conectividad (camino). En el caso de las basadas en eliminación, ya sea de nodos o arcos, pueden ser aplicadas a un muestreo aleatorio (modelo de falla), o al peor caso (modelo de ataque). Un ejemplo de métrica basada en modelo de fallas es eliminar al azar  $k$  vértices del grafo, y calcular el orden de componente conectada más grande para cada  $k$  (normalizando por  $n - k$  de manera que los valores resultantes estén dentro de  $[0, 1]$ ). Esta métrica es llamada *connectivity robustness function*. Un ataque en cambio, está orientado a causar el mayor daño posible con la menor cantidad de acciones, y puede ser simulado eliminando los nodos de mayor a menor grado (con o sin recalculando los grados después de la eliminación). En este caso, después de cada eliminación, se puede calcular el orden de la componente conectada más grande  $C_t$ . La suma de  $C_t$  sobre  $t = 1, \dots, n$  es luego normalizada por  $n$  y usada como una métrica de robustez, llamada *unique robustness measure*.

Entre las métricas basadas en caminos, una forma común para medir la robustez de un grafo es la centralidad (*betweenness centrality*), que se refiere al número de caminos más cortos que atraviesan un nodo o un arco, reflejando la importancia relativa de cada uno de éstos.

En el ámbito de las telecomunicaciones, un grafo  $G$  se dice resiliente ante  $k$  fallas (*k-failure resilient*) si  $k$  o menos vértices de  $G$  pueden fallar sin afectar la conectividad de la red. *Node resilience* se define como el  $k$  más grande para el cual la red es resiliente a  $k$  fallas, mientras que *edge resilience* es definida como el entero  $k$  más grande tal que el grafo es resiliente ante  $k$  fallas de enlaces.

Otras métricas en telecomunicaciones buscan cuantificar el impacto de la eliminación de un nodo. Por ejemplo, la métrica *node criticality* corresponde a la centralidad basada en caminos aleatorios (*random-walk betweenness*)  $b_{sj}(d)$  de un nodo  $j$ , dado un par origen—destino  $(s, d)$ . La métrica se refiere al número esperado de veces que una caminata aleatoria pasa por  $j$  en su viaje desde el origen  $s$  al destino  $d$ . La centralidad total del nodo  $j$  es la suma de esta cantidad para todo los pares  $(s, d)$  posibles. Esta definición es extensible también para los enlaces. A partir de la métrica anterior, puede definirse para la red la métrica *global de robustez network criticality* como la suma de *node criticality* de cada nodo.

Otras métricas utilizadas también en este contexto son, entre otras, la *robustez de flujo*, que mide la confiabilidad del flujo de datos durante una falla (interrupción o eliminación de algún nodo o enlace de la red), y el *aggregated remaining flow* definido como el promedio de la robustez de flujos de la red después de cada ataque (eliminación de un nodo), dentro de un conjunto de ataques predeterminado.

## Concepto de redes interconectadas

La red física y la red lógica en la Internet chilena interactúan entre sí generando un sistema interdependiente. Estas interacciones se pueden apreciar en ambos sentidos, es decir, la red física depende de la red lógica y la red lógica de la red física.

- **Dependencia red física-red lógica:** Si todos los sistemas autónomos alojados en un equipo físico son incapaces de responder debido a alguna falla o ataque cibernético, sin importar que los equipos físicos subyacentes se encuentren en “buenas condiciones”, éstos no van a ser capaces de responder. Luego, se puede considerar que el equipo físico también ha sufrido una falla. Por lo tanto, se requiere de al menos un sistema autónomo funcionando en un equipo físico para considerarlo funcional.
- **Dependencia red lógica-red física:** Los sistemas lógicos requieren de equipos físicos para funcionar y comunicarse. Así, si todos los nodos de los que depende un sistema autónomo fallan, dicho sistema autónomo ya no podrá comunicarse en el mundo físico y, por lo

tanto, tampoco podrá comunicarse dentro de su red, fallando. Si queda algún equipo físico en el que pueda correr este sistema autónomo, entonces se considera que puede seguir funcionando.

Las redes interconectadas han sido estudiadas en diferentes contextos y usando *frameworks* de modelamiento diferentes. Para esto, como parte del presente proyecto se realizó una revisión sistemática de la literatura orientada a seleccionar el framework más apropiado a la realidad chilena, y a partir de él definir métricas que nos permitan evaluar la robustez de nuestra red [3]. El anexo 9.4 muestra el detalle este trabajo.

Se analizó un total de 57 artículos científicos, entre los cuales se encontraron diferentes tipos de modelamiento que fueron agrupados en 8 categorías: “tipo one-to-one”, “dependencias múltiples”, “red eléctrica acoplada”, “transmisión de carga entre redes”, “mezcla de interacción intra/inter red”, “mapeo”, “cadena de suministro” y “definido por probabilidades”. Entre éstas, destaca el modelamiento del tipo “red eléctrica acoplada” que típicamente se estudia el par “red eléctrica-red de control”, pero cuya estructura es muy similar a la interacción de la red física y lógica de la Internet chilena.

Dentro de esta última categoría, se utilizaron dos criterios para seleccionar un framework de modelamiento apropiado:

- Modelar el sistema interdependiente de acuerdo al objetivo planteado de mantener la red funcional para el mayor número de usuarios posibles. Se considera que la red es funcional para un usuario si éste es capaz de acceder a Internet.
- Medir la robustez del sistema interdependiente de forma que el acceso a Internet de los usuarios juegue un rol importante a la hora de establecer la vulnerabilidad del sistema.

Utilizando esos criterios, se seleccionó el framework presentado por Parandehgheibi et al. [74]. Este trabajo, publicado en 2013, propone un modelo para estudiar una red de suministro eléctrico junto a su red de control. La red eléctrica posee nodos generadores y subestaciones, mientras que la red de control posee centros de control y ruteo. Las subestaciones pueden operar siempre y cuando exista un camino que conecte a la subestación con el generador para recibir poder, y que se conecte a un router para enviar y recibir información. Asimismo, los routers se mantienen operativos si existe un camino entre el router y el centro de control para entregar y recibir información, y se encuentre conectado a una subestación para recibir electricidad.

El modelo especifica además que las dependencias entre redes pueden o no ser dirigidas y no existe una restricción en la cantidad de nodos dependientes que puede tener cada nodo. Así, un nodo falla si es que no tiene ningún nodo que le provea de información o energía, dependiendo de si se trata de la red de comunicaciones o eléctrica. En cambio, si dicho nodo tiene al menos un nodo entregándole soporte en la otra red y conexión con su proveedor, éste puede seguir funcionando.

Este framework, si bien su principal objetivo es modelar una red eléctrica, presenta un enfoque de proveedor-consumidor al establecer que los nodos deben encontrarse conectados ya sea al generador (en el caso de la red eléctrica) o al centro de control (en el caso de la red de comunicaciones). Este comportamiento, al traspasarse al caso de la red chilena, se puede interpretar como los usuarios que necesitan mantenerse conectados a los nodos proveedores mencionados previamente para conservar su estatus de “conectados a Internet”, tanto nacional como internacionalmente, que es precisamente lo que se plantea en el primer criterio de selección. Además, el caso del modelo con interacciones bidireccionales se ajusta bien a la caracterización que se le ha dado al sistema interdependiente del Internet chileno en este trabajo.

### Métricas disponibles para redes interconectadas

La métrica utilizada por el framework elegido [74] corresponde a “**Node-MTFR**”, la cual determina el número mínimo de nodos que se debe remover para causar un fallo total. Dentro de [74] esta métrica es utilizada con el objetivo de medir el daño que inducen las interdependencias en las redes. Notemos que en el caso de la red chilena, al dejar de funcionar la red de interdependencias, el sistema completo deja de funcionar, dado que cada nodo en la red lógica está acoplado a alguno en la red física. De esta manera se implementó el método `node_mtfr`, que calcula el número mínimo de nodos que se debe remover en la red de interdependencias para que ésta deje de funcionar.

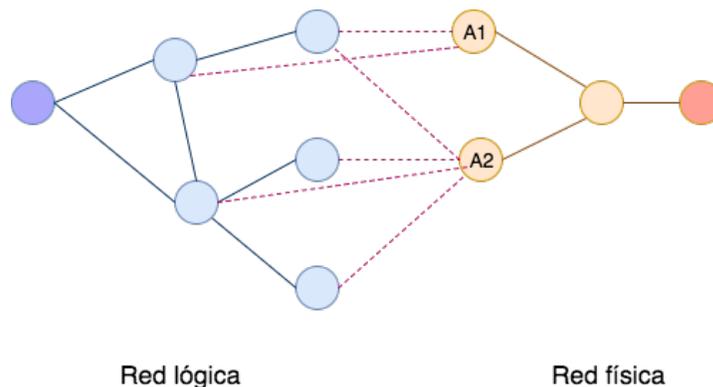


Figura 5.2: Nodos que satisfacen Node-MTFR en el sistema. Si se remueve el par A1-A2 las redes pierden todas sus interdependencias.

En [74] se demuestra que, en el caso de dependencias bidireccionales entre redes, el valor de la métrica Node-MTFR es igual al número de nodos que conforman el mínimo cubrimiento de vértices del grafo de interacciones entre redes. Este problema se resuelve determinando el *matching máximo* en un grafo bipartito tal que cada nodo pertenezca a un único arco del matching. En efecto, de acuerdo al teorema de König [52], que señala que el número mínimo de vértices para realizar un cubrimiento de arcos es igual al número de arcos que resuelven el problema de *matching máximo* (ver [86]).

En la figura 5.2 se muestra un ejemplo de sistema interdependiente artificial compuesto por una red lógica y una red física. Los arcos punteados corresponden a las conexiones entre redes. Para estas redes el valor de Node-MTFR es igual a 2. El par A1-A2 corresponde al par de nodos que satisface el mínimo cubrimiento de vertices y por lo tanto al removerlos se pierden todas las interdependencias entre redes.

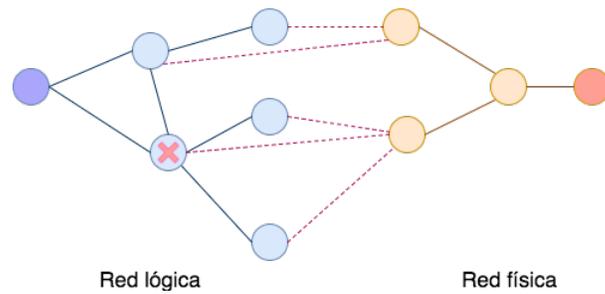
Además de la métrica Node-MTFR, puede utilizarse la métrica definida en [63] que en el contexto de una red eléctrica acoplada a su red de control, mide el **ratio de nodos funcionales en la red eléctrica** luego de un ataque a la red original. Esta métrica es utilizada en [63], trabajo que presenta el segundo framework más apropiado para estudiar las redes física y lógica de la Internet chilena. Esta métrica fue adaptada para propósitos del trabajo aquí presentado con el objetivo de medir la conectividad de la red percibida por los usuarios. En la figura 5.3 se puede ver qué nodos se consideran funcionales luego de un fallo en cascada en un sistema interdependiente artificial. Este método toma la cantidad original de nodos en la red lógica (cantidad que es almacenada al construir el sistema interdependiente) y la contrasta con la cantidad de nodos funcionales de la red en su estado actual.

## 5.2. Métricas seleccionadas

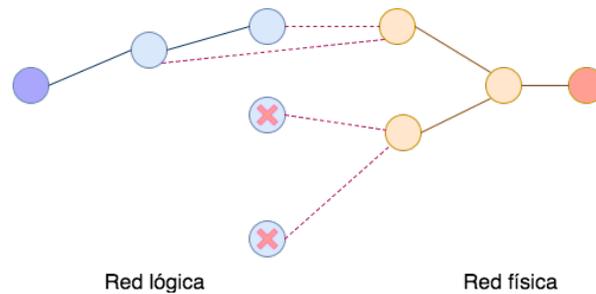
Por la falta de información disponible para el presente estudio, no nos fue posible el análisis de la red lógica y los servicios críticos correspondientes a los resultados esperados 4 y 5 de la primera etapa del proyecto. Esto no permitió la aplicación de un modelo de redes interconectadas ni sus métricas asociadas. El trabajo de revisión sistemática de métricas y la aplicación a un caso de estudio son parte de una tesis de Magíster en Ciencia de la Computación [3] y su aplicación será posible una vez que se cuente con toda la información requerida. Debido a esto, sólo pueden ser utilizadas las métricas de robustez en redes complejas descritas en la sección anterior.

Entre las métricas de robustez disponibles, dado que la red posee demasiados puntos de falla, se consideró el uso de métricas básicas, que a pesar de ser menos finas, permiten obtener una buena idea de la robustez de la red. Adicionalmente, dado que la red actual no es conexas, algunas de las métricas propuestas no podrán ser aplicables en la situación actual, pero si serán calculadas para la propuesta de mejora de la red a modo de seguimiento. A continuación se describen brevemente las métricas que serán utilizadas.

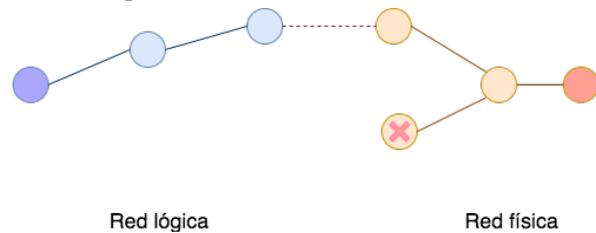
- *Tamaño de la componente más grande*  $C(G)$ :  
Es el caso de un grafo no conexo, como es la red de fibra óptica del país, se requiere identificar cuál es el tamaño de la red antes de evaluar el impacto de fallas o ataques. Para esto calculamos el tamaño de la componente más grande como proporción del total de comunas del país.
- *Node connectivity*  $\kappa(G)$ :  
Mínimo número de nodos tal que su eliminación desconecta el grafo. Cuando un grafo



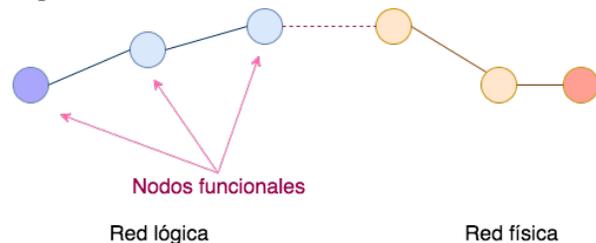
(a) Paso 1 - Se elimina un nodo para iniciar el fallo en cascada.



(b) Paso 2 - Nodos en la red lógica fallan por falta de acceso al proveedor.



(c) Paso 3 - Nodo en la red física falla por falta de soporte.



(d) Paso 4 - Las redes alcanzan un estado estable.  
Ratio de nodos funcionales: 0.5

Figura 5.3: Ejemplo de nodos considerados funcionales para la métrica “ratio de nodos funcionales”.

posee  $\kappa(G) = k$ , lo llamamos  $k$ -conexo. En nuestro caso, la red no es conexas, por lo que esta métrica en la situación actual es igual a 0. Puede ser calculado para la componente

más grande de la situación actual.

- *Edge betweenness centrality*  $c_B(e)$ :  
Se calcula como el número de caminos más cortos que pasan a través de tal enlace. Se utiliza la versión en enlaces porque en nuestro caso, donde analizamos solo la red física, es más probable el corte de un enlace de fibra que la falla en un nodo o comuna.
- *Node Wiener impact*  $\tau_v$  (también conocida como *closeness vitality*):  
Métrica definida para grados 2-conexos. Se plantea como una métrica apropiada, pero en el presente informe sólo será aplicada a la propuesta de mejora de la red y podrá ser comparada con futuras mejoras a realizar. Se define como sigue:

Sea  $G$  un grafo 2-conexo. *Node Wiener impact* de un vértice  $v$  se define como:

$$\tau_v = W(G) - W(G - v), \quad (5.5)$$

Donde  $G - v$  se refiere al grafo obtenido luego de eliminar el vértice  $v$ .  $W(G)$  es el índice de Wiener definida como:

$$W(G) = \sum_{u \in V} \sum_{v \in V, v < u} D(u, v) \quad (5.6)$$

Donde  $D(u, v)$  es la distancia geodésica entre los nodos  $u$  y  $v$ .

En algunos trabajos la métrica es definida como

$$\tau_v = W(G - v) - W(G) + T(v), \quad (5.7)$$

donde

$$T(v) = \sum_{u \in V} D(u, v) \quad (5.8)$$

Ambas definiciones son equivalentes en su concepción aunque sus valores puedan diferir.

### 5.3. Evaluación de la Internet chilena

La infraestructura de la Internet chilena no permite tener un país completamente conectado. De acuerdo a nuestra verificación en terreno constatamos que un 89,3 % de las comunas reciben algún cableado de fibra óptica. En muchos casos, los tendidos no pudieron ser verificados continuamente desde el camino público, por lo que solo podemos asegurar conectividad por fibra óptica en 263 (76,6 %). Sin embargo, para evaluar la resiliencia de la red, debemos considerar la conectividad solo mediante caminos disjuntos, de esta forma el tamaño de la componente conexa más grande de nuestra red de  $C(G) = 59$  comunas, equivalente a un 17,1 % de la red.

En cuanto a la tolerancia a fallas de nuestra red, que corresponde al mínimo número de enlaces tal que su eliminación desconecta el grafo, es 0 ya que no está conectada. La centralidad máxima del grafo en sus enlaces (*edge betweenness*) es de 601, que corresponde a la arista La Cisterna-Lo Espejo. La importancia relativa de este arco se puede calcular dividiendo este valor por la cantidad de pares de nodos existentes en el grafo ( $N(N - 1)/2$ ), que refleja que porcentaje de rutas se ven afectadas por la eliminación de ese camino. Este valor muy bajo, un 1,74 % y no tiene mayor significado por lo desconexa que es la red. Por último, el Índice de Node Wiener Impact no puede ser calculado ya que el grafo no robusto en sus nodos.

Cuadro 5.1: Métricas calculadas para la red de fibra óptica actual.

Métrica	Resultado
Porcentaje de cobertura (comunas)	59 (17,1 %)
Tolerancia a fallas	0
Población conectada de forma robusta	sin información
Comunas conectadas de forma robusta	sin información
Enlaces débiles	20 (15,4 %)
Max Edge Betweenness Centrality	601 (1,742 %)
Node Wiener Impact	-

# Capítulo 6

## Propuestas de mejora para la Internet chilena

### 6.1. Metodología

En términos generales, la metodología consistió en calcular la forma más barata de conectar cada par de comunas, para luego definir, mediante la resolución de un problema de optimización entera, cuáles de esos caminos deberían ser construidos para obtener una red resiliente de acuerdo a las métricas definidas en la sección 5.2. En la práctica, esto corresponde a conectar cada comuna con al menos otras dos de forma directa (sin pasar por comunas intermedias), al menor costo de construcción posible. A continuación se presentan las etapas de la metodología.

#### Construcción del grafo en base a la información geo-referenciada

Los datos utilizados para realizar la propuesta fueron los tendidos de fibra, electricidad y multipar de cobre, rutas de ferry y caminos sin postación de ningún tipo expresadas como objeto geométrico en la base de datos. Debido a que los análisis de robustez y el cálculo de métricas están basados en teoría de grafos, fue necesario convertir la información geo-referenciada a un grafo. Para esto se descompusieron los objetos geométricos de la base de datos en conjuntos de coordenadas interconectadas entre sí, que fueron convertidos a nodos y arcos de un grafo. Con la transformación de los objetos geométricos obtuvimos un grafo  $G$ , compuesto por un conjunto de nodos  $V$  ( $|V| \approx 92.000$ ) y un conjunto de arcos  $E \subseteq \{V \times V\}$  ( $|E| \approx 87.000$ ). Del total de nodos de  $G$ , 346 corresponden a comunas y 8 a puntos limítrofes con Argentina.

A modo de ejemplo, en la figura 6.1 se muestra en verde el segmento de una línea registrada en la base de datos, que está compuesta por un conjunto de coordenadas (puntos A,B,C,...). Cada uno de estos puntos fue convertido en un nodo del grafo, y cada conexión en un arco.

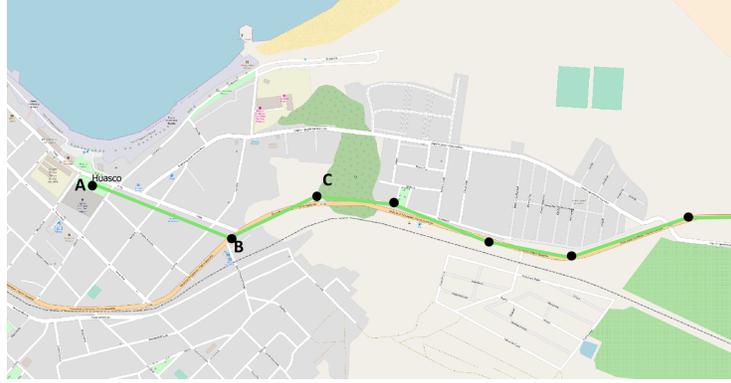


Figura 6.1: Ejemplo de un segmento de tendido de fibra óptica georeferenciados entre Huasco y Freirina.

### Costo asociado a cada camino de grafo

Para cada segmento (enlace entre dos nodos) fue calculada su distancia como el camino ortodrómico entre las coordenadas de ambos puntos según la fórmula del semiverseno descrita a continuación.

Sea  $i = (\phi_A, \lambda_A)$  y  $j = (\phi_B, \lambda_B)$ . Sea  $\Delta\phi$  y  $\Delta\lambda$  las distancias absolutas entre las coordenadas de ambos puntos. Calculamos la distancia entre ambos puntos como:

$$d = R \times \Delta\sigma$$

Donde

$$\Delta\sigma = 2 \arcsin \sqrt{\sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) + \cos\phi_A \cos\phi_B \sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right)}, y$$

$$R = 6378,137km \text{ el radio de la Tierra.}$$

Para posteriormente minimizar el costo de construcción de una red robusta, fue necesario valorizar la construcción de tendidos de fibra óptica en cada uno de los tipos de caminos existentes, esto es: tendido de fibra óptica ya existente ( $C_f$ ), postación de electricidad o cobre ( $C_p$ ), sin tendido de ningún tipo ( $C_n$ ) y conexión submarina en el caso de las islas ( $C_s$ ). Con estos valores se calculó, para cada arco  $e_{i,j}$ , un peso  $w_{e_{i,j}}$  equivalente al costo de construcción de un tendido de fibra óptica a lo largo de ese camino  $l_{e_{i,j}}$ .

La figura 6.2 muestra un segmento del mapa de la Región de la Araucanía, en que se aprecia el camino documentados entre Nueva Toltén y Teodoro Schmidt. Este camino tiene dos tramos de tendido diferentes, un primer tramo entre Toltén y el cruce hacia Carahue ( $e_{A,B}$ ) de un largo de  $l_{e_{A,B}} = 10,70$  kms., con un costo de construcción  $C_f$  por kilómetro, y un segundo tramo desde el cruce hasta Teodoro Schmidt ( $e_{B,C}$ ) sin ningún tipo de postación, con un largo  $l_{e_{B,C}} = 13,48$

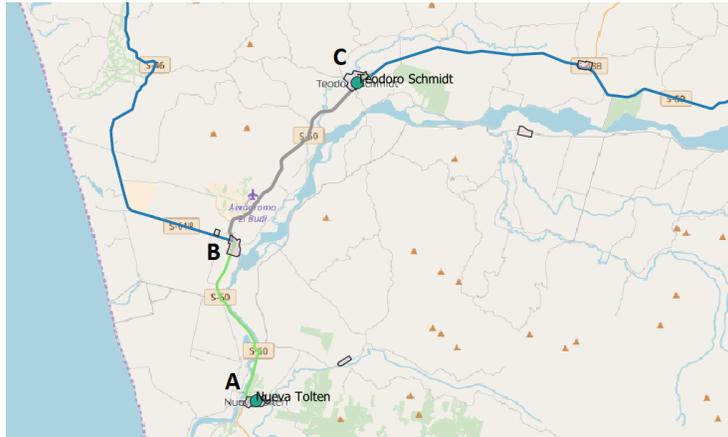


Figura 6.2: Segmento del mapa de la Región de la Araucanía, que muestra el camino documentado entre Nueva Toltén y Teodoro Schmidt.

kms. y un costo de construcción unitario de  $C_n$  por kilómetro. El costo entonces de llegar de Nueva Toltén a Teodoro Schmidt será de  $w_{e_{A,B}} + w_{e_{B,C}}$ , equivalente a  $l_{A,B}C_f + l_{B,C}C_n$ <sup>1</sup>.

## Matriz de costo potencial

Una vez definido el costo de construcción para cada uno de los arcos, se construyó una matriz que nos indicara cuál era el costo más bajo de llegar de una comuna a otra de forma directa, considerando solo caminos disjuntos. La matriz resultante  $A$  corresponde a la matriz de adyacencia de un grafo normalizado, en que cada elemento  $A_{i,j}$  corresponde al valor más bajo de conectar directamente la comuna  $i$  con la comuna  $j$ .

Este grafo se construyó utilizando el algoritmo de Dijkstra que calcula el camino más corto (o a menor costo) entre cada par de nodos de un grafo. Sin embargo, para obtener una red robusta es necesario que nuestra solución entregue caminos disjuntos entre comunas, de forma de minimizar el impacto del corte de los tendidos. Para esto se utilizó el algoritmo que se presenta en el cuadro 6.1.

En nuestro proceso, cuando un trozo de tendido se encontraba compartido entre dos rutas entre comunas, éste se consideró sólo en la ruta que en total fuese la más barata y fue eliminado de la otra ruta. En caso de que las dos rutas tuvieran el mismo costo total, el tramo compartido fue considerado dentro de la ruta más corta en distancia. A modo de ejemplo, en la figura 6.3a muestra varias comunas de la VI región. En verde se muestran los tendidos de fibra óptica existentes, y aquellas marcadas con rojo son las consideradas por nuestro algoritmo. Por ejemplo, Peumo está conectado con Pichidegua, y Pichidegua con Las Cabras. La ruta entre Las Cabras y

<sup>1</sup>Esta es una simplificación de la solución. En estricto rigor, el camino de  $A$  a  $B$  y el de  $B$  a  $C$  están compuestos por una secuencia de nodos, por lo que el largo de cada uno corresponde a la sumatoria de las distancias de cada enlace entre los nodos intermedios

```

G = Grafo de caminos existentes
V = Conjunto de vértices del grafo G
C = Conjunto de comunas
A = Matriz de adyacencia de dimensiones |C| X |C|

H = G
B = Matriz de dimensiones |C| X |C| tal que B[i,j] = menor costo de llegar de i a
j según algoritmo de Dijkstra sobre el grafo H.

While (min(B) < Inf) {

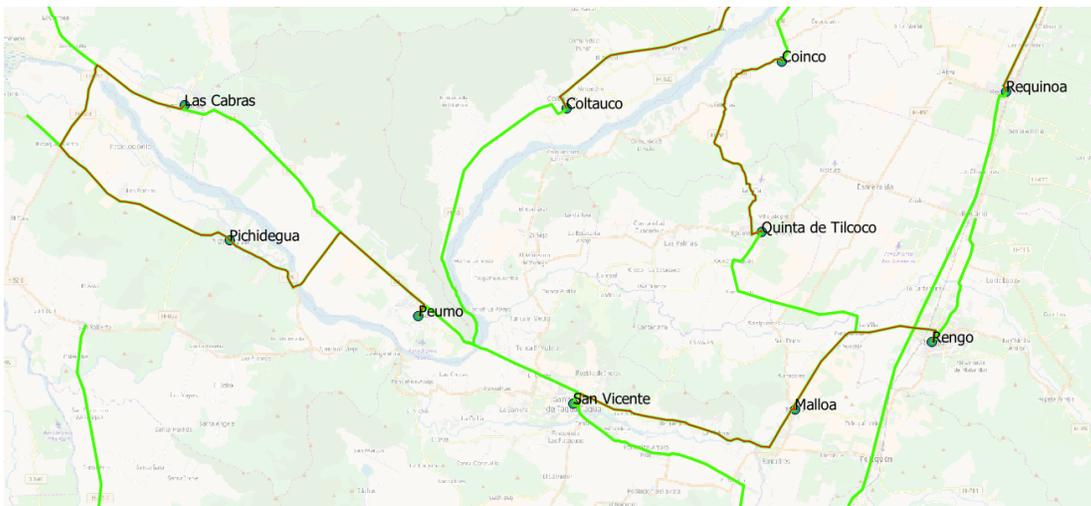
  sea [i,j] tal que B[i,j] = min(B)
  sea V' el conjunto de nodos que componen el camino entre i y j

  A[i,j]=B[i,j]
  H = grafo inducido (grafo = H, nodos = V \ V')
  B = Matriz de dijkstra para C sobre el grafo H.
}

```

Cuadro 6.1: Cálculo de camino más corto entre comunas para construcción de la matriz de costo potencial.

Peumo tiene un tendido de fibra, pero ésta conexión no es considerada porque comparte un tramo con la ruta Peumo-Pichidegua que es más corta. Se ven casos similares en las otras comunas.



(a) Tendidos de fibra óptica validados y rutas que fueron consideradas en el procesamiento.

## Modelo de optimización

Nuestra propuesta de tendido de fibra para una red robusta considera que ésta sea 2-conexa en todas las comunas, pero además proponemos que su construcción sea al menor costo posible.

Para esto creamos un modelo que indica cuáles de los enlaces deben ser construidos de forma que toda la red quede conectada de forma redundante, optimizando el costo total de la inversión.

El modelo que proponemos corresponde a un problema de optimización que minimiza el costo total de construcción de la red, sujeto a que cada comuna se conecte a al menos otras dos. Para esto definimos el vector  $C$  como el conjunto de todas las comunas del país (cardinalidad  $N = 346$ ).

Sea  $A$  una matriz simétrica de tamaño  $C \times C$ , tal que cada elemento  $A_{i,j}$  corresponde al costo de construcción del enlace de fibra óptica entre las comunas  $i$  y  $j$ , calculado de acuerdo a lo descrito anteriormente.

Sea  $B$  una matriz de tamaño  $C \times C$  tal que resuelve el siguiente problema de optimización:

$$\begin{aligned} \text{Costo} &= \min \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (B_{i,j} \times A_{i,j}) \\ \text{s.a.} \\ B_{i,j} &\in \{0, 1\} \\ \sum_{j=1}^N B_{i,j} &\geq 2 \quad \forall i \in C \end{aligned}$$

La matriz resultante  $B$  corresponderá a los caminos que deben existir para obtener una red robusta para el 100 % de las comunas. El costo de construcción del camino entre las comunas  $i$  y  $j$  corresponderá al valor  $A_{i,j}$  y el valor total de la construcción de la red corresponderá al valor resultante de la función  $\text{Costo}$ .

## Aumento de Robustez

La restricción de que cada comuna esté conectada con al menos otras dos, no asegura que todas estén conectadas entre sí. Podría pasar, por ejemplo, que tres comunas formaran un triángulo estando conectados cada comuna con las otras dos, pero aisladas las tres del resto de la red. Para evitar eso, una vez obtenido el costo mínimo mediante la solución del problema de optimización, verificamos que todos los nodos estuvieran conectados entre sí.

Para realizar esto, se identificaron las componentes del grafo  $Z$ . Si  $|Z| > 1$ , se tomó aleatoriamente una componente  $z$  del grafo y se calculó mediante el algoritmo de Dijkstra el costo de llegar de cada comuna  $c \in z$  a cada comuna  $c \notin z$ . De esta forma, se conectó el componente  $Z$  al resto del grafo mediante el enlace más barato disponible, reduciendo la cantidad de componentes del grafo resultante a  $|Z| - 1$ . El proceso se repitió hasta que el grafo estuviese completamente conectado.

Por otra parte, para obtener una red robusta, se agregó la restricción de que la infraestructura propuesta resistiera al menos un corte en cualquier parte de la red sin desconectar ninguna comuna (métrica  $\kappa = 2$ ). Para esto se evaluó el resultado de eliminar cada enlace de la red propuesta, en caso de que ésta se desconectara, se agregó un nuevo enlace que agregara robustez. Este proceso se repitió iterativamente hasta que todos los enlaces pudiesen ser eliminados independientemente sin desconectar ninguna comuna.

## 6.2. Supuestos

Para la construcción de una propuesta de acuerdo a la metodología presentada en el punto anterior se realizaron una serie de supuestos en casos en que no se contaba con toda la información.

### S1. Conexión entre comunas:

Para la conexión entre comunas consideramos como nodo central las coordenadas correspondientes a la plaza de armas de la comuna, y todos los tendidos documentados en los caminos fueron conectados desde el inicio del camino a la plaza de armas extendiendo su mismo tipo de conexión. En casos de que existiera más de una ruta directa entre dos comunas, se consideró sólo la de menor costo de construcción, descartando las otras como rutas factibles.

### S2. Conexión entre comunas del Gran Santiago:

En el caso de las comunas del Gran Santiago, si bien no se realizó una validación, se supuso una conexión de fibra entre los centros de cada comuna contigua. Las comunas conectadas fueron las siguientes: Quilicura, Lo Barnechea, Renca, Conchalí, Quinta Normal, Cerro Navia, Pudahuel, Lo Prado, Estación Central, Cerrillos, Maipú, Padre Hurtado, Lo Espejo, La Cisterna, El Bosque, San Ramón, La Pintana, San Bernardo Pirque, Puente Alto, La Florida, La Granja, Pedro Aguirre Cerda, San Joaquín, San Miguel, Ñuñoa, Peñalolén, La Reina, Providencia, Las Condes, Vitacura, Huechuraba y Recoleta.

### S3. Conexiones submarinas de aguas superficiales:

En el caso de las islas cercanas al continente, la ruta utilizada para el cálculo de rutas de conexión eficientes fue el trazado de rutas de ferry.

### S4. Rutas no validadas agregadas:

Se agregaron al modelo 949 kilómetros de rutas de fibra óptica no validadas cuya fuente es el informe “Estudio de Modelos de Inversión y Explotación bajo el Concepto de Asociación Público Privada”, Zagreb Consultores [23]. Adicionalmente se agregaron 4.083 kilómetros de rutas que no fueron documentadas, basadas en la información de la red vial 2016 del MOP. Para efectos de los cálculos, éstas últimas se consideraron como rutas sin tendido ni postación de ningún tipo. Estas rutas serán validadas on-site a la brevedad.

## S5. Costo de construcción:

Para los costos de construcción de los tendidos de fibra se realizaron los siguientes supuestos:

- Sobre el tendido de fibra óptica existente ( $C_f$ ):  
Para efectos del modelo de optimización, la construcción de conexiones de fibra sobre los tendidos ya existentes se consideró \$ – 1 USD por kilómetro. Esto para que el modelo considerara las rutas existentes dentro de la solución final propuesta. Para efectos del cálculo de costos totales, el costo considerado fue 0 USD por kilómetro.
- Sobre caminos sin ningún tipo de cableado ( $C_n$ ):  
En estos casos se consideró el costo de instalación de postes para cableado y el cableado mismo a un valor de 25.000 USD por kilómetro, de acuerdo a lo reportado en el informe “Estudio de Modelos de Inversión y Explotación bajo el Concepto de Asociación Público Privada”, anexo VII, de Zagreb Consultores [23].
- Sobre el tendido de electricidad o cobre ( $C_p$ ):  
En aquellos casos en que existía postación que pudiera ser utilizada, se consideró un menor costo de construcción calculado como  $C_n - 8,000$  USD por kilómetro construido.
- Sobre rutas submarinas  $C_s$ :  
Para los cableados de fibra submarinos requeridos para alcanzar las comunas Juan Fernández, Isla de Pascua y Villa las Estrellas se consideró un costo de construcción de 35.000 USD por kilómetro construido, de acuerdo a lo reportado en el informe “Estudio de Modelos de Inversión y Explotación bajo el Concepto de Asociación Público Privada”, anexo VII, de Zagreb Consultores [23].
- Sobre rutas de ferry:  
El costo de construcción de tendidos de fibra submarinos en aguas superficiales utilizado fue el mismo que el de construcción en rutas sin postación.
- Sobre caminos inexistentes ( $C_a$ ):  
En los casos en que no existía camino alternativo, se consideró la construcción de un camino directo entre comunas. Esta opción fue considerada solo en los casos en que no habían rutas documentadas posibles. El costo de construcción de tendido en estos casos se estimó utilizando el costo de construcción en rutas sin postación para la distancia lineal entre ambas comunas, ponderada por un factor  $1,41 (\sqrt{2})$ .

## S6. Operación de la red:

- Debido a la falta de información sobre la red lógica, suponemos que la infraestructura de fibra óptica es suficiente para asegurar conectividad.

- Suponemos también que los tendidos de fibra existentes y propuestos están configurados para trabajar en conjunto. Esto está regulado en la norma técnica de SUBTEL<sup>2</sup>, pero ésta no es suficientemente precisa como para asegurar que su objetivo se cumpla.

S7. Puntos de conexión limítrofe:

Se consideraron 8 puntos de conexión con Argentina que agregan resiliencia a la red en los puntos en que no hay otra opción de acceso. Estos puntos fueron tratados como una comuna más dentro del modelo, pero se les exigió solo una conexión al resto de la red.

S8. Excepciones con enlaces simples:

Para las comunas que no tenían más que un acceso y que tampoco podían conectarse a puntos limítrofes con Argentina, se les exigió solo una conexión. Entre estas comunas se encuentran Isla de Pascua, Villa las Estrellas, Ralco, Alhué y Alto del Carmen, entre otras.

S9. Apertura de nodos y repetidores: En nuestros cálculos no consideramos el costo de abrir un nodo o de poner un repetidor óptico ya que el enfoque nuestro es la resiliencia usando teoría de grafos.

S10. Costo de inversión y operación: Nuestra propuesta consideró sólo el costo de inversión necesario para la construcción de tendidos faltantes de forma de obtener una red robusta (CAPEX) y no corresponde al costo total de propiedad (TCO).

S11. Proyectos FOA y FOA Magallanes:

Para efectos de los cálculos se consideraron los trazados de los proyectos Fibra Óptica Austral y Fibra Óptica Austral - Magallanes como si ya estuvieran construidos.

### 6.3. Propuesta de tendidos a construir para una Internet resiliente

La aplicación de la metodología anterior dio como resultado la necesidad de construir, total o parcialmente, 195 tendidos entre comunas, de las cuales 3 son submarinas. Adicionalmente se requiere la construcción de 13 conexiones entre comunas por rutas que no están documentadas equivalentes a 1.118 kilómetros (considerando uniones directas entre la plaza de armas de cada comuna). Las rutas submarinas propuestas consideran la conexión a la comuna más cercana, con excepción de la conexión de la Isla Juan Fernández con el continente, que siendo Loanco la localidad más cercana, se forzó la conexión hacia Constitución por tener mejor infraestructura y conectividad.

---

<sup>2</sup>[http://www.subtel.gob.cl/images/stories/articles/subtel/asocfile/req\\_tec\\_trafico.pdf](http://www.subtel.gob.cl/images/stories/articles/subtel/asocfile/req_tec_trafico.pdf)

Los montos asociados son de: USD\$218 millones de tendido aéreo, USD\$161 millones de tendido submarino, y una estimación de USD\$38 millones en rutas actualmente no documentadas. La propuesta completa equivale a un total de USD\$417 millones. El cuadro 6.2 presenta el listado de rutas a construir y con el costo de construcción asociado.

Cuadro 6.2: Propuesta de tendidos de fibra óptica a construir para obtener una robusta.

Origen	Destino	Costo (MM \$USD)	Tipo de tendido
Constitución	Juan Fernández	21,67	Submarina
Puerto Williams	Villa Las Estrellas	33,79	Submarina
Juan Fernández	Isla de Pascua	105,55	Submarina
Vicuña	Samo Alto	0,01	Aéreo
Osorno	San Pablo	0,03	Aéreo
Ninhue	San Nicolas	0,03	Aéreo
Melipilla	San Pedro	0,05	Aéreo
Vallenar	La Higuera	0,06	Aéreo
Curicó	Rauco	0,08	Aéreo
Palmilla	Santa Cruz	0,08	Aéreo
Santo Domingo	Litueche	0,09	Aéreo
Lago Verde	Punto Limítrofe 5	0,09	Aéreo
Los Andes	Calle Larga	0,09	Aéreo
Valdivia	Corral	0,1	Aéreo
Antofagasta	Taltal	0,11	Aéreo
Nogales	Llailay	0,11	Aéreo
Pozo Almonte	Huara	0,12	Aéreo
Concón	Puchuncaví	0,12	Aéreo
San Pedro de la Paz	Santa Juana	0,13	Aéreo
Rancagua	Graneros	0,13	Aéreo
Chimbarongo	Teno	0,13	Aéreo
San Felipe	Santa María	0,14	Aéreo
Curanilahue	Los Álamos	0,15	Aéreo
Pirque	San José de Maipo	0,16	Aéreo
Coínco	Olivar Alto	0,16	Aéreo
Curaco de Vélez	Achao	0,16	Aéreo
Iquique	Alto Hospicio	0,17	Aéreo
Malloa	Quinta de Tilcoco	0,17	Aéreo
Vallenar	Freirina	0,18	Aéreo
Palena	Punto Limítrofe 11	0,18	Aéreo
Futaleufú	Punto Limítrofe 10	0,18	Aéreo
Lota	Arauco	0,19	Aéreo
Rengo	Requínoa	0,19	Aéreo
Curaco de Vélez	Dalcahue	0,2	Aéreo

Valparaíso	Viña del Mar	0,2	Aéreo
Pelarco	Cumpeo	0,22	Aéreo
Castro	Ancud	0,23	Aéreo
San Clemente	Colbún	0,23	Aéreo
Villa Alegre	Yerbas Buenas	0,23	Aéreo
Cumpeo	Molina	0,26	Aéreo
Licantén	Vichuquén	0,27	Aéreo
Penco	Talcahuano	0,28	Aéreo
Viña del Mar	Quilpué	0,28	Aéreo
Coquimbo	Ovalle	0,29	Aéreo
Los Ángeles	Antuco	0,3	Aéreo
Isla de Maipo	Talagante	0,3	Aéreo
Osorno	Puaucho	0,31	Aéreo
Portezuelo	Nipas	0,31	Aéreo
Negrete	Renaico	0,31	Aéreo
Constitución	Empedrado	0,32	Aéreo
Puchuncaví	Zapallar	0,32	Aéreo
Palmilla	Peralillo	0,33	Aéreo
Contulmo	Purén	0,34	Aéreo
Romeral	Curicó	0,35	Aéreo
Cunco	Melipeuco	0,36	Aéreo
Galvarino	Cholchol	0,38	Aéreo
Curepto	Licantén	0,38	Aéreo
El Carmen	San Ignacio	0,38	Aéreo
Pelarco	San Rafael	0,38	Aéreo
Frutillar Bajo	Puerto Octay	0,39	Aéreo
Rancagua	Requínoa	0,39	Aéreo
Valdivia	Mafil	0,4	Aéreo
Galvarino	Traiguén	0,4	Aéreo
Concón	Viña del Mar	0,4	Aéreo
Casablanca	Algarrobo	0,41	Aéreo
Ovalle	Monte Patria	0,41	Aéreo
Concón	Quintero	0,43	Aéreo
Catemu	Panquehue	0,43	Aéreo
Puqueldón	Quellón	0,45	Aéreo
Puerto Octay	Purranque	0,45	Aéreo
Ninhue	Portezuelo	0,45	Aéreo
Pichilemu	Marchihue	0,46	Aéreo
Los Sauces	Traiguén	0,46	Aéreo
Carahue	Saavedra	0,46	Aéreo
Copiapó	Vallenar	0,47	Aéreo

La Serena	Andacollo	0,47	Aéreo
Lumaco	Purén	0,47	Aéreo
Quillota	Limache	0,49	Aéreo
Colbún	Yerbas Buenas	0,5	Aéreo
Conchalí	Colina	0,5	Aéreo
Puchuncaví	Quintero	0,5	Aéreo
Quilaco	Ralco	0,51	Aéreo
Coihueco	San Fabian	0,51	Aéreo
María Pinto	Padre Hurtado	0,53	Aéreo
Los Muermos	Mauñín	0,54	Aéreo
Quilleco	Santa Barbara	0,56	Aéreo
Coyhaique	Punto Limítrofe 8	0,57	Aéreo
Villarrica	Panguipulli	0,58	Aéreo
Cobquecura	Quirihue	0,58	Aéreo
Alto Hospicio	Pozo Almonte	0,59	Aéreo
Chañaral	Diego de Almagro	0,6	Aéreo
Cañete	Contulmo	0,6	Aéreo
Nueva Imperial	Teodoro Schmidt	0,61	Aéreo
Quillón	Nipas	0,61	Aéreo
Hijuelas	Catemu	0,62	Aéreo
Paredones	Pumanque	0,64	Aéreo
Puerto Montt	Llanquihue	0,64	Aéreo
Buín	Calera de Tango	0,68	Aéreo
Cerro Sombrero	Pampa Guanaco	0,69	Aéreo
Villa Tehuelches	Río Verde	0,72	Aéreo
Vallenar	Alto del Carmen	0,73	Aéreo
Villa Punta Delgada	Punto Limítrofe 7	0,74	Aéreo
Colina	Lampa	0,74	Aéreo
Lago Ranco	Río Bueno	0,77	Aéreo
Mostazal	Paine	0,78	Aéreo
San Pablo	La Unión	0,78	Aéreo
Litueche	San Pedro	0,81	Aéreo
Paredones	Vichuquén	0,81	Aéreo
Fresia	Frutillar Bajo	0,85	Aéreo
Gorbea	Loncoche	0,85	Aéreo
Litueche	Navidad	0,85	Aéreo
Valdivia	Futrono	0,86	Aéreo
Pelluhue	Cobquecura	0,87	Aéreo
Santa Juana	Nacimiento	0,88	Aéreo
San Carlos	San Fabian	0,89	Aéreo
Antuco	Huepil	0,93	Aéreo

Andacollo	Samo Alto	0,95	Aéreo
Lebu	Arauco	0,96	Aéreo
Pichilemu	Paredones	1,01	Aéreo
Saavedra	Teodoro Schmidt	1,03	Aéreo
Empedrado	Chanco	1,03	Aéreo
Fresia	Los Muermos	1,05	Aéreo
Futrono	Lago Ranco	1,08	Aéreo
Hualqui	San Rosendo	1,09	Aéreo
Curacautín	Lonquimay	1,1	Aéreo
Malloa	San Fernando	1,1	Aéreo
Nueva Toltén	Mariquina	1,11	Aéreo
Hualañe	Sagrada Familia	1,13	Aéreo
Hualqui	Yumbel	1,15	Aéreo
Tirúa	Lumaco	1,16	Aéreo
Villa O'Higgins	Punto Limítrofe 6	1,17	Aéreo
Tocopilla	María Elena	1,18	Aéreo
Camiña	Huara	1,19	Aéreo
Putre	Arica	1,2	Aéreo
Pozo Almonte	Pica	1,23	Aéreo
Los Lagos	Panguipulli	1,24	Aéreo
Puerto Octay	Entre Lagos	1,24	Aéreo
Curepto	Pencahue	1,27	Aéreo
Chile Chico	Puerto Ingeniero Ibañez	1,27	Aéreo
Combarbalá	Monte Patria	1,31	Aéreo
Copiapó	Caldera	1,31	Aéreo
Puelo	Hornopirén	1,33	Aéreo
Rio Negro	Puacho	1,34	Aéreo
San Pablo	Entre Lagos	1,44	Aéreo
Las Cabras	Alhué	1,52	Aéreo
Salamanca	Petorca	1,58	Aéreo
La Estrella	Navidad	1,62	Aéreo
Calbuco	Ancud	1,63	Aéreo
Tirúa	Carahue	1,66	Aéreo
Villa Punta Delgada	Cerro Sombrero	1,87	Aéreo
Vilcún	Curacautín	1,94	Aéreo
Arica	Codpa	1,95	Aéreo
Puelo	Puerto Varas	2,01	Aéreo
Visviri	Putre	2,02	Aéreo
Mejillones	Tocopilla	2,05	Aéreo
Romerol	Punto Limítrofe 9	2,11	Aéreo
Sierra Gorda	María Elena	2,12	Aéreo

Vallenar	Huasco	2,13	Aéreo
Calama	San Pedro de Atacama	2,46	Aéreo
Melipeuco	Lonquimay	2,85	Aéreo
Camiña	Colchane	2,92	Aéreo
Cochrane	Chile Chico	2,94	Aéreo
Cunco	Curarrehue	3,00	Aéreo
Colchane	Huara	3,04	Aéreo
Caldera	Tierra Amarilla	3,12	Aéreo
Cochrane	Caleta Tortel	3,16	Aéreo
Quellón	Melinka	3,18	Aéreo
Corral	La Unión	3,53	Aéreo
Villa O'Higgins	Caleta Tortel	3,69	Aéreo
Paihuano	Punto Limítrofe 4	3,7	Aéreo
Chaitén	Hornopirén	3,92	Aéreo
Iquique	Tocopilla	3,99	Aéreo
Taltal	Chañaral	4,07	Aéreo
Visviri	Arica	4,22	Aéreo
Calama	Ollagüe	4,29	Aéreo
Porvenir	Pampa Guanaco	4,65	Aéreo
Puerto Cisnes	Melinka	5,13	Aéreo
Pozo Almonte	Ollagüe	5,72	Aéreo
Codpa	Iquique	6,9	Aéreo
Sierra Gorda	San Pedro de Atacama	7,56	Aéreo
Huara	Pica	2,55	Sin camino documentado
Illapel	Canela Baja	1,34	Sin camino documentado
Coltauco	Alhue	1,03	Sin camino documentado
Lolol	Pumanque	0,48	Sin camino documentado
Palena	Lago Verde	2,45	Sin camino documentado
Rio Verde	Cerro Castillo	5,89	Sin camino documentado
Futaleufu	Chaiten	2,64	Sin camino documentado
Chonchi	Puqueldon	0,29	Sin camino documentado
Curaco de Velez	Castro	0,5	Sin camino documentado
Punta Arenas	Rio Verde	2,41	Sin camino documentado
Puerto Williams	Pampa Guanaco	4,39	Sin camino documentado
Cerro Castillo	Villa O'Higgins	10,99	Sin camino documentado
Lago Verde	Puerto Cisne	3,02	Sin camino documentado

Las figuras 6.4 a la 6.14 muestran fragmentos del mapa de tendido propuesto. Las líneas verdes muestran los caminos en que se validó la existencia de tendidos de fibra óptica, ya sea simple, doble, triple o cuádruple, las líneas rojas muestran el resultado del proceso de optimización para obtener una red resiliente considerando conexiones disjuntas entre las comunas.

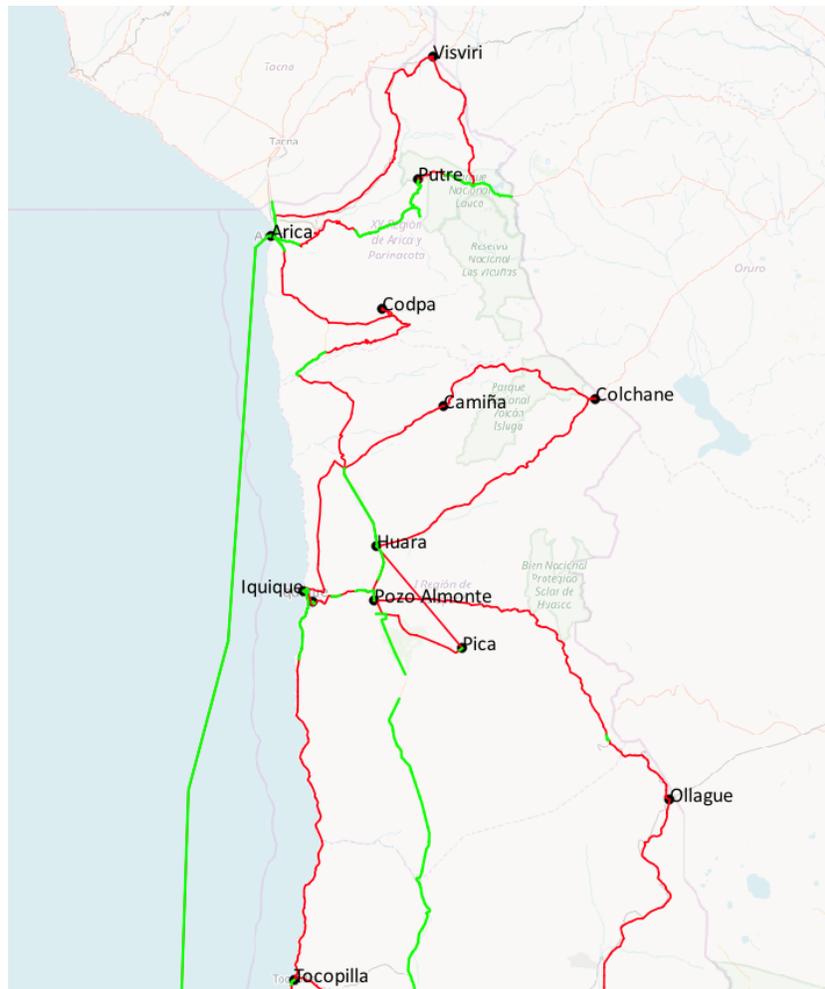


Figura 6.4: Segmento del mapa propuesto

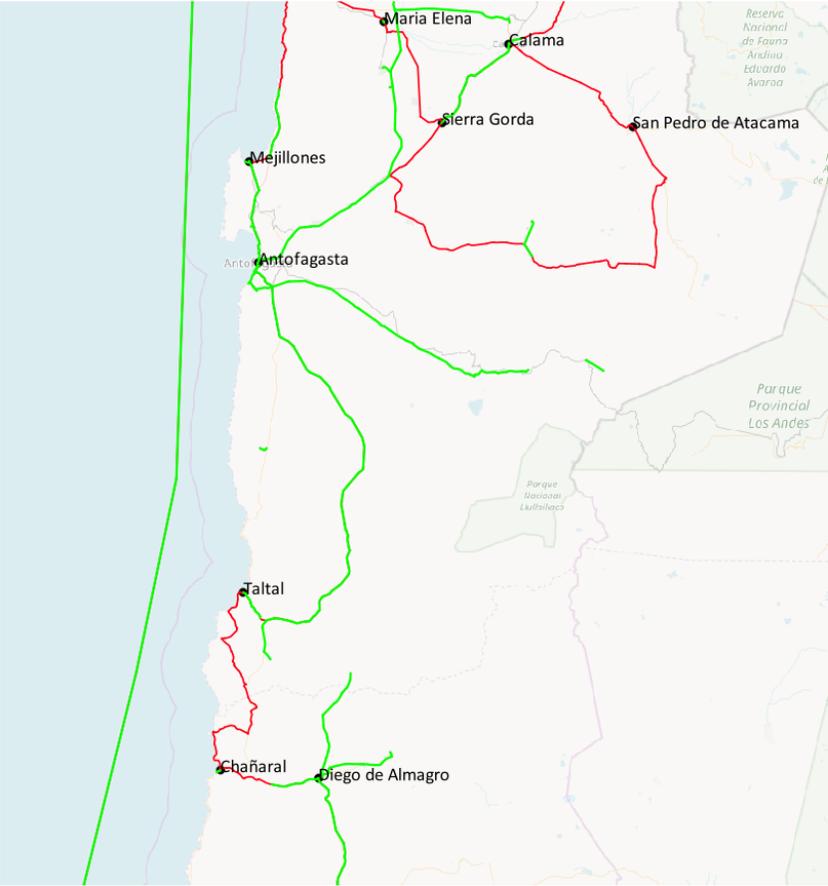


Figura 6.5: Segmento del mapa propuesto



Figura 6.6: Segmento del mapa propuesto

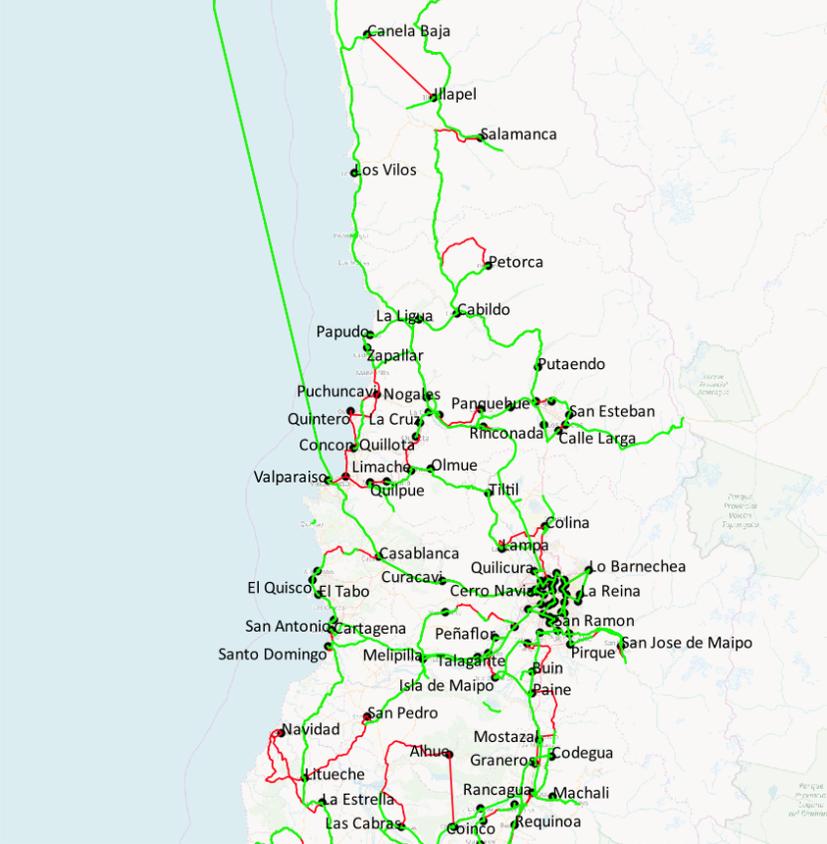


Figura 6.7: Segmento del mapa propuesto



Figura 6.8: Segmento del mapa propuesto



Figura 6.9: Segmento del mapa propuesto

## 6.4. Propuestas alternativas

La propuesta presentada en la sección anterior entrega una red robusta que conecta al 100 % de los habitantes de país y tolera una falla en cualquier enlace sin desconectar la red (salvo excepciones en supuesto S8). Considerando el alto costo de implementar la solución completa, realizamos 2 propuestas alternativas que consideran cobertura total de las comunas del país, pero varían en la robustez de la red.

### 6.4.1. Propuesta alternativa 1

Esta propuesta considera asegurar una red robusta a un 90 % de la población del país. Este porcentaje se concentra en 165 comunas, que corresponden a un 48 % del total. Para el 52 % restante se considera enlace simple. Esta alternativa propone la construcción total o parcial de 160 tendidos entre comunas, de las cuales 3 son submarinas. Adicionalmente se requiere la construcción de 4 conexiones entre comunas donde no existen rutas alternativas en la documentación disponible. Los montos asociados son de: USD\$166 millones de tendido aéreo, USD\$161 millones de tendido submarino, y una estimación de USD\$6 millones en rutas actualmente no documentadas. En suma, la propuesta alternativa 1 tiene un costo de USD\$333 millones.

Cuadro 6.3: Tendidos de fibra a construir para propuesta alternativa 1

Origen	Destino	Costo (MM \$USD)	Tipo de tendido
Juan Fernández	Isla de Pascua	105,55	Submarina

Puerto Williams	Villa Las Estrellas	33,79	Submarina
Constitución	Juan Fernández	21,67	Submarina
Puerto Natales	Caleta Tortel	25,59	Aéreo
Iquique	Codpa	6,9	Aéreo
Calama	Ollagüe	4,29	Aéreo
Taltal	Chañaral	4,07	Aéreo
Iquique	Tocopilla	3,99	Aéreo
Paihuano	Punto limítrofe 4	3,7	Aéreo
Caleta Tortel	Villa O'Higgins	3,69	Aéreo
Quellón	Melinka	3,18	Aéreo
Caleta Tortel	Cochrane	3,16	Aéreo
Caldera	Tierra Amarilla	3,12	Aéreo
Cunco	Curarrehue	3	Aéreo
Cochrane	Chile Chico	2,94	Aéreo
Chaitén	Quellón	2,93	Aéreo
Camiña	Colchane	2,92	Aéreo
Calama	San Pedro de Atacama	2,46	Aéreo
Sierra Gorda	María Elena	2,12	Aéreo
Romerol	Punto limítrofe 9	2,11	Aéreo
Visviri	Putre	2,02	Aéreo
Puelo	Puerto Varas	2,01	Aéreo
Caldera	Chañaral	1,99	Aéreo
Arica	Codpa	1,95	Aéreo
Vilcún	Curacautín	1,94	Aéreo
Villa Punta Delgada	Cerro Sombrero	1,87	Aéreo
Tirua	Carahue	1,66	Aéreo
Calbuco	Ancud	1,63	Aéreo
Salamanca	Petorca	1,58	Aéreo
Las Cabras	Alhué	1,52	Aéreo
Puelo	Hornopirén	1,33	Aéreo
Copiapó	Caldera	1,31	Aéreo
Combarbalá	Monte Patria	1,31	Aéreo
Chile Chico	Puerto Ingeniero Ibañez	1,27	Aéreo
Los Lagos	Panguipulli	1,24	Aéreo
Pozo Almonte	Pica	1,23	Aéreo
Arica	Putre	1,2	Aéreo
Camiña	Huara	1,19	Aéreo
Tocopilla	María Elena	1,18	Aéreo
Villa O'Higgins	Punto limítrofe 6	1,17	Aéreo
Hualqui	Yumbel	1,15	Aéreo
Nueva Toltén	Mariquina	1,11	Aéreo

Curacautín	Lonquimay	1,1	Aéreo
Malloa	San Fernando	1,1	Aéreo
San Rosendo	Hualqui	1,09	Aéreo
Futrono	Lago Ranco	1,08	Aéreo
Los Muermos	Fresia	1,05	Aéreo
Teodoro Schmidt	Saavedra	1,03	Aéreo
Lebu	Arauco	0,96	Aéreo
Andacollo	Samo Alto	0,95	Aéreo
Victoria	Curacautín	0,93	Aéreo
Illapel	Los Vilos	0,89	Aéreo
San Carlos	San Fabian	0,89	Aéreo
Santa Juana	Nacimiento	0,88	Aéreo
Pelluhue	Cobquecura	0,87	Aéreo
Valdivia	Futrono	0,86	Aéreo
Litueche	Navidad	0,85	Aéreo
Gorbea	Loncoche	0,85	Aéreo
Fresia	Frutillar Bajo	0,85	Aéreo
Paredones	Vichuquén	0,81	Aéreo
Mostazal	Paine	0,78	Aéreo
Lago Ranco	Rio Bueno	0,77	Aéreo
Cunco	Freire	0,76	Aéreo
Villa Punta Delgada	Punto limítrofe 7	0,74	Aéreo
Colina	Lampa	0,74	Aéreo
Vallenar	Alto del Carmen	0,73	Aéreo
Villa Tehuelches	Rio Verde	0,72	Aéreo
Pozo Almonte	María Elena	0,72	Aéreo
Cerro Sombrero	Pampa Guanaco	0,69	Aéreo
Buín	Calera de Tango	0,68	Aéreo
Paredones	Pumanque	0,64	Aéreo
Quillón	Nipas	0,61	Aéreo
Nueva Imperial	Teodoro Schmidt	0,61	Aéreo
Chañaral	Diego de Almagro	0,6	Aéreo
Cañete	Contulmo	0,6	Aéreo
Alto Hospicio	Pozo Almonte	0,59	Aéreo
Purén	Los Sauces	0,59	Aéreo
Cobquecura	Quirihue	0,58	Aéreo
Villarrica	Panguipulli	0,58	Aéreo
Coyhaique	Punto limítrofe 8	0,57	Aéreo
Quilleco	Santa Barbara	0,56	Aéreo
Los Muermos	Maullín	0,54	Aéreo
San Antonio	El Tabo	0,53	Aéreo

María Pinto	Padre Hurtado	0,53	Aéreo
Quilaco	Ralco	0,51	Aéreo
Coihueco	San Fabian	0,51	Aéreo
Puchuncavi	Quintero	0,5	Aéreo
Colbun	Yerbas Buenas	0,5	Aéreo
Conchalí	Colina	0,5	Aéreo
Quillota	Limache	0,49	Aéreo
Lumaco	Purén	0,47	Aéreo
Copiapó	Vallenar	0,47	Aéreo
Pichilemu	Marchihue	0,46	Aéreo
Carahue	Saavedra	0,46	Aéreo
Traiguén	Los Sauces	0,46	Aéreo
Puqueldon	Quellón	0,45	Aéreo
Puerto Octay	Purranque	0,45	Aéreo
Concón	Quintero	0,43	Aéreo
Panquehue	Catemu	0,43	Aéreo
Ovalle	Monte Patria	0,41	Aéreo
Casablanca	Algarrobo	0,41	Aéreo
Concón	Viña del Mar	0,4	Aéreo
Traiguén	Galvarino	0,4	Aéreo
Valdivia	Mafil	0,4	Aéreo
Frutillar Bajo	Puerto Octay	0,39	Aéreo
Rancagua	Requínoa	0,39	Aéreo
Curepto	Licantén	0,38	Aéreo
Galvarino	Cholchol	0,38	Aéreo
Pelarco	San Rafael	0,38	Aéreo
Cunco	Melipeuco	0,36	Aéreo
Romerol	Curicó	0,35	Aéreo
Purén	Contulmo	0,34	Aéreo
Palmilla	Peralillo	0,33	Aéreo
Constitución	Empedrado	0,32	Aéreo
Zapallar	Puchuncavi	0,32	Aéreo
Portezuelo	Nipas	0,31	Aéreo
Osorno	Puaucho	0,31	Aéreo
Negrete	Renaico	0,31	Aéreo
Los Ángeles	Antuco	0,3	Aéreo
Isla de Maipo	Talagante	0,3	Aéreo
Coquimbo	Ovalle	0,29	Aéreo
Viña del Mar	Quilpué	0,28	Aéreo
Penco	Talcahuano	0,28	Aéreo
Licantén	Vichuquén	0,27	Aéreo

Cumpeo	Molina	0,26	Aéreo
San Clemente	Colbun	0,23	Aéreo
Castro	Ancud	0,23	Aéreo
Villa Alegre	Yerbas Buenas	0,23	Aéreo
Pelarco	Cumpeo	0,22	Aéreo
Curaco de Vélez	Dalcahue	0,2	Aéreo
Rengo	Requínoa	0,19	Aéreo
Lota	Arauco	0,19	Aéreo
Vallenar	Freirina	0,18	Aéreo
Futaleufú	Punto limítrofe 10	0,18	Aéreo
Palena	Punto limítrofe 11	0,18	Aéreo
María Elena	Antofagasta	0,18	Aéreo
Iquique	Alto Hospicio	0,17	Aéreo
Calera	Nogales	0,17	Aéreo
San Pedro de la Paz	Hualpén	0,17	Aéreo
Curaco de Vélez	Achao	0,16	Aéreo
Pirque	San José de Maipo	0,16	Aéreo
Olivar Alto	Coinco	0,16	Aéreo
Curanilahue	Los Álamos	0,15	Aéreo
Chimbarongo	Teno	0,13	Aéreo
San Pedro de la Paz	Santa Juana	0,13	Aéreo
Pozo Almonte	Huara	0,12	Aéreo
Antofagasta	Taltal	0,11	Aéreo
Nogales	Llailay	0,11	Aéreo
Valdivia	Corral	0,1	Aéreo
Los Andes	Calle Larga	0,09	Aéreo
Lago Verde	Punto limítrofe 5	0,09	Aéreo
Santo Domingo	Litueche	0,09	Aéreo
Mostazal	Codegua	0,09	Aéreo
Palmilla	Santa Cruz	0,08	Aéreo
Curicó	Rauco	0,08	Aéreo
Vallenar	La Higuera	0,06	Aéreo
Melipilla	San Pedro	0,05	Aéreo
Ninhue	San Nicolas	0,03	Aéreo
Osorno	San Pablo	0,03	Aéreo
Vicuña	Samo Alto	0,01	Aéreo
Futaleufú	Chaitén	2,64	Sin camino documentado
Lago Verde	Palena	2,45	Sin camino documentado
Graneros	Machalí	0,52	Sin camino documentado
Chonchi	Puqueldon	0,29	Sin camino documentado

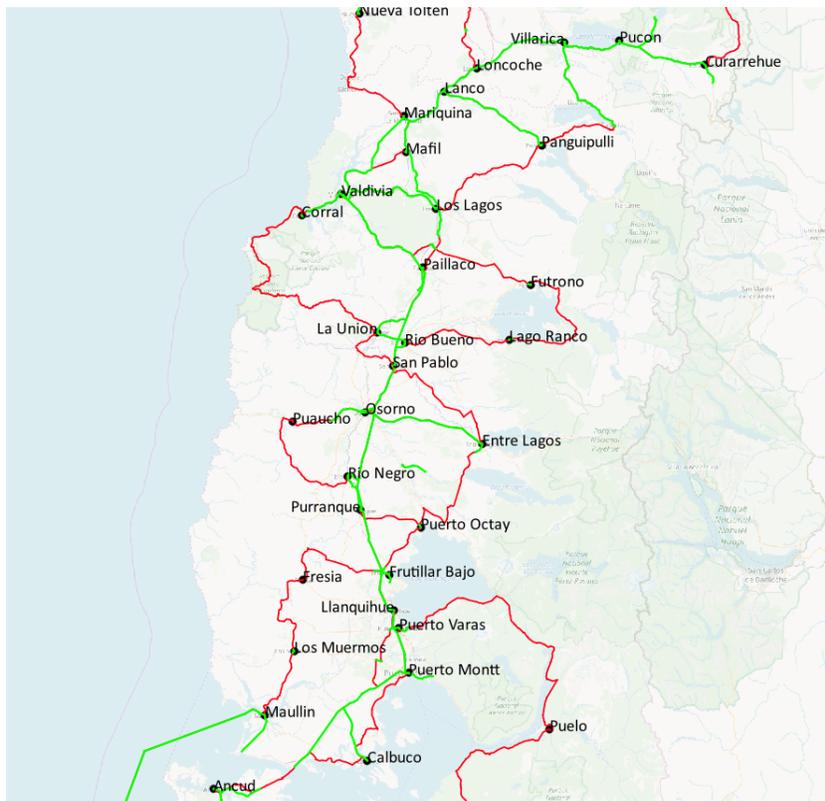


Figura 6.10: Segmento del mapa propuesto

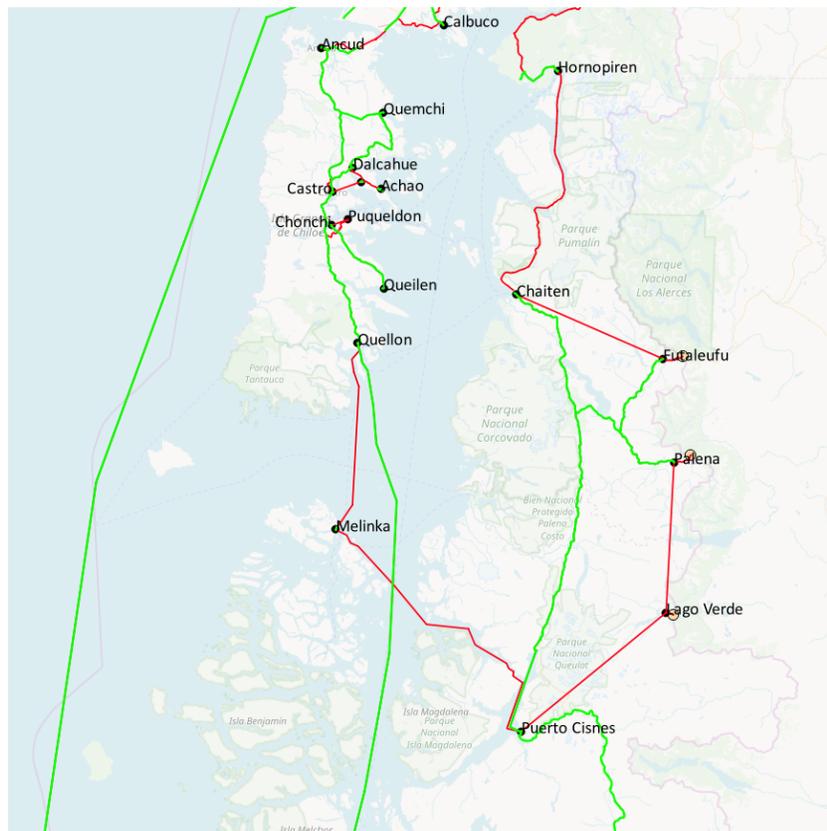


Figura 6.11: Segmento del mapa propuesto

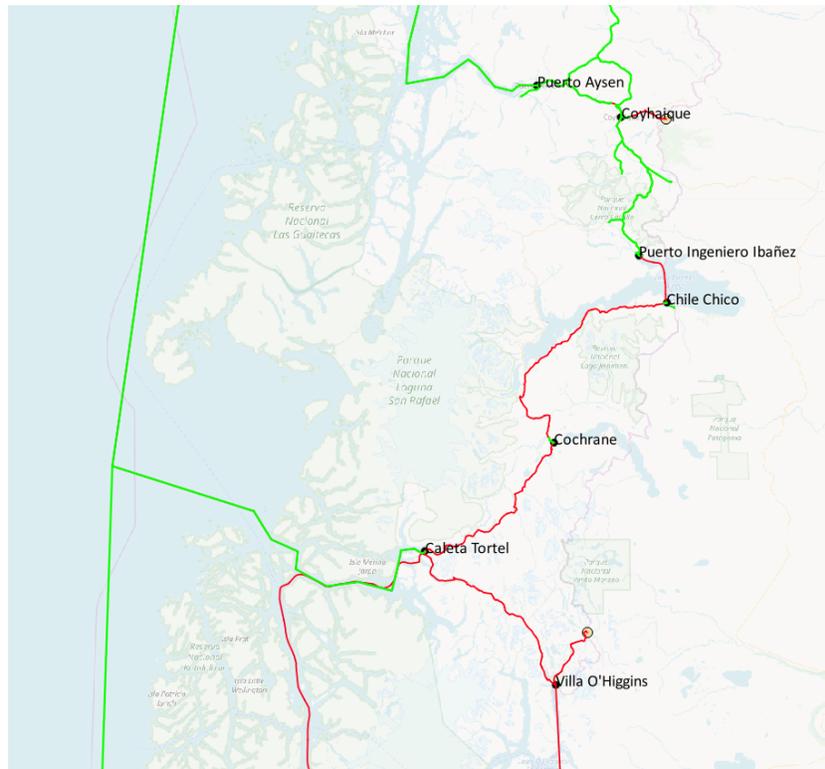


Figura 6.12: Segmento del mapa propuesto

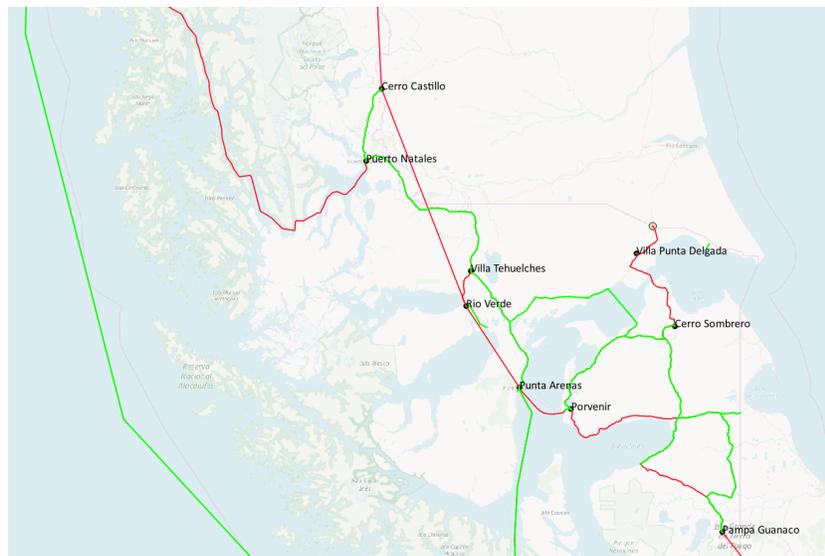


Figura 6.13: Segmento del mapa propuesto

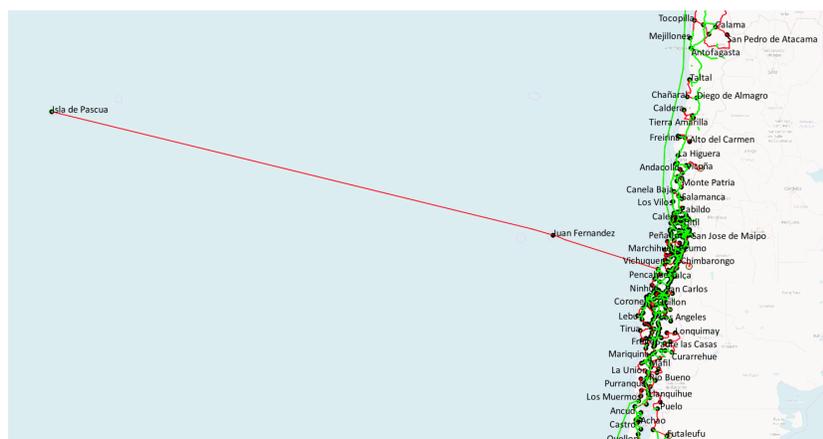


Figura 6.14: Segmento del mapa propuesto

### 6.4.2. Propuesta alternativa 2

La segunda propuesta, presentada a modo de comparación con las dos anteriores, es entregar un 100 % de cobertura en fibra óptica al país por rutas disjuntas, sin asegurar mayor robustez de la red. Esto implica que el corte de ciertos enlaces podrían dejar a una gran población del país desconectada de internet.

Esta propuesta consiste en la construcción total o parcial de 122 tendidos entre comunas, de las cuales 3 son submarinas. Adicionalmente se requiere la construcción de 2 conexiones entre comunas por rutas que no están documentadas equivalentes a 144 kilómetros de tendido (considerando conexiones directas).

Los montos asociados son de: USD\$123 millones de tendido aéreo, USD\$161 millones de tendido submarino, y una estimación de USD\$5 millones en rutas actualmente no documentadas. En suma, la propuesta alternativa 1 tiene un costo de USD\$289 millones.

Cuadro 6.4: Tendidos de fibra a construir para propuesta alternativa 2

Origen	Destino	Costo (MM \$USD)	Tipo de tendido
Juan Fernández	Isla de Pascua	105,55	Submarina
Puerto Williams	Villa Las Estrellas	33,79	Submarina
Constitución	Juan Fernández	21,67	Submarina
Puerto Natales	Caleta Tortel	25,59	Aéreo
Porvenir	Pampa Guanaco	4,65	Aéreo
Calama	Ollagüe	4,29	Aéreo
Taltal	Chañaral	4,07	Aéreo
Villa O'Higgins	Caleta Tortel	3,69	Aéreo
Quellón	Melinka	3,18	Aéreo
Caleta Tortel	Cochrane	3,16	Aéreo
Cochrane	Chile Chico	2,94	Aéreo
Chaitén	Quellón	2,93	Aéreo
Camíña	Colchane	2,92	Aéreo

Calama	San Pedro de Atacama	2,46	Aéreo
Sierra Gorda	María Elena	2,12	Aéreo
Visviri	Putre	2,02	Aéreo
Puelo	Puerto Varas	2,01	Aéreo
Caldera	Chañaral	1,99	Aéreo
Arica	Codpa	1,95	Aéreo
Villa Punta Delgada	Cerro Sombrero	1,87	Aéreo
Ancud	Calbuco	1,63	Aéreo
Las Cabras	Alhué	1,52	Aéreo
Puelo	Hornopirén	1,33	Aéreo
Chile Chico	Puerto Ingeniero Ibañez	1,27	Aéreo
Pozo Almonte	Pica	1,23	Aéreo
Arica	Putre	1,2	Aéreo
Camiña	Huara	1,19	Aéreo
Tocopilla	María Elena	1,18	Aéreo
Tirúa	Lumaco	1,16	Aéreo
Mariquina	Nueva Tolstén	1,11	Aéreo
Curacautín	Lonquimay	1,1	Aéreo
Futrono	Lago Ranco	1,08	Aéreo
Fresia	Los Muermos	1,05	Aéreo
Teodoro Schmidt	Saavedra	1,03	Aéreo
Victoria	Curacautín	0,93	Aéreo
Los Vilos	Illapel	0,89	Aéreo
Santa Juana	Nacimiento	0,88	Aéreo
Frutillar Bajo	Fresia	0,85	Aéreo
Litueche	Navidad	0,85	Aéreo
Gorbea	Loncoche	0,85	Aéreo
Paredones	Vichuquén	0,81	Aéreo
Lago Ranco	Rio Bueno	0,77	Aéreo
Cunco	Freire	0,76	Aéreo
Vallenar	Alto del Carmen	0,73	Aéreo
Villa Tehuelches	Rio Verde	0,72	Aéreo
Pozo Almonte	María Elena	0,72	Aéreo
Buín	Calera de Tango	0,68	Aéreo
Paredones	Pumanque	0,64	Aéreo
Nueva Imperial	Teodoro Schmidt	0,61	Aéreo
Chañaral	Diego de Almagro	0,6	Aéreo
Purén	Los Sauces	0,59	Aéreo
Pozo Almonte	Alto Hospicio	0,59	Aéreo
Cobquecura	Quirihue	0,58	Aéreo
Quilleco	Santa Barbara	0,56	Aéreo

Los Muermos	Mauillin	0,54	Aéreo
Coihueco	San Fabian	0,51	Aéreo
Quilaco	Ralco	0,51	Aéreo
Conchalí	Colina	0,5	Aéreo
Lumaco	Purén	0,47	Aéreo
La Serena	Andacollo	0,47	Aéreo
Copiapó	Vallenar	0,47	Aéreo
Pichilemu	Marchihue	0,46	Aéreo
Traiguén	Los Sauces	0,46	Aéreo
Carahue	Saavedra	0,46	Aéreo
Puerto Octay	Purranque	0,45	Aéreo
Puqueldon	Quellón	0,45	Aéreo
Ninhue	Portezuelo	0,45	Aéreo
Concón	Quintero	0,43	Aéreo
Panquehue	Catemu	0,43	Aéreo
Ovalle	Monte Patria	0,41	Aéreo
Casablanca	Algarrobo	0,41	Aéreo
Galvarino	Traiguén	0,4	Aéreo
Valdivia	Mafil	0,4	Aéreo
Concón	Viña del Mar	0,4	Aéreo
Rancagua	Requínoa	0,39	Aéreo
Frutillar Bajo	Puerto Octay	0,39	Aéreo
El Carmen	San Ignacio	0,38	Aéreo
Galvarino	Cholchol	0,38	Aéreo
Curepto	Licantén	0,38	Aéreo
Pelarco	San Rafael	0,38	Aéreo
Cunco	Melipeuco	0,36	Aéreo
Contulmo	Purén	0,34	Aéreo
Palmilla	Peralillo	0,33	Aéreo
Constitución	Empedrado	0,32	Aéreo
Puchuncaví	Zapallar	0,32	Aéreo
Osorno	Puaucho	0,31	Aéreo
Negrete	Renaico	0,31	Aéreo
Portezuelo	Nipas	0,31	Aéreo
Los Ángeles	Antuco	0,3	Aéreo
Penco	Talcahuano	0,28	Aéreo
Licantén	Vichuquén	0,27	Aéreo
Molina	Cumpeo	0,26	Aéreo
Villa Alegre	Yerbas Buenas	0,23	Aéreo
San Clemente	Colbún	0,23	Aéreo
Castro	Ancud	0,23	Aéreo

Pelarco	Cumpeo	0,22	Aéreo
Valparaíso	Viña del Mar	0,2	Aéreo
Curaco de Vélez	Dalcahue	0,2	Aéreo
Arauco	Lota	0,19	Aéreo
María Elena	Antofagasta	0,18	Aéreo
Freirina	Vallenar	0,18	Aéreo
Iquique	Alto Hospicio	0,17	Aéreo
Calera	Nogales	0,17	Aéreo
Curaco de Vélez	Achao	0,16	Aéreo
Olivar Alto	Coinco	0,16	Aéreo
Curanilahue	Los Álamos	0,15	Aéreo
San Pedro de la Paz	Santa Juana	0,13	Aéreo
Chimbarongo	Teno	0,13	Aéreo
Pozo Almonte	Huara	0,12	Aéreo
Puchuncaví	Concón	0,12	Aéreo
Antofagasta	Taltal	0,11	Aéreo
Nogales	Llailay	0,11	Aéreo
Valdivia	Corral	0,1	Aéreo
Santo Domingo	Litueche	0,09	Aéreo
Los Andes	Calle Larga	0,09	Aéreo
Palmilla	Santa Cruz	0,08	Aéreo
Rauco	Curicó	0,08	Aéreo
Vallenar	La Higuera	0,06	Aéreo
Melipilla	San Pedro	0,05	Aéreo
Ninhue	San Nicolas	0,03	Aéreo
San Pablo	Osorno	0,03	Aéreo
Vicuña	Samo Alto	0,01	Aéreo
Futaleufú	Chaitén	2,64	Sin camino documentado
Palena	Lago Verde	2,45	Sin camino documentado

## 6.5. Evaluación de la solución

La solución propuesta cumple con ser más resiliente que la actual, ya que considera doble enlace prácticamente todas las comunas (enlaces simples solo en 4 comunas). Considera también conexión a 8 puntos limítrofes con Argentina que dan conectividad a las comunas más cercanas a la cordillera.

En relación a los indicadores definidos, y utilizados en la evaluación de la red actual (ver sección 5.2), tenemos una importante mejora. Nuestra propuesta considera una cobertura de un 100 % de las comunas del país. El índice de tolerancia a fallas de nuestra solución, que representa al mínimo número de cortes necesarios para desconectar la red, es igual a 1. En nuestra solución esto solo se produce en las 8 enlaces que conectan localidades que no cuentan con más accesos y, en el peor de los casos, se desconecta sólo

un 0,58 % que corresponde a menos de un 0,05 % de la población del país.

La métrica Max Edge Betweenness (45,8 %) se alcanza para el enlace (Constitución–Licantén). Esto significa que un 45,8 % de los caminos, ya sean más cortos o alternativos, se verán afectados por la eliminación de ese enlace. La métrica Node Wiener Impact (llamada también Closeness Vitality) no puede calcularse en un grafo que no tolera eliminación de nodos. En nuestro caso, diseñamos una red robusta tolerante a fallas en los enlaces, pero no a la eliminación de nodos. El cálculo de esta métrica es deseable en futuras evaluaciones.

La tabla 6.5 muestra el resultado de los indicadores en nuestra propuesta principal y las dos alternativas presentadas. Se puede apreciar que todas las soluciones dan cobertura a un 100 % de las comunas del país, y solo se diferencian en la robustez de la red. Las comunas y población conectadas de forma robusta son las que asegura el modelo, pudiendo este número ser más alto en la práctica. Se puede apreciar que centralidad máxima del grafo aumenta en la alternativa menos robusta. El índice Node Wiener Impact no es posible medirlo tampoco en las alternativas presentadas.

Cuadro 6.5: Métricas calculadas para la red de fibra óptica propuesta.

Métrica	Propuesta	Alternativa 1	Alternativa 2
Porcentaje de cobertura (comunas)	100 %	100 %	100 %
Tolerancia a fallas	1	1	1
Población conectada de forma robusta	≈ 100 %	90 %	no se asegura
Comunas conectadas de forma robusta	97,7 %	47,69 %	no se asegura
Enlaces débiles	4 (0,95 %)	50 (12,8 %)	253 (73,3 %)
Max Edge Betweenness Centrality	28.623 (45,8 %)	27.821 (44,5 %)	29.920 (50,1 %)
Node Wiener Impact	-	-	-

La principal diferencia entre las soluciones es la cantidad de enlaces débiles, es decir, cuyo corte desconecta completamente a una o más comunas. Nuestra propuesta tiene solo 4 excepciones, mientras que las alternativas tienen 50 y 253 respectivamente, esta es la principal vulnerabilidad que implica no construir una red como la propuesta en el presente trabajo.

# Capítulo 7

## Estructura y contenidos informe anual

La etapa número 2 del proyecto, que responde al objetivo específico 5, corresponde a la definición de los contenidos mínimos que debe tener un informe anual de resiliencia de la Internet chilena y su primera publicación. La primera versión de este informe es la información contenida en las secciones 4 y 6. En este capítulo proponemos una estructura y contenidos mínimos que debe tener este documento a futuro.

Nuestra propuesta de informe anual considera la siguiente estructura y contenidos mínimos:

### 1. Introducción

Se espera que el documento presente una introducción que, al menos, haga referencia a:

- Los resultados del informe presentado el año anterior y las inversiones en infraestructura que se han realizado desde su publicación, relacionando éstas con las propuestas técnicas entregadas.
- Publicaciones y actividades de difusión realizadas durante el periodo.
- Todo incidentes que haya ocurrido durante el año y que afectara la conectividad del país, ya sean problemas técnicos de los proveedores por ataques cibernéticos, la ocurrencia de catástrofes naturales o cualquier otro evento relevante.
- Modificaciones incorporadas en la nueva edición, modificaciones al bien público, nueva información incorporada en la base de datos, actualización a las métricas usadas para evaluar la resiliencia, entre otros.

### 2. Marco teórico

El documento debe presentar una breve sección de marco teórico que explique el contexto técnico general, qué se entiende por resiliencia de Internet en el marco del estudio y cómo ésta será medida. En caso de existir diferencias en las métricas o metodología con la edición anterior del informe anual, ésta sección deberá entregar el respaldo teórico y la justificación técnica de estas diferencias.

### 3. Bien público

El resultado del bien público corresponde a una base de datos que contenga la información validada con todos los tendidos de fibra óptica de forma geo-referenciada. La base de datos que se entregará

en la primera edición del informe contiene solo información levantada en terreno, se espera que las versiones siguientes incorporen información entregada por los Internet Service Providers (ISP) y las autoridades competentes.

#### 4. Evaluación de la Internet chilena

El informe debe presentar la medición de la resiliencia de la infraestructura que se entrega en el bien público. Los resultados de la evaluación deben ser comparables a los obtenidos en los informes anteriores. Otras métricas podrán ser incorporadas en la evaluación, y su respaldo teórico deberá incorporarse en la sección correspondiente.

Las métricas mínimas a utilizar corresponden a:

- Cobertura

La propuesta que presentamos en el presente informe es la construcción de una serie de tendidos que permitan contar con una red 2-conexa. Sin embargo, en la actualidad, la infraestructura de nuestro país no es ni siquiera 1-conexa, es decir, existen comunas que no están conectadas con fibra óptica. Esta métrica busca identificar qué porcentaje de comunas están conectadas a Internet por fibra óptica, con al menos un enlace.

- Cobertura 2-conexa

Al igual que el indicador anterior, busca conocer el porcentaje de comunas que están conectadas a Internet, pero en este caso, con al menos 2 enlaces independientes. Este indicador considera que dos tendidos que van por un mismo camino corresponden a solo un enlace.

- Impacto nodal de Weiner

#### 5. Propuesta de mejora

Se espera que el documento proponga los tendidos que deben construirse para mejorar la resiliencia de la red de forma que sea robusta frente a fallas, ataques y catástrofes naturales. Estos deberán presentarse desagregados por regiones.

#### 6. Conclusiones

Por último, el documento debe presentar conclusiones sobre los avances a la fecha, la nueva versión del bien público y las propuestas realizadas.

# Capítulo 8

## Conclusiones

Al comenzar este proyecto, formulamos la hipótesis que la medición de la resiliencia de la Internet chilena no iba a resultar satisfactoria, ya que teníamos la evidencia de reiteradas caídas masivas de segmentos de la red cada vez que había cortes de fibra. Al ir avanzando, nos hemos ido dando cuenta que la realidad es mucho más desalentadora de lo esperado: los mapas comprometidos nunca fueron entregados (sospechando que, en realidad, no tienen ninguna información confiable), la realidad en terreno manifiesta a ratos situaciones anómalas en los tendidos y, finalmente, hay muchas zonas donde la fibra no llega y toda la conectividad se basa en enlaces inalámbricos de baja capacidad.

Queda entonces un gran trabajo por hacer para lograr dar, primero, buena cobertura de fibra a todas las comunas del territorio nacional y, segundo, lograr que todas las conexiones tengan, al menos, una alternativa de fibra que pase a algunos kilómetros de otro enlace. Confiamos en que este bien público contribuya en esta dirección, recalculando todos los años las métricas y el mapa de la fibra existente, y monitoreando la salud de la infraestructura física de Internet en Chile.

Un tema que queda pendiente es el análisis de la red lógica (IP) ya que todos los resultados que hemos obtenido se basan en el supuesto de que los cables efectivamente distribuyen el servicio y que existe un ruteo dinámico capaz de encontrar estas rutas alternativas. En esta línea, existen frameworks de redes interconectadas entre redes lógica y física, que fueron abordados en una tesis de magíster ([3]) de este proyecto y que serían perfectos para usarlos en el futuro.

Todos nuestros análisis de redundancia se basan en que las fibras actuales “hablan entre sí”, y que están configuradas para trabajar en conjunto usando ruteo inteligente, es decir, se analiza como país, no de forma individual como empresa. Para garantizar que esto se cumpla, es necesario actualizar la norma técnica de tráfico y ruteo de Internet en Chile. En la actualidad la norma técnica es arcaica y no precisa. Se necesita redactar una nueva que garantice la resiliencia y facilite nodos donde sea necesario.

### Cobertura de fibra

A lo largo de nuestro recorrido del país, hemos validado algún tendido de fibra óptica conectando el 76% de las comunas de Chile, lo que no implica que todas ellas tengan conexión óptica a Internet, ya

que hemos visto que los tendidos de fibra óptica pueden ser usados también para conectar con enlaces microondas. También es importante tratar el tema de los nodos en donde la fibra esta abierta, ya que si el cable solamente transita por una localidad no podrá otorgar servicio alguno en ese punto. En cualquier escenario de despliegue de servicios avanzados de Internet (5G, Internet of Things, Smart Cities, etc.) necesitamos que la fibra llegue al 100 % de las comunas. Aunque la última milla pueda ser inalámbrica (por ejemplo usando 5G), desde esas antenas hacia la troncal nacional la conexión debe ser con fibra o nunca lograremos las prestaciones esperadas. La cobertura del territorio nacional es una necesidad, ya que no sólo las personas necesitan conexión, toda la actividad agrícola, minera y empresarial de cualquier tipo necesitará cada vez más conexiones de buen ancho de banda.

## Resiliencia e infraestructura física

Una vez lograda la conexión con fibra óptica a una comuna, viene el objetivo de lograr una conexión de respaldo que pase por otros caminos, lo más distantes posible de la conexión primaria. Una erupción volcánica, un incendio o un aluvión pueden cubrir grandes superficies y cortar todas las fibras cercanas. Recomendamos aprovechar los caminos laterales existentes en la mayoría del país para colocar esas fibras, de modo de aprovechar de dar cobertura a poblados rurales que usualmente no son rentables de conectar a la red. Un cableado submarino también serviría para la redundancia, pero tiene un costo económico mucho mayor y no cumple con el objetivo de conectar los poblados que quedan en el camino.

Un objetivo país de mediano plazo sería lograr que el 100 % de las comunas sean 2-conexas y tengan dos fibras ópticas distantes que pasen por ellas.

## Métricas definidas

Si bien se hizo un extenso trabajo de revisión sistemática e investigación en relación al modelamiento de redes y las métricas pertinentes para aplicar a la realidad chilena, la información disponible solo permitió aplicar métricas de redes simples y no la utilización de modelos de redes interconectadas (red física - red lógica). Pero incluso dentro de las métricas de redes disponibles aplicadas a las telecomunicaciones, tuvimos que elegir las más básicas por la gran cantidad de puntos de falla existentes en la infraestructura del país.

El cálculo de las métricas sobre la información levantada nos mostró que la red es muy poco resiliente. Se observó que un 89 % de las comunas reciben fibra óptica, pero solo pudo validarse que un 76 % estaban conectadas entre sí. Estas cifras consideran una gran cantidad de enlaces no-disjuntos, es decir, que su corte impactaría a dos o más comunas. Si evaluamos la robustez de la red debemos considerar solo caminos disjuntos, en ese caso el “tamaño de la componente más grande” del grafo es de solo 59 comunas, un 17,1 % del total. El porcentaje de comunas conectadas tampoco resiste fallas, con una gran cantidad de enlaces cuyo corte desconecta parte importante del país. Las métricas de centralidad, como el “máximo *betweenness*” entregan un valor que no tiene mayor sentido en una red no conexas, y la métrica de “Impacto nodal de Weiner”, o impacto en la red de eliminar un nodo, sólo puede ser calculada para grafos robustos frente a eliminación de nodos, que no es la situación actual de nuestra red. Una métrica que debe ser aplicada a futuro es el tamaño de la componente más grande con enlaces redundantes, o

robusta (2-conexa).

## Propuestas de mejoras factibles

En este proyecto, revisamos los tendidos troncales o de back-haul que haría falta para mejorar la conectividad y la redundancia del servicio de acceso a la Internet chilena, y evaluamos económicamente su implementación de un modo aproximado. Nuestra propuesta es que, con una inversión del orden de USD 260 millones, Chile continental puede quedar con un nivel de cobertura óptico del 100 % de las comunas, y con una mejor resiliencia para su desarrollo actual.

Debemos resaltar sí que con ese nivel de inversión estamos hablando de llegar con fibra óptica a las cabeceras de aquellas comunas que hoy carecen de esa tecnología, y de mejorar el anillado de las redes. No se incluyen en esta cifra las redes de última milla (de fibra óptica, cobre o inalámbricas) que se requieren para llegar a otras localidades de esas comunas o para la distribución de las señales hasta las casas de los usuarios.

En términos técnicos, la evaluación de nuestra propuesta en base a las métricas definidas, muestra una mejora importante en la resiliencia de la red, con una cobertura de un 100 % de las cabeceras comunales. Del total de comunas, 338 (97,7 %) contarían con una red robusta y tolerante a fallas. Las 8 comunas restantes no cuentan con accesos suficientes como para contar con los enlaces necesarios. El hecho de que no todas las comunas puedan tener un enlace doble, implica que el corte de algunos tramos es capaz de desconectar parte de la red. Sin embargo, el corte de cualquiera de ellos mantiene operativa la red para más de un 99,4 % de las comunas, que corresponde a más del 99,9 % de la población del país.

Por otra parte, el recorrido en terreno nos mostró que también es necesario mejorar la fiscalización de la infraestructura, ya que, como veremos más adelante, pudimos documentar una serie de irregularidades que afectan la resistencia a fallas y aumentan la posibilidad de ataques de la red (ver Anexo 9.5).

## Trabajos futuros

Hemos visto que la regulación y el modelo actual de desarrollo de la Internet chilena nos ha servido bien por muchos años, pero, sin dudas, presenta falencias, especialmente en zonas rurales y en pueblos alejados de los grandes centros urbanos, donde tienden a ser insuficientes la calidad y la cobertura de los servicios correspondientes. Además, el servicio de acceso a Internet debería ser considerado como una infraestructura crítica, y, como tal, requiere de calidad, resistencia a fallas y cobertura que no logrará tener si el Estado no define estándares de calidad mínima, ni ofrece subsidios para aquellas zonas donde el mercado no es capaz de dar una adecuada respuesta. A modo de ejemplo, la inversión en líneas de fibra redundantes, alejadas del resto de los tendidos, entrega pocas ventajas competitivas o incentivos a la empresa que haga esa inversión, a no ser que el proveedor tenga que cumplir con estándares de calidad mínima de resiliencia.

Otro aspecto a considerar es la necesidad de rediseñar la Ley General de Telecomunicaciones de Chile, ya que el texto actual fue creado en una época sin telefonía móvil ni Internet, de modo que es preciso pensar en cómo generar incentivos de mercado para garantizar la calidad, cobertura y resiliencia que necesitamos.

Este proyecto muestra lo fundamental que resulta para Chile avanzar en su infraestructura física, tanto en calidad y cobertura como en resiliencia. Queda mucho por hacer a futuro y proponemos las siguientes acciones a corto plazo:

1. Definir trazados necesarios para que la fibra óptica llegue, al menos, a todas las cabeceras de comunas que aún no cuentan con ella.
2. Definir y mantener un monitoreo y medición de la calidad del servicio de acceso a Internet en Chile.
3. Estudiar la red lógica (ruteo IP) sobre las distintas redes de fibra óptica, para analizarlas en su conjunto y garantizar la capacidad de usar rutas alternativas automáticamente, en caso de fallas o catástrofes.
4. Estudiar los Puntos de Intercambio de Tráfico (PITs) y los data centers del país para complementar los análisis.

A mediano plazo, hay que considerar a la fibra óptica como una infraestructura crítica, como lo son las autopistas inter-urbanas. Concesionar los trazados más caros es una alternativa que debiéramos estudiar seriamente, de modo de poder definir los trazados y las capacidades como país. Por otro lado, debemos hacer obligatorio para las compañías que dan servicio público de Internet, que informen de sus propios tendidos de fibra óptica a SUBTEL para contar con un mapa preciso y actualizado en todo momento.

En el ámbito académico, la investigación apunta a nuevos modelos de interrelación de redes que pueden servir para estudiar el impacto de Internet y sus servicios en la sociedad, por ejemplo, mecanismos de control para power-grids, instalación de nuevos data centers, migración, transporte, políticas de salud (estudios epidemiológicos), etc. Por lo pronto, desde el 2017 se ha priorizado en NIC Labs el área de redes complejas, publicando ya tres artículos del tema en revistas científicas de renombre.

A futuro se pretende continuar profundizando en el conocimiento sobre sistemas complejos, investigando nuevos modelos de redes interrelacionadas, orientada tanto a la resiliencia de Internet como a la interacción entre humanos y máquinas. Adicionalmente, el laboratorio está organizando dos conferencias internacionales de alto nivel: NetSci-X (<http://www.netsciX.net>) en enero de 2019 y Passive and Active Measurements (PAM) (<http://pam.niclabs.cl>) en marzo de 2019.

# **Capítulo 9**

## **Anexos**

## **9.1. Correspondencia SUBTEL**

**SUBTEL**

N° Ingreso: 99426  
 Fecha: 26/07/2017



9942620170726

OFICIO : NIC LABS N°15/2017

ANT. : Proyecto CORFO 15BPE-47225.

MAT. : Aportes SUBTEL en calidad mandante en proyecto CORFO 15BPE-47225.

FECHA : 26 de Julio de 2017

DE : DIRECTOR PROYECTO CORFO 15BPE-47225, UNIVERSIDAD DE CHILE  
 A : SUBSECRETARIO DE TELECOMUNICACIONES,  
 SEÑOR RODRIGO RAMIREZ PINO

- 1.- Junto con saludar, por la presente, en mi calidad de Director del Proyecto CORFO 15BPE-47225 denominado "Estudio y Recomendaciones sobre la resiliencia de la infraestructura de la Internet chilena", de la Universidad de Chile, manifiesto a usted nuestra profunda preocupación porque, a la fecha, no hemos recibido la información base comprometida por Subtel, esto es los mapas que la institución que usted encabeza disponga de la infraestructura de telecomunicaciones nacional.
- 2.- Transcurridos ya dieciocho meses de ejecución del proyecto, es de suma importancia que la Subsecretaría de Telecomunicaciones nos entregue, a la brevedad, la información comprometida, cuya petición reiteramos por escrito a finales de diciembre 2016, dado que CORFO nos exige cumplir los compromisos de avance que no hemos podido lograr debido a este retardo en la entrega de la información.

Manifiesto a usted nuestra total disposición para conversar sobre el particular y llegar a una pronta solución.

Sin otro particular, le saluda cordialmente,

JOSE MIGUEL PIQUER G.  
 Director Proyecto

Distribución:

- SUBTEL
- Universidad de Chile
- Archivo proyecto

Figura 9.1: Oficio NIC Labs N.15/2017 enviado a SUBTEL con fecha 26 de julio de 2017



OFICIO : NIC LABS N°18/2017

ANT. : OFICIO NIC LABS  
N°15/2017 DEL  
26.07.2017

MAT. : Aportes SUBTEL en  
calidad mandante en el  
proyecto.

FECHA : 20 de Diciembre de 2017

DE : DIRECTOR PROYECTO CORFO 15BPE-47225 DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE

A : SUBSECRETARIO DE TELECOMUNICACIONES,  
SEÑOR RODRIGO RAMIREZ PINO

- 1.- Junto con saludar, por la presente, en mi calidad de Director del Proyecto CORFO 15BPE-47225 denominado "Estudio y Recomendaciones sobre la resiliencia de la infraestructura de la Internet chilena", de la Universidad de Chile, vuelvo a manifestar a usted nuestra profunda preocupación porque a la fecha, nos ha sido imposible obtener la información base comprometida por SUBTEL. Esto consiste en los mapas que la institución que usted encabeza tiene de la infraestructura en telecomunicaciones.

Transcurridos veinticuatro meses de ejecución del proyecto, es de suma importancia que la Subsecretaría de Telecomunicaciones nos entregue a la brevedad la información que reiteramos por escrito a finales de Julio de 2017, dado que CORFO nos exige cumplir los compromisos de avance que no hemos podido realizar dado el retardo en la entrega de información.

Manifiesto a usted nuestra total disposición para conversar sobre el particular y llegar a una pronta solución.

Sin otro particular, le saluda cordialmente,

  
JOSE MIGUEL PIQUER G.  
Director Proyecto

Distribución:

- SUBTEL
- Universidad de Chile
- Archivo proyecto

Figura 9.2: Oficio NIC Labs N.18/2017 enviado a SUBTEL con fecha 20 de diciembre de 2017

 <p><b>fcfm</b> FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS UNIVERSIDAD DE CHILE</p>	<p><b>SUBTEL</b></p> <p>N° Ingreso: 12059 Fecha: 25/01/2018</p>  <p>1205920180125</p>	<p>OFICIO : NIC LABS N°05/2018</p> <p>ANT. : OFICIO NIC LABS N°18/2017 DEL 20.12.2017</p> <p>MAT. : Aportes SUBTEL en calidad mandante en el proyecto.</p> <p>FECHA : 24 de Enero de 2018</p>
<p>DE : DIRECTOR PROYECTO CORFO 15BPE-47225 DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE</p> <p>A : SUBSECRETARIO DE TELECOMUNICACIONES, SEÑOR RODRIGO RAMIREZ PINO</p>		
<p>1.- Junto con saludar, por la presente, en mi calidad de Director del Proyecto CORFO 15BPE-47225 denominado "Estudio y Recomendaciones sobre la resiliencia de la infraestructura de la Internet chilena", de la Universidad de Chile, reitero a usted nuestra profunda preocupación porque a la fecha, su Institución no ha dado respuesta a nuestras comunicaciones de fecha 26 de Julio 2017 y 20 Diciembre 2017, a través de la cual solicitábamos a usted la información base comprometida por Subtel en el proyecto CORFO, esto es los mapas con que la institución que usted encabeza tenga de la infraestructura en telecomunicaciones.</p> <p>El Proyecto CORFO está en su etapa final y requerimos de su parte un pronunciamiento oficial respecto a la información que hemos solicitado en múltiples ocasiones sin obtener respuesta ni solución alguna de parte de esa Subsecretaría.</p> <p>Cabe señalar que, la insistencia en contar con los datos señalados se debe exclusivamente a hacer cumplir el compromiso que la Subsecretaría de Telecomunicaciones asumió como mandante del Proyecto, el cual no se ha llevado a cabo hasta el día de hoy y razón por la cual la Universidad de Chile no puede cumplir ante CORFO con los compromisos de avance, por el retardo en la entrega de la información.</p> <p>Manifiesto a usted nuestra total disposición para conversar sobre el particular y llegar a una pronta solución.</p> <p>Sin otro particular, le saluda cordialmente,</p>		
 <p>JOSE MIGUEL PIQUER G. Director Proyecto</p>		
<p><u>Distribución:</u> - SUBTEL - Universidad de Chile</p>		

Figura 9.3: Oficio NIC Labs N.05/2018 enviado a SUBTEL con fecha 24 de enero de 2018



Subsecretaría de  
Telecomunicaciones

Telecomunicaciones  
con sentido ciudadano

**Tipo Docto.:** OFICIO  
**Nro. Docto.:** 3517  
**Nro. Folio:** 1578391

Entregado a Correos de Chile: 12/03/2018  
(Según Artículo 16 Bis Ley 18.168)

ORD N° 3517 / DO 41.272 / F28

ANT.: Oficio NIC LABS N° 15/2017, Ingreso SUBTEL  
N° 99.426, de fecha 26.07.2017.

MAT.: Informa al tenor de lo solicitado.

SANTIAGO, 09 MAR. 2018

**A: SEÑOR JOSE MIGUEL PIQUER G.  
DIRECTOR DE PROYECTO CORFO, UNIVERSIDAD DE CHILE**

**DE: SEÑOR RODRIGO RAMÍREZ PINO  
SUBSECRETARIO DE TELECOMUNICACIONES**

Mediante Oficio de ANT., se ha solicitado a esta Subsecretaría de Estado informar la capa georreferenciada de las redes de fibra óptica desplegadas —a la fecha— a nivel nacional y sus respectivos Metadatos.

Al respecto, es posible referir que la fibra óptica es calificada como “estratégica” para el desarrollo y seguridad nacional.

Luego, podemos disponibilizar con carácter de pública la siguiente información: Chile cuenta con grandes redes de transporte de fibra óptica desde Arica (en la frontera con Perú) hasta Puerto Montt. Estas redes están desplegadas principalmente en forma aérea y se conectan al backbone internacional de Internet mediante cables submarinos, hacia el norte por el Océano Pacífico y desde Santiago hacia Argentina. Asimismo, en las principales ciudades del país (Santiago, Valparaíso, Antofagasta, Temuco y Concepción) existen anillos de fibra urbana soterrada y aérea.

Sin otro particular, saluda atentamente a usted,

  
**RODRIGO RAMÍREZ PINO**  
Subsecretario de Telecomunicaciones

DISTRIBUCIÓN:

- Sr. Jose Piquer G, Director de Proyecto, Universidad de Chile, Beauchef N° 850, Santiago, Región Metropolitana.
- División Política Regulatoria y Estudios.
- División Fiscalización.
- Gabinete SUBTEL.
- Equipo Clasificador

Figura 9.4: Oficio respuesta de SUBTEL N.3517 con fecha 9 de marzo de 2018



COPIA

Santiago, 5 de Julio de 2018

Señora  
 Marichen Galdames Goldberg  
 Ejecutiva de Proyectos  
 Subdirección de Difusión Tecnológica y Entorno para la Innovación  
 CORFO  
Presente

OF PARTES CORFO STGO  
 05.07.18 13:16

De mi consideración:

Junto con saludar, me permito hacer referencia a la modificación del convenio subsidio entre Universidad de Chile y Comité INNOVA Chile, para la ejecución del Proyecto código 15BPE-47225, autorizada por Resolución (E) N°000099 de fecha 27 de Febrero de 2018.

Al respecto y, considerando que la extensión del Proyecto se originó por falta de información comprometida por el Estado, venimos en solicitar a usted la ampliación del plazo de 20 a 36 meses para cumplir con la totalidad de los siguientes indicadores:

- a) Cantidad de Provincias informadas
- b) Cantidad de Comunas informadas
- c) Cantidad de Regiones informadas

Los 36 meses se ajustan a la programación original de otro indicador del proyecto: "Aumento de financiamiento F.N.D.R. a Proyecto F.D.T.".

Sin otro particular, agradeciendo su atención, quedamos a su disposición para responder y/o proporcionar información adicional sobre esta solicitud.

  
 JOSE MIGUEL PIQUER G.  
 Director Proyecto CORFO 15BPE-47225

Distribución:  
 - CORFO  
 - Archivo proyecto

Figura 9.5: Carta de solicitud de ampliación de plazo para indicadores con fecha 6 de junio de 2018

**interes MDS proyecto de resiliencia internet**

1 message

**Andrea Alvarado** <aalvarado@desarrollosocial.gob.cl>  
To: "jpiquer@nic.cl" <jpiquer@nic.cl>  
Cc: Marcelo Valenzuela <mvalenzu@ing.uchile.cl>

Tue, Jul 10, 2018 at 7:40 PM

Estimado José Miguel,

Junto con saludar, te comento que nos ha parecido muy interesante el proyecto de la resiliencia de la infraestructura de la internet chilena que nos ha dado a conocer a grandes rasgos Marcelo Valenzuela. Aunque actualmente la creación de este tipo de infraestructura no pasa por la evaluación técnico económica del Sistema Nacional de Inversiones, es claro que es inversión que trae como resultado beneficios para la sociedad, y en especial es importante para nosotros en aquellos casos en que estas inversiones son financiadas mediante un aporte público con la finalidad de beneficiar a sectores apartados, de esa manera llevando la conectividad a los ciudadanos con menores oportunidades.

Planteado de esa manera, aún si estas iniciativas no pasan por el canal tradicional de la inversión pública, revisten toda su naturaleza, motivo por el cual estudiar estos casos nos entregará importantes aprendizajes tanto respecto de los elementos propios de la infraestructura de internet, como de la cobertura de áreas postergadas o apartadas que en condiciones de mercado no tendrían acceso. Más aún, es de gran interés el conocer la resiliencia de la infraestructura de internet puesto que ésta es vital en situaciones de desastres naturales, aspecto que también está siendo estudiado y progresivamente incorporado en el análisis de las iniciativas de inversión pública.

Es por ello que quisiera pedirte que nos consideres en la presentación que se realizará en agosto, así como para tener acceso a los resultados y análisis derivados de este trabajo, ya que de seguro contribuirán a un desarrollo metodológico para nosotros, y facilitará poner este relevante tema en el centro de la discusión junto a otras Instituciones relevantes e interesadas.

De la misma manera, nos ponemos a disposición para colaborar en aquello en lo que podamos aportar para un mayor desarrollo e incorporación de este tema en la discusión de política pública.

Para concretar esta línea de trabajo, creemos que sería recomendable la formalicemos mediante un convenio de colaboración entre el Ministerio y la Universidad, de modo que podamos garantizar la existencia de los canales de comunicación y nexos de trabajo, así como para nosotros respaldar nuestra dedicación y la creación de una nueva arista de análisis de la inversión pública. Por lo tanto, si estás de acuerdo, ya podríamos empezar a trabajar en la redacción del mismo. Imagino que como Universidad ustedes tendrán formatos aplicados anteriormente.

Agradeciendo la presentación e interés de acercamiento, quedo atenta a sus comentarios,

Saludos cordiales

Andrea



Figura 9.6: E-mail enviado por Ministerio de Desarrollo Social en relación a las reuniones sostenidas sobre evaluación social de las inversiones en telecomunicaciones.



ORD. : N° 974

**ANT.** : Proyecto "Estudio y Recomendaciones sobre la resiliencia de la infraestructura del Internet Chileno"

**MAT.** : Solicita incorporar comunas de Magallanes y Antártica Chilena en proyecto indicado.

PUNTA ARENAS, 04 SEP 2017

**DE : INTENDENTE REGION DE MAGALLANES Y ANTÁRTICA CHILENA**

**A : SR. JOSE MIGUEL PIQUER GARDNER  
DIRECTOR DE PROYECTO  
UNIVERSIDAD DE CHILE**

Junto con saludarlo cordialmente, es de especial interés como Intendente de la Región de Magallanes y Antártica Chilena, compartir la importancia que es para nuestra región el desarrollo de todos los proyectos que contribuyan a superar las barreras físicas que nos definen como territorio aislado y como zona extrema, en particular, la conectividad digital, que nos permite acercar el progreso y desarrollo a nuestra zona, junto con integrarnos al resto del país y al mundo, ya que nuestra condición de entrada a la Antártica es una característica bi-continental natural de Magallanes.

Seguramente Ud. tiene en conocimiento el esfuerzo que el gobierno de SE la Presidenta Michelle Bachelet, - de quien soy su representante en la región de Magallanes y Antártica Chilena, como primera autoridad Regional-, realiza en esta materia a través del proyecto de fibra óptica, asimismo, en el ámbito de las políticas públicas de su Gobierno, ha desarrollado el Plan Especial de Zonas Extremas en la región de Magallanes y Antártica Chilena, el cual se ha destacado por su implementación y ejecución de proyectos que han favorecido a los habitantes de esta Austral Región, obras que han permitido mejorar la conectividad en materia portuaria, aeroportuaria y vial en las cuatro provincias de Magallanes.

No obstante lo anterior, conocemos y sufrimos de la fragilidad de la conectividad aérea, terrestre y marítima que impone principalmente nuestra geografía y clima, por lo cual, comprendemos la necesidad de contar con alternativas, y en el caso de la fibra óptica, no sólo entendemos el concepto de resiliencia, sino que también nos parece fundamental y muy necesario.

Así entonces, vengo en solicitar que en el proyecto que Ud. dirige sean incorporados en la propuesta de nueva infraestructura de datos ópticos no sólo las capitales provinciales (Puerto Natales, Punta Arenas, Porvenir y Puerto Williams), sino que también se incorpore a todos los poblados de Magallanes como Puerto Edén, Isla Madre de Dios, Cerro Castillo, Seno Obstrucción, Río Verde, isla Riesco, San Juan, isla Dawson, Cameron, Caleta María, Lago Fagnano, Vicuña, Yendegaia, Pampa Guanaco, Puerto Navarino, Puerto Toro, San Sebastián, Cerro Sombrero, Villa Punta Delgada en San Gregorio, Villa Tehuelches, y la isla de Cabo de Hornos, en lo que pudiera constituir a futuro un enlace hacia el Atlántico ampliando la conectividad para nuestro país.



Por otra parte, quiero señalar que nuestro país ha venido invirtiendo en infraestructura de modo de potenciar nuestra condición de entrada a la Antártica a través de mejoramientos aeroportuarios y marítimos consolidando así nuestra presencia.

Tenemos la convicción de que con la extensión de la fibra óptica desde Magallanes hacia el continente blanco consolidará aún más a nuestro país en el Tratado Antártico. Por ello, considero esencial y fundamental extender la fibra óptica hacia las Villa Las Estrellas en la isla Rey Jorge y hacia sus 8 bases: Base Presidente Frei Montalva, Base Bernardo O'Higgins, Base Naval Capitán Arturo Prat, Base Profesor Julio Escudero, Base Gabriel González Videla, Base Yelcho, Base Carvajal y Base Dr. Guillermo Mann.

Esperando, que nuestra petición tenga una acogida favorable, y dispuestos como Gobierno Regional de Magallanes a apoyar en lo que Ud requiera,

Le saluda muy atentamente,

**JORGE FLIÉS ANÓN**  
**INTENDENTE REGIONAL**  
**MAGALLANES Y ANTARTICA CHILENA**

JFA/MBU/rsa.  
Distribución  
1. Sr. Jose Miguel Piquer Gardner  
2. Gabinete regional  
3. Oficina de Partes

Figura 9.7: Carta enviada por el Intendente de la Región de Magallanes al Director del Proyecto con fecha 04 de septiembre de 2017 solicitando incorporación de las zonas extremas de la región al levantamiento y validación en terreno, e inclusión en la propuesta.



Ilustre Municipalidad de Guaitecas

ORD: 278  
 ANT: Proyecto Fibra óptica  
 MAT: Solicita lo siguiente  
 MELINKA, 25 de abril del 2018

**DE: CRISTIAN ALVARADO OYARZO  
 ALCALDE DE ILUSTRE MUNICIPALIDAD DE GUAITECAS.**

**A: SEBASTIAN PIÑERA ECHEÑIQUE  
 EXCMO. PRESIDENTE DE LA REPUBLICA**

Junto con saludarlo, y con el apoyo del concejo municipal de Guaitecas, venimos a exponer y solicitar lo siguiente:

La comuna de Guaitecas, unas de las pocas comunas isla del País, distante a 87 Kilómetros del centro poblado más cercano, siendo el medio marítimo y el aéreo, los únicos medios de transporte para la conectividad con el resto de Chile, siempre y cuando el clima lo permita.

Creyendo que los avances tecnológicos, disminuyen en forma considerable el aislamiento de los habitantes de esta zona, dichos avances que se ven limitados por el sistema de transmisión de datos con que cuenta la comuna, el cual es una vía microondas, el que ya está saturado y el cual decae considerablemente en situaciones de mal tiempo.

Por lo expuesto, y sabiendo que en su plan de gobierno "Construyamos tiempo mejores para Chile", se considera, cito textual "**Conectar todas las comunas de Chile con fibra óptica e iluminar los principales espacios públicos del País**", venimos a solicitar tenga a bien, ordenar se realice los proyectos necesarios para que la comuna de Guaitecas, se incorpore al proyecto de fibra óptica submarina, en el cual, sin saber los motivos, el Gobierno anterior nos dejó afuera, pasando la línea de fibra óptica cercana a nuestra comuna por alta mar.

Esta demás, decir la gran cantidad de beneficios que este sistema otorgaría a la comuna de Guaitecas y su gente, principalmente en mejorar la conectividad, el acceso a la telemedicina, educación, trabajo entre tantas otras cosas.

Conforme a lo expuesto, la comunidad de Guaitecas, a través de este Alcalde y su concejo municipal, le solicita tener a bien considerar la ejecución de este proyecto, que nos asegure una conectividad óptica, por cable submarino, desde nuestra comuna hacia Chile Continental, a la brevedad posible, garantizando así que los habitantes de zonas alejadas puedan acceder a servicios de telecomunicaciones de forma similar a las que perciben y gozan quienes residen en otras ciudades del país.

Agradecemos todos los buenos oficios que Ud., en su calidad de Presidente de la República, ha realizado y realizará para que este proyecto se concrete lo antes posible.

Se despide cordialmente de Ud.


  
**ALCALDE**  
 CRISTIAN ALVARADO OYARZO  
 ALCALDE

CAO/apj  
**DISTRIBUCION**

- La Indicada
- Arch. Partes
- CC. Concejales

Figura 9.8: Oficio enviado por el Alcalde de Guaitecas a S.E. Presidente de la República Sebastián Piñera con fecha 25 de abril de 2018.

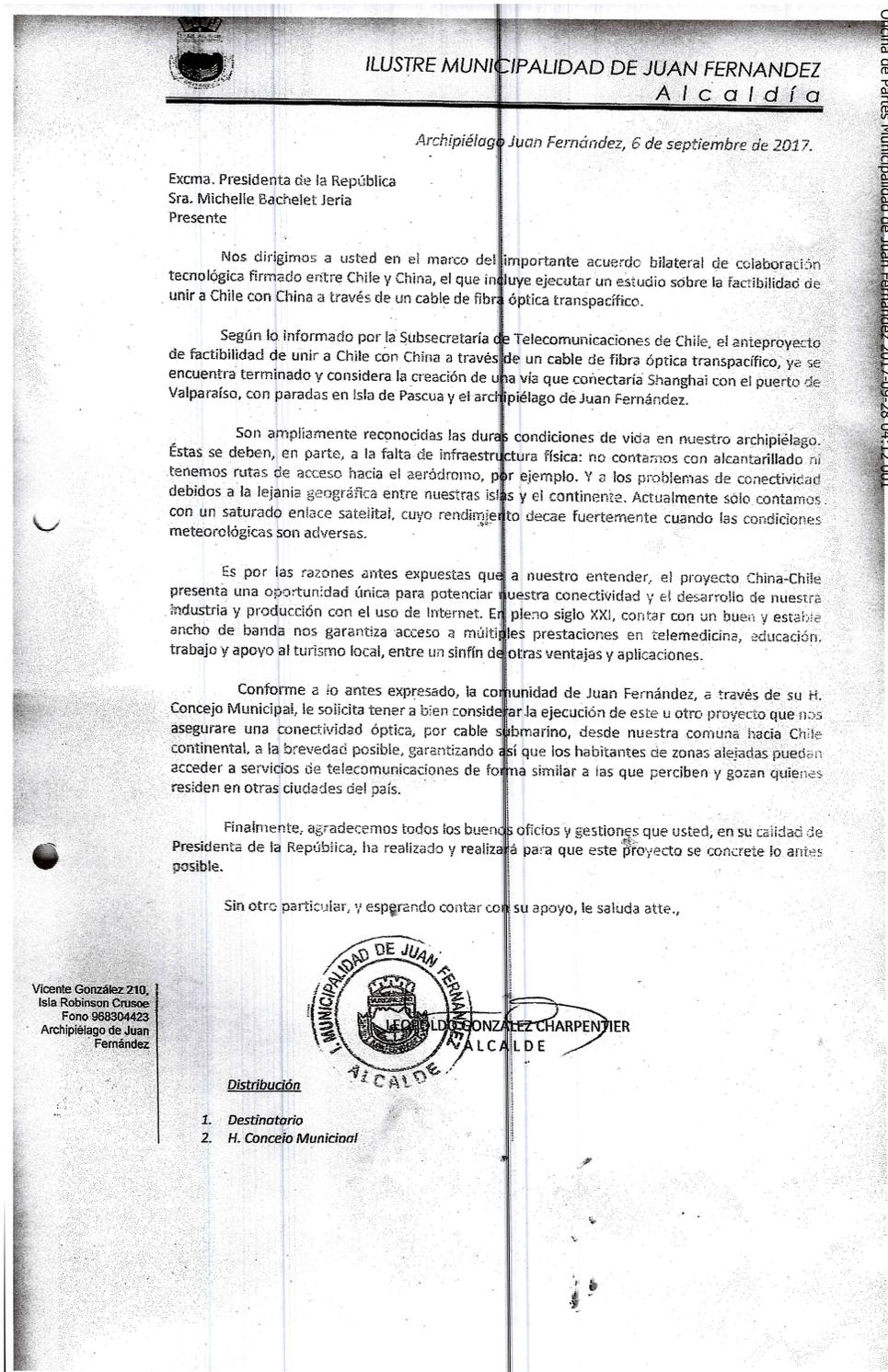


Figura 9.9: Oficio enviado por el Alcalde de Juan Fernández a S.E. Presidenta de la República Michelle Bachelet, con fecha 06 de septiembre de 2017.



Rapa Nui, 16 de junio de 2017

Excma. Presidenta de la República  
Sra. Michelle Bachelet Jeria

Presente

Los representantes electos de la Comisión de Desarrollo de Isla de Pascua y el Presidente del Consejo de Ancianos le extendemos un afectuoso saludo y nos dirigimos a Ud. felicitando las gestiones efectuadas por su equipo de Gobierno tendientes a poder concretar una fibra óptica transoceánica entre China y Chile. Lo anterior es muestra de una política de Estado sostenida que ha tendido lazos de amistad con dicho país, liderando el establecimiento de relaciones diplomáticas y comerciales en Latinoamérica.

Entre estas gestiones se encuentra la firma de un Memorándum de entendimiento entre la Comisión Nacional de Desarrollo y Reforma de la República Popular China y la Subsecretaría de Telecomunicaciones de Chile, acuerdo que incluye la realización de un estudio de factibilidad para un cable de fibra óptica transoceánico entre ambos países.

La prensa ha indicado que ya se han obtenido los primeros frutos de dicho estudio, existiendo un informe de pre factibilidad que presenta tres propuestas de rutas para esta conexión intercontinental, dos de las cuales pasan por Isla de Pascua y Juan Fernández.

Es relevante, Excma. Presidenta, que el Estado de Chile, frente a esta posibilidad de conectividad, tenga una mirada integral de su territorio y reconozca internacionalmente como un país con presencia en la Polinesia. Se trata de una oportunidad, única, por medio de la cual, tal como lo expresó el Presidente chino Xi Jinping, el Océano Pacífico dejará de ser una barrera, para convertirse en un puente de conexión de Chile con China y, con mucho entusiasmo, esperamos que también, con su territorio en Polinesia.

Las islas del Pacífico chilenas de Rapa Nui (Isla de Pascua) y Juan Fernández, han estado históricamente relegadas por su lejanía, constituyendo la actual una oportunidad histórica para otorgar a estos territorios acceso a servicios y tecnologías de la información y de las comunicaciones, que les otorguen herramientas para poder desarrollarse de manera sostenible, en la era de las comunicaciones, pudiendo crear polos de desarrollo científico, tecnológico e igualando las condiciones de acceso a servicios públicos básicos de nuestras comunidades con el resto del territorio nacional.

Por lo anterior solicitamos a Ud. tenga a bien considerar que la comunidad de Rapa Nui quiere ser parte de esta iniciativa, dado que se necesita una carretera de datos de fibra óptica hacia el continente, que permita una mayor conectividad y mejores condiciones de calidad de vida para



sus ciudadanos y acceso a derechos básicos como lo son el acceso a la información, educación de calidad y salud, situación que esperamos sea posible con este proyecto.

Siempre muy agradecidos de vuestra constante preocupación por nuestro pueblo y territorio, le saludan cordialmente.



Figura 9.10: Oficio enviado por la Comisión de Desarrollo de Rapa Nui a S.E. Presidenta de la República Michelle Bachelet, con fecha 16 de junio de 2017.

## 9.2. Descripción base de datos

- Base de datos utilizada:  
PostgreSQL<sup>1</sup> versión 9.6.7.
- Manejo de objetos geo-referenciados:  
Postgis<sup>2</sup>.
- Estándar cartográfico:  
EPSG:4326<sup>3</sup> (último estándar disponible).
- Tipo de datos utilizados:  
Para el registro de datos geo-referenciados se utilizaron datos de tipo geométricos. Estos son una simplificación que no consideran la forma elipsoidal de la Tierra y trata los datos como la superficie de una esfera. La decisión se tomó por la rapidez de procesamiento y simplicidad del proyecto para replicación de los análisis. Los tipos de datos geométricos utilizados se presentan en el cuadro 9.1.

Cuadro 9.1: Tipos de datos utilizados para registrar información geo-referenciada

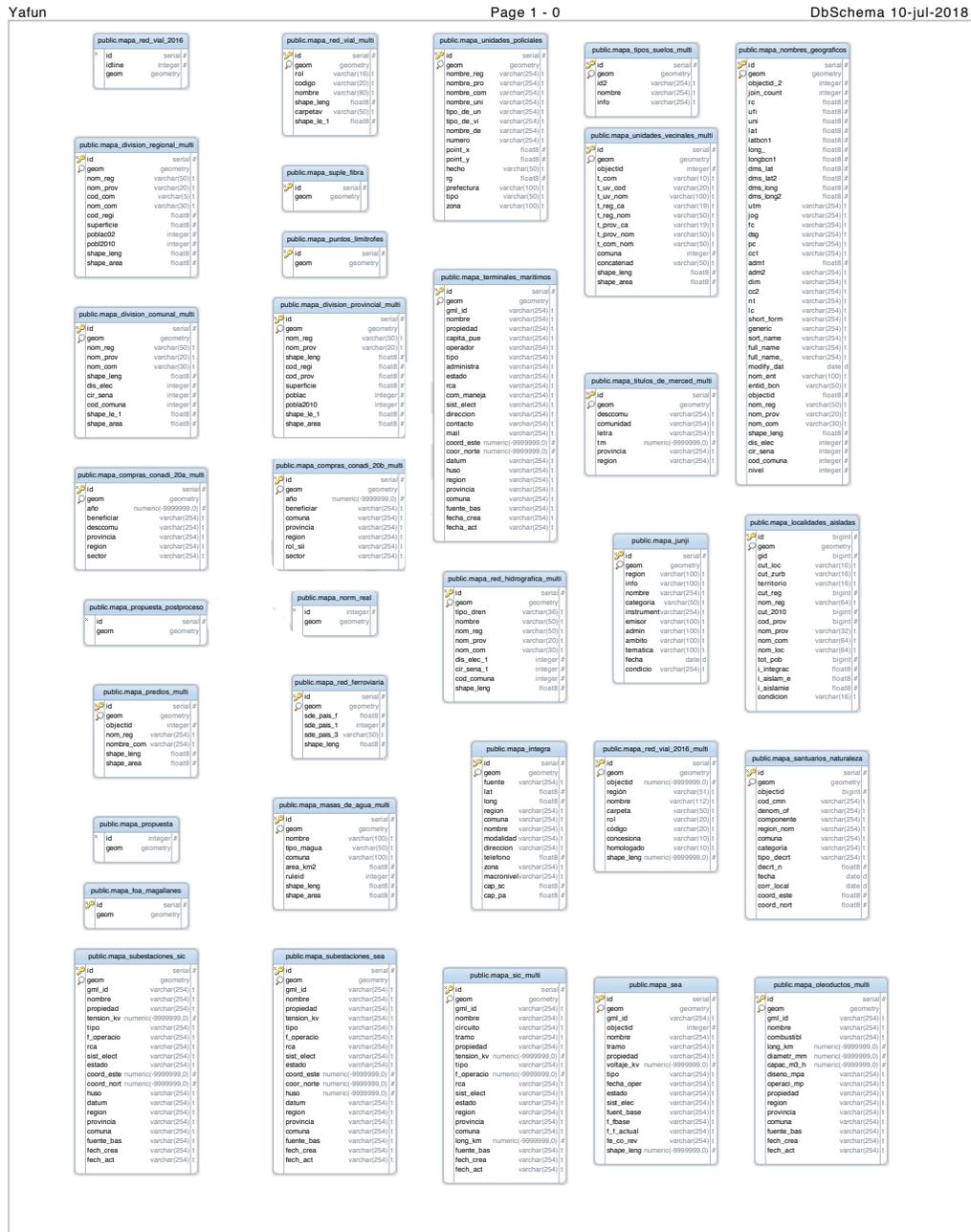
Tipo de dato	Descripción y uso
POINT	Representa una ubicación específica mediante un par de coordenadas de latitud y longitud. Fue utilizado para registrar ubicación de comunas y otras zonas de interés, como subestaciones eléctricas, jardines infantiles o unidades vecinales.
LINESTRING	Representa una línea sobre la superficie de la Tierra, compuesta por una secuencia de coordenadas de latitud y longitud conectadas. Este tipo de datos fue utilizado para documentar todos los caminos validados en terreno, para la construcción de la propuesta y para incorporar información adicional a la base de datos.
POLYGON	Tipo de dato que representa una zona geográfica compuesta por una secuencia de coordenadas. En nuestro proyecto se utilizó para registrar las divisiones comunales, provinciales y regionales, así como también las zonas urbanas y otras áreas que se incorporaron como información adicional.

### Estructura de la base de datos

<sup>1</sup><https://www.postgresql.org/>

<sup>2</sup><https://postgis.net/>

<sup>3</sup><http://spatialreference.org/ref/epsg/wgs-84/>



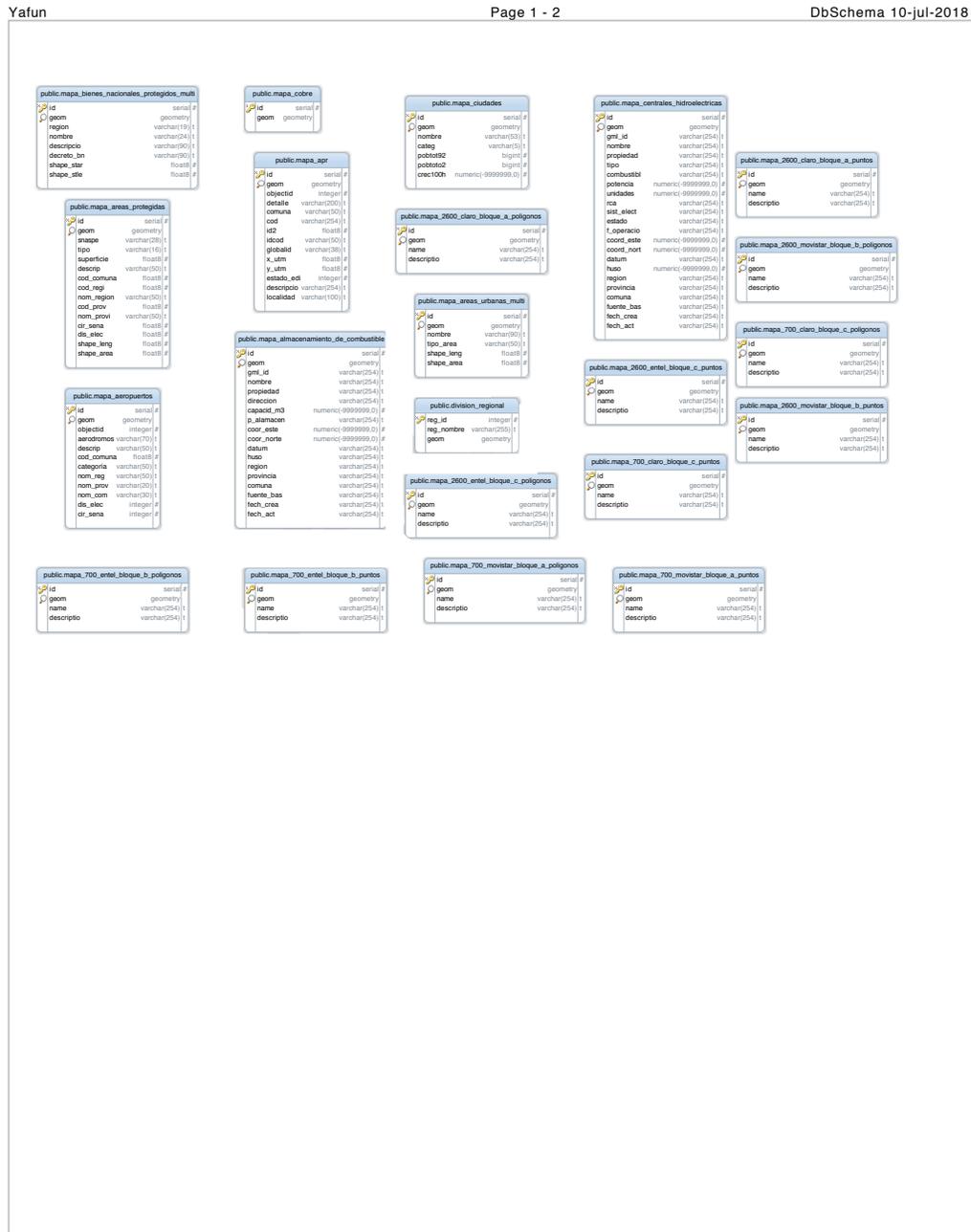
Yafun

Page 1 - 1

DbSchema 10-jul-2018

Diagram showing database schema tables for Yafun. Each table is represented by a box containing its name and a list of fields with their data types and constraints.

Table Name	Fields
public.mapa_subestaciones_sing	id serial #, geom geometry, gmi_id varchar(254), nombre varchar(254), propiedad varchar(254), tension_kv varchar(254), tipo varchar(254), f_operacio varchar(254), rca varchar(254), sist_elect varchar(254), estado varchar(254), coord_este numeric(9999999.0) #, coord_norte numeric(9999999.0) #, huso varchar(254), datum varchar(254), region varchar(254), provincia varchar(254), comuna varchar(254), fuente_bas varchar(254), fech_crea varchar(254), fech_act varchar(254)
public.mapa_subestaciones_sing_multi	id serial #, geom geometry, gmi_id varchar(254), nombre varchar(254), circuito varchar(254), tramo varchar(254), propiedad varchar(254), tension_kv numeric(9999999.0) #, tipo varchar(254), f_operacio numeric(9999999.0) #, rca varchar(254), sist_elect varchar(254), estado varchar(254), coord_este numeric(9999999.0) #, coord_norte numeric(9999999.0) #, huso numeric(9999999.0) #, datum varchar(254), region varchar(254), provincia varchar(254), comuna varchar(254), long_km numeric(9999999.0) #, fuente_bas varchar(254), fech_crea varchar(254), fech_act varchar(254)
public.mapa_supe	id serial #, geom geometry
public.mapa_fibra_tripia	id serial #, geom geometry
public.mapa_foa	id serial #, geom geometry
public.mapa_fibra_doble	id serial #, geom geometry
public.mapa_fibra_cuadruple	id serial #, geom geometry
public.mapa_fibra_internacional	id serial #, geom geometry
public.mapa_fibra_soterrada	id serial #, geom geometry
public.mapa_zonas_ficadas	id serial #, geom geometry, objctid bigint #, cod_urn varchar(254), denom_cod varchar(254), componente varchar(254), region_nom varchar(254), comuna varchar(254), categoria varchar(254), tipo_deort varchar(254), deort_n float8 #, region float8 #, coord_local date #, coord_este float8 #, coord_norte float8 #
public.mapa_gasoductos_multi	id serial #, geom geometry, gmi_id varchar(254), nombre varchar(254), combustib varchar(254), long_km numeric(9999999.0) #, diamer_mm numeric(9999999.0) #, capac_md numeric(9999999.0) #, disen_mpa numeric(9999999.0) #, operac_mp numeric(9999999.0) #, v_line varchar(254), propiedad varchar(254), region varchar(254), provincia varchar(254), comuna varchar(254), fuente_bas varchar(254), ft_puesta varchar(254), fech_crea varchar(254), fech_act varchar(254)
public.mapa_plantas_tratamiento_aguas_servidos	id serial #, geom geometry, gmi_id varchar(254), nombre varchar(254), descrip_1 varchar(150), descrip_2 varchar(150)
public.mapa_zonas_urbanas_multi	id serial #, geom geometry, nombre varchar(50)
public.puntos_a_conectar	pun_id serial #, pun_com_id integer #, pun_nombre varchar(1), pun_geom geometry
public.mapa_ferry	id serial #, geom geometry
public.mapa_fibra	id serial #, geom geometry
public.mapa_centrales_solares	id serial #, geom geometry, gmi_id varchar(254), nombre varchar(254), tipo varchar(254), combustib varchar(254), potencia numeric(9999999.0) #, unidades numeric(9999999.0) #, rca varchar(254), sist_elect varchar(254), estado varchar(254), f_operacio numeric(9999999.0) #, coord_este numeric(9999999.0) #, coord_norte numeric(9999999.0) #, datum varchar(254), huso numeric(9999999.0) #, region varchar(254), provincia varchar(254), comuna varchar(254), fuente_bas varchar(254), fech_crea varchar(254), fech_act varchar(254)
public.mapa_centrales_termostaticas	id serial #, geom geometry, gmi_id varchar(254), nombre varchar(254), tipo varchar(254), combustib varchar(254), potenciamw numeric(9999999.0) #, unidades numeric(9999999.0) #, rca varchar(254), sist_elect varchar(254), estado varchar(254), f_operacio numeric(9999999.0) #, coord_este numeric(9999999.0) #, coord_norte numeric(9999999.0) #, datum varchar(254), huso numeric(9999999.0) #, region varchar(254), provincia varchar(254), comuna varchar(254), fuente_bas varchar(254), fech_crea varchar(254), fech_act varchar(254)
public.mapa_concesiones_al_31_12_2010	id serial #, geom geometry, objctid integer #, empresa_id integer #, periodo_dt varchar(254), concesion_ numeric(9999999.0) #, nombre_con varchar(254), numero_doc numeric(9999999.0) #, fecha_soc date #, numero_cas numeric(9999999.0) #, pdigital_ numeric(9999999.0) #, contrativ datum #, estado integer #, zona_utm integer #, coord_este numeric(9999999.0) #, y numeric(9999999.0) #, sigla varchar(254), ut_c varchar(254), region varchar(254), shape_long numeric(9999999.0) #, shape_area numeric(9999999.0) #
public.mapa_estaciones_de_servicio	id varchar(254), geom geometry, ultimaactu varchar(254), cable varchar(254), numero varchar(254), latitud varchar(254), longitud varchar(254), comuna varchar(254), distrib varchar(254), hestacion varchar(254), farmacia varchar(254), banopublic varchar(254), serviciode varchar(254), autoservic varchar(254), historidea varchar(254), gasolina3 varchar(254), petroloddi varchar(254), gasolnads varchar(254), gtovehic varchar(254), gto2en3 varchar(254), gto2en7 varchar(254), kerosena24 varchar(254), jagpetodi varchar(254), tarjetasa varchar(254), cheque varchar(254), tarjetagra varchar(254)
public.mapa_electridad	id serial #, geom geometry
public.mapa_bocatomas	id serial #, geom geometry, nom_cuenca varchar(254), nom_fuente varchar(100), nombre varchar(100), rzn_social varchar(100), provincia varchar(254), comuna varchar(254), um_rorte float8 #, um_este float8 #, datum float8 #, huso integer #, rivera varchar(254), tipo_bocat varchar(254), tipo_capta varchar(254), obra_desi varchar(254), causal_max float8 #, unidad varchar(19), rio_compu varchar(254), aereo varchar(254), region_num float8 #
public.mapa_calefas	id serial #, geom geometry, name varchar(254), reg_id integer #
public.mapa_centrales_biomasa	id serial #, geom geometry, gmi_id varchar(254), nombre varchar(254), propiedad varchar(254), tipo varchar(254), combustib varchar(254), unidades numeric(9999999.0) #, rca varchar(254), sist_elect varchar(254), estado varchar(254), f_operacio varchar(254), coord_este numeric(9999999.0) #, coord_norte numeric(9999999.0) #, datum varchar(254), huso numeric(9999999.0) #, region varchar(254), provincia varchar(254), comuna varchar(254), fuente_bas varchar(254), fech_crea varchar(254), fech_act varchar(254)
public.mapa_centrales_eolicas	id serial #, geom geometry, gmi_id varchar(254), nombre varchar(254), propiedad varchar(254), tipo varchar(254), combustib varchar(254), unidades numeric(9999999.0) #, rca varchar(254), sist_elect varchar(254), estado varchar(254), f_operacio varchar(254), coord_este numeric(9999999.0) #, coord_norte numeric(9999999.0) #, datum varchar(254), huso numeric(9999999.0) #, region varchar(254), provincia varchar(254), comuna varchar(254), fuente_bas varchar(254), fech_crea varchar(254), fech_act varchar(254)
public.mapa_comunidades_indigenas	id serial #, geom geometry, comuna varchar(254), fecha varchar(20), fuente_id varchar(15), provincia varchar(50), region varchar(50), registro numeric(9999999.0) #
public.mapa_atractivos_turisticos	id serial #, geom geometry, codnanc varchar(10), jerarquia varchar(84), categoria varchar(84), tipo varchar(58), subtipo varchar(70), nombre varchar(70), region varchar(24), provincia varchar(14), comuna varchar(25), localidad varchar(25), descripco varchar(254), direccion varchar(40), telefono varchar(19), propiedad varchar(14), administrn varchar(24), or varchar(13), distac float8 #, cc varchar(22), loc_urbana varchar(20), estacional varchar(100), uso_tur varchar(29), estado varchar(14), demania varchar(4), servicios varchar(33), hoganore varchar(20), distor bigint #, est8419 bigint #, nor8419 bigint #, fotografia varchar(7), est8417 bigint #, nor8417 bigint #, est8412 bigint #, nor8412 bigint #
public.mapa_establecimientos_salud	id serial #, geom geometry, codest varchar(254), fecha float8 #, nomeste varchar(254), coding float8 #, nomreg varchar(254), odde float8 #, nomre varchar(254), nomcom varchar(254), nomcom varchar(254), pertemen varchar(254), tipost varchar(254), viacasso varchar(254), direcc varchar(254), tono varchar(254), coordn19 float8 #, coordy19 float8 #
public.mapa_establecimientos_salud	id serial #, geom geometry, nom_cuenca varchar(254), nom_fuente varchar(100), nombre varchar(100), rzn_social varchar(100), provincia varchar(254), comuna varchar(254), um_rorte float8 #, um_este float8 #, datum float8 #, huso integer #, rivera varchar(254), tipo_bocat varchar(254), tipo_capta varchar(254), obra_desi varchar(254), causal_max float8 #, unidad varchar(19), rio_compu varchar(254), aereo varchar(254), region_num float8 #
public.mapa_calefas	id serial #, geom geometry, name varchar(254), reg_id integer #
public.mapa_centrales_biomasa	id serial #, geom geometry, gmi_id varchar(254), nombre varchar(254), propiedad varchar(254), tipo varchar(254), combustib varchar(254), unidades numeric(9999999.0) #, rca varchar(254), sist_elect varchar(254), estado varchar(254), f_operacio varchar(254), coord_este numeric(9999999.0) #, coord_norte numeric(9999999.0) #, datum varchar(254), huso numeric(9999999.0) #, region varchar(254), provincia varchar(254), comuna varchar(254), fuente_bas varchar(254), fech_crea varchar(254), fech_act varchar(254)
public.mapa_centrales_eolicas	id serial #, geom geometry, gmi_id varchar(254), nombre varchar(254), propiedad varchar(254), tipo varchar(254), combustib varchar(254), unidades numeric(9999999.0) #, rca varchar(254), sist_elect varchar(254), estado varchar(254), f_operacio varchar(254), coord_este numeric(9999999.0) #, coord_norte numeric(9999999.0) #, datum varchar(254), huso numeric(9999999.0) #, region varchar(254), provincia varchar(254), comuna varchar(254), fuente_bas varchar(254), fech_crea varchar(254), fech_act varchar(254)
public.mapa_comunidades_indigenas	id serial #, geom geometry, comuna varchar(254), fecha varchar(20), fuente_id varchar(15), provincia varchar(50), region varchar(50), registro numeric(9999999.0) #
public.division_comunal	com_id integer #, com_pro_id integer #, com_reg_id integer #, com_nombre varchar(254), geom geometry
public.division_provincial	pro_id integer #, pro_reg_id integer #, pro_nombre varchar(254), geom geometry



### 9.3. Revisión sistemática: métricas de robustez de redes

*La presente revisión sistemática de literatura forma parte de la Tesis de Magister en Ciencia de la Computación del alumno Fernando Morales, desarrollada en el contexto del proyecto CORFO 15BPE-47225 [64].*

#### 9.3.1. Introducción

Dado que nuestra pregunta de investigación requiere realizar un estudio imparcial y extensivo sobre un tema amplio en la literatura científica, la comunidad investigadora ha desarrollado formas de estudios sistemáticos. El que se adecúa a nuestra situación corresponde al *estudio de mapeo sistemático*, descrito en [47] como una forma de estudio que utiliza una metodología previamente definida para identificar, analizar e interpretar todas las evidencias disponibles sobre alguna pregunta de investigación de tal forma que sea imparcial y (hasta cierto grado) repetible.

La mayoría de las investigaciones comienzan con un estudio (de alguna forma) previo a la literatura científica. Sin embargo, si este estudio no es exhaustivo ni objetivo, posee poco valor científico. Éste es el motivo principal por el cual se realizan estudios sistemáticos, ya que resumen el trabajo reciente (o no tan reciente) de una manera objetiva. Por ejemplo, el estudio debe realizarse siguiendo una estrategia predefinida. En particular, un estudio sistemático debe identificar y reportar (a toda costa) todos los estudios concernientes.

#### Ventajas y desventajas

Las ventajas de un estudio de revisión sistemática incluyen:

- Una metodología bien definida hace menos probable que los resultados no sean imparciales.
- Puede dar información acerca de los efectos de algún fenómeno a través de un amplio rango de escenarios y metodologías empíricas. Si los estudios encuentran resultados consistentes, la revisión sistemática provee evidencia de que el fenómeno es robusto y transferible. Si los estudios proveen resultados inconsistentes, se pueden estudiar las variaciones.
- En el caso de los estudios cuantitativos, es posible combinar datos usando técnicas meta-analíticas. Aumentando la probabilidad de encontrar efectos que estudios menores puedan no detectar.

La mayor desventaja es que requieren un esfuerzo considerablemente mayor que estudios de literatura tradicionales. Además, como existe mayor capacidad de meta-análisis, es posible detectar pequeñas parcialidades como relaciones consistentes.

#### Características de los estudios de revisión sistemática

Algunas de las características que diferencian un estudio de revisión sistemática de uno convencional son:

- Requieren de un protocolo de revisión que especifica (al menos) una pregunta de investigación y los métodos a utilizar durante la revisión.
- Se basan en una estrategia de búsqueda predefinida que busca detectar la mayor cantidad de literatura concerniente a la pregunta de investigación.
- Se documenta la estrategia de búsqueda para que los lectores puedan verificar la rigurosidad, completitud y reproducción del proceso (considerando que las búsquedas en librerías digitales son casi imposibles de repetir).
- Requieren criterios de inclusión y exclusión específicos para verificar el potencial de cada artículo.
- Especifican la información obtenida por cada estudio primario incluyendo el criterio de calidad con el cual se evaluó el artículo.
- Es un prerrequisito de un análisis cuantitativo.

### Proceso de revisión

Un estudio de mapeo sistemático consiste en definir los siguientes pasos:

- Antecedentes: la necesidad de una revisión sistemática nace del requerimiento de los investigadores de resumir información existente. Antes de realizar la revisión, se debe evaluar si es necesaria para de esta manera, encontrar la pregunta adecuada y correspondiente al problema en cuestión.
- Preguntas de estudio: la estructura de las preguntas de investigación que la revisión intenta responder deben, idealmente, incluir los criterios de *población* (gente o tema general que comprende a los antecedentes descritos), *intervención* (metodología/herramientas/tecnología que estudian una problemática específica), *comparación* (metodología/herramientas/tecnología con la cual la intervención será comparada), *resultado* (resultados o mejoras deseadas y esperadas con respecto a los antecedentes descritos) y *contexto* (temas y participantes con quienes la comparación será realizada).
- Estrategia: forma y lugar donde la búsqueda de información será realizada.
- Criterio(s) de selección de estudio: criterios de inclusión y exclusión que serán aplicados a los resultados de la estrategia de búsqueda.
- Proceso de selección de estudios: metodología con la cual se aplicarán los criterios definidos anteriormente.
- Extracción de datos: metodología y descripción de los datos a extraer del artículo.
- Análisis de datos: preguntas relacionadas que responden la pregunta principal de investigación.
- Método(s) de publicación de los resultados: artículo o forma de divulgación con la cual los resultados serán descritos.

### 9.3.2. Protocolo de estudio de mapeo sistemático

A continuación, se describen cada una de las partes del protocolo usado en este trabajo de tesis.

#### Antecedentes

Bajo la necesidad de encontrar nuevas formas eficientes de medir robustez de la Internet, y bajo el aspecto de las redes complejas, se formula la siguiente pregunta: **¿Qué métricas existen para estudiar la robustez en redes complejas?**

#### Preguntas de estudio

En la tabla 9.2 se describen los criterios de población, intervención, comparación, resultado y contexto.

Cuadro 9.2: Criterios de población, intervención, comparación, resultado y contexto.

<b>Criterio</b>	<b>Descripción</b>
Población	Redes complejas.
Intervención	Métricas de robustez.
Comparación	Diferentes métricas de robustez, resiliencia y percolación que podamos encontrar.
Resultado	Descripción y categoría de la métrica.
Contexto	Industria de telecomunicaciones y transporte, políticas públicas, investigación de operaciones.

A continuación, se presentan las preguntas asociadas a la pregunta principal.

- ¿Qué métricas estudia el *paper*?
- ¿Cuáles son las aplicaciones (de existir) que el *paper* propone o estudia?

Cada una de estas preguntas fue desglosada en varias preguntas específicas (detalladas en la descripción de análisis de datos) de manera que puedan ser respondidas de la forma más objetiva y clara posible.

#### Estrategia

Se realiza una búsqueda manual en los siguientes repositorios:

- ACM Digital Library.
- IEEE Xplore (IEEE Electronic Library - IEL).

- ScienceDirect.
- Web of Science.
- PLoS (Public Library of Science).
- Nature.

Se seleccionaron estos repositorios porque son los más relevantes en los tópicos de las redes complejas.

Un diagrama de la búsqueda realizada es mostrado en la figura 9.11. Las operaciones lógicas  $X \text{ AND } Y$  y  $X \text{ OR } Y$  son para buscar *papers* que contengan los términos  $X$  e  $Y$ , o  $X$  o  $Y$  respectivamente. La operación  $X \text{ PRE}/n \text{ } Y$  es para buscar el término  $X$  sucedido por  $Y$  en  $n$  palabras. Los procesos de *stemming*<sup>4</sup> de los motores de búsqueda son considerados. Se buscan estos términos tanto en el *abstract* como el título del *paper*.

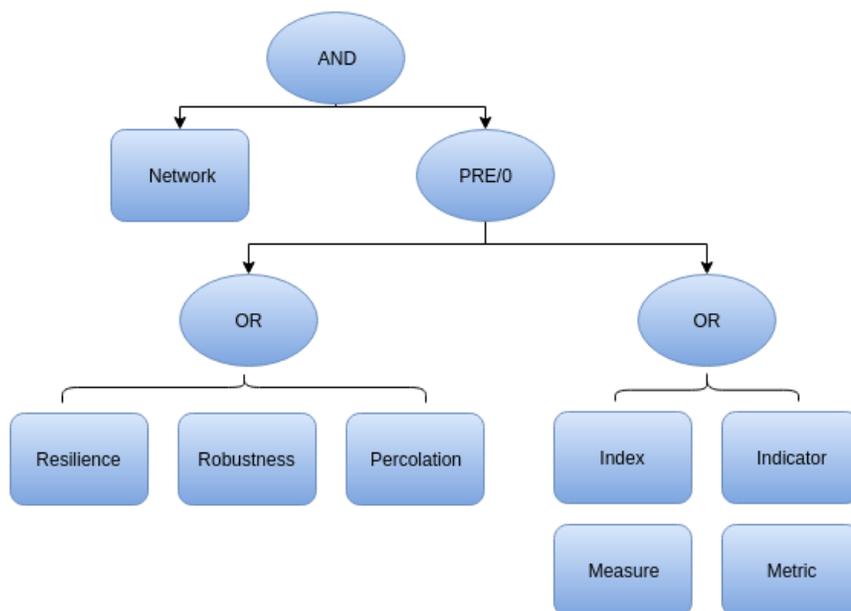


Figura 9.11: Diagrama de búsqueda.

En la tabla 9.3, se muestran la cantidad de artículos resultados de la consulta a cada uno de los motores de búsqueda.

### Criterios de selección de estudios

Dados los resultados de una búsqueda se aplican los criterios de exclusión/inclusión para la selección de los estudios a analizar.

<sup>4</sup>Es un método para reducir una palabra a su raíz.

Cuadro 9.3: Cantidad de artículos por motor de búsqueda.

<b>Motor de búsqueda</b>	<b>Cantidad de artículos</b>
ACM Digital Library	2
IEEE Xplore	11
ScienceDirect	6
Web of Science	192
PLoS	6
Nature	2

Criterios de inclusión

El *paper*:

- Está en inglés.
- Es un estudio primario (*journal*).
- No es un estudio *survey*.
- Fue publicado entre enero de 2005 y diciembre 2016.
- Está publicado en una revista científica.
- Está disponible online.
- Tiene como tópico las redes complejas.

Criterios de exclusión

El *paper*:

- Tiene como tópico las redes neuronales.
- No declara resultados concluyentes.
- No estudia las métricas de robustez.

**Proceso de selección de estudios**

Los resultados de la búsqueda fueron ordenados por año y fuente. Luego, analizados por dos investigadores que leyeron solamente el título y el *abstract* aplicando los criterios de inclusión/exclusión correspondientes.

La lista de *papers* aprobados y rechazados se mantienen en una lista. Los rechazados son listados junto con el motivo de su rechazo. En el caso de no existir un acuerdo en la inclusión un *paper*, un tercer investigador revisa el artículo y decide si incluirlo o no.

### Extracción de datos

De cada paper se extraerán el título, autor, abstract, DOI y año de publicación.

### Análisis de datos

En esta sección de la metodología propuesta, se definen como se responde a las preguntas de investigación. Junto con la información que aporta la pregunta y una posible respuesta. En la tabla 9.4 se presenta el análisis de la primera pregunta propuesta: ¿Qué métricas estudia el paper? La tabla 9.5 presenta el análisis de la segunda pregunta propuesta: ¿Cuáles son las aplicaciones (de existir) de la métrica, propuestas por el estudio?

Cuadro 9.4: Ejemplo de información de las respuestas de la pregunta 1.

Pregunta	Información	Posible respuesta
¿Cuál es el nombre de la métrica?	Nombre	Betweenness Centrality
¿Cuál es la definición formal de esta métrica?	Definición	Cantidad de caminos más cortos que pasan por un nodo en particular
¿A qué categoría pertenece esta métrica?	Categoría	Robustez
¿Qué interpretación tiene un valor de esta métrica?	Interpretación	Generalmente, un bajo valor representa menos vulnerabilidad para aquel nodo

Cuadro 9.5: Ejemplo de información de las respuestas de la pregunta 2.

Pregunta	Información	Posible respuesta
¿Cuáles son las aplicaciones (de existir) de la métrica, propuestas por el estudio?	Aplicación	Medicina

### Método de publicación de los resultados

Los resultados de este estudio son de interés del proyecto mencionado en la sección Introducción. Son publicados en el presente informe de trabajo de tesis.

### 9.3.3. Resultados

#### Conceptos asociados a métricas

Basados en el origen y conceptos usados por cada métrica estudiada se detectaron los siguientes grupos. Nótese que una métrica puede pertenecer a varios grupos o ninguno dependiendo del caso. Cada grupo se presenta como  $X (Y) [Z]$ , donde  $X$  es el concepto asociado,  $Y$  su traducción al español y  $Z$  su etiquetación asociada para posteriores referencias.

- *Connectivity* (Conectividad) [*Con*]: Se refiere a qué tan conectados están los vértices y/o componentes del grafo.
- *Degree* (Grado) [*Deg*]: Se refiere al número de aristas incidentes a un vértice.
- *Percolation* (Percolación) [*P*]: Se refiere a la teoría según la cual se asocia cada vértice con un valor representando la probabilidad o estado de infección del vértice. Es usado recientemente para modelar la robustez en redes.
- *Centrality* (Centralidad) [*Con*]: Se refiere a la importancia de algún elemento del grafo con respecto a otros o bien al grafo completo.
- *Distance* (Distancia) [*D*]: Se refiere al tamaño del camino más corto entre dos vértices.
- *Spectral* (Espectral) [*Sp*]: Se refiere a la teoría según la cual se analizan los vectores y valores propios que representa una matriz. Por ejemplo, la matriz de adyacencia del grafo.
- *Varies* (Varía) [*V*]: Se refiere a que el tema puede variar debido a la definición de la métrica.

#### Costo computacional

Cada métrica tiene un costo computacional (en tiempo) asociado dentro de las siguientes opciones, dependiendo de  $n$  y  $m$ :

- Polinomial (*POLY*): El costo se puede representar como una función proporcional a un polinomio  $P(n, m)$ .
- Exponencial (*EXP*): El costo se puede representar como una función proporcional a una exponencial  $e(x, y)$ .
- No determinado (*ND*): No se pudo determinar el costo.
- Depende de la métrica (*DEPENDS*): Debido a la definición de la métrica, el costo varía.

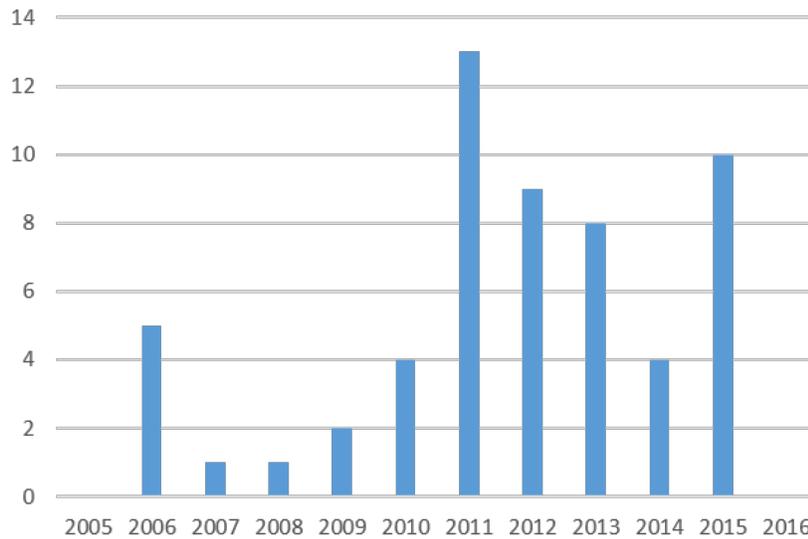


Figura 9.12: Frecuencia de las métricas encontradas por fecha.

### Estadísticas

De un total de 128 artículos leídos, se extrajeron 57 métricas. La figura 9.12 muestra cuales fueron los años donde más se definieron métricas (2011).

La figura 9.13 muestra qué tan frecuentes fueron las categorías. Es importante notar que existen métricas que pertenecen a dos categorías y por ende la suma de las frecuencias corresponde a un número mayor a la cantidad total de métricas. Por raro que parezca no se encontraron métricas para los años 2005 ni 2016.

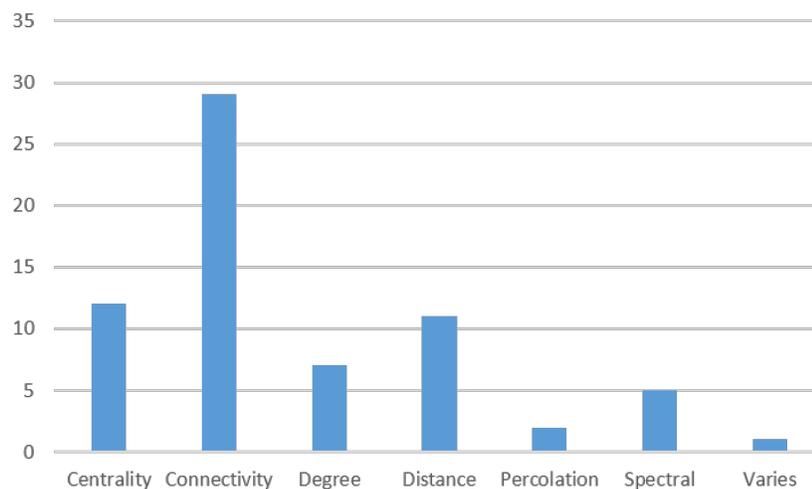


Figura 9.13: Frecuencia de las métricas encontradas por categoría.

La figura 9.14 muestra la misma frecuencia sobre las fechas, pero también divididas por categoría. Se puede observar que antes del 2010 no se encontraron métricas relacionadas a centralidad.

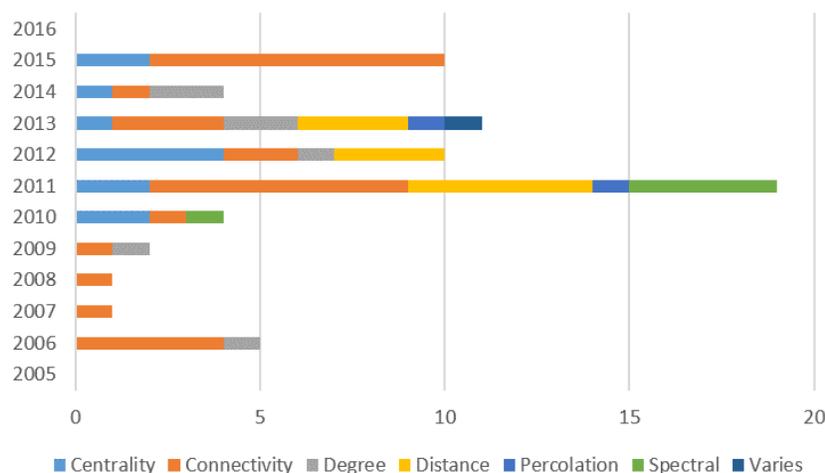


Figura 9.14: Frecuencia de las métricas encontradas por fecha y categoría.

La figura 9.15 indica las proporciones de los costos con respecto al total de métricas. Cabe notar que las métricas con costo exponencial se vuelven poco prácticas a la hora de calcularla en grafos de tamaño medio.

La figura 9.16 indica que la mayoría de las métricas es estudiada en temas generales de teoría de grafos, seguida por estudios de telecomunicaciones.

Finalmente, la figura 9.17 muestra cuales fueron las principales editoriales. Dentro de la categoría otras destacan: *Springer, Taylor & Francis, National Acad Sciences, BioMed Central Ltd.*

Como resumen, la tabla 9.6 muestra la lista de métricas encontradas con las cuales se realizaron todas las estadísticas anteriores.

Nombre métrica	Cita
<i>Relative betweenness</i>	[92]
<i>Betweenness Interference</i>	[92]
<i>Fragmentation</i>	[16]
<i>Reconstructability Coefficient</i>	[57]
<i>Free Energy Rank</i>	[26]
<i>Entropy Rank</i>	[26]
<i>Link Robustness Index</i>	[124]
<i>Community Robustness</i>	[61]
<i>Pairwise Disconnectivity Index</i>	[78]
<i>Resilience Factor</i>	[91]
<i>Preferential Perturbation Score</i>	[81]
<i>Entropy of the Degree Distribution</i>	[111]

<i>Perturbation Score</i>	[81]
<i>Maximum Perturbation Score</i>	[81]
<i>Average Perturbation Gradient</i>	[81]
<i>Node Load</i>	[112]
<i>Global Functionality Loss</i>	[125]
<i>Random Resilience Score</i>	[104]
<i>Viral Conductance</i>	[123]
<i>Targeted Resilience Score</i>	[104]
<i>Fragility</i>	[54]
<i>Dynamic Robustness Metric</i>	[54]
<i>Network Trip Robustness</i>	[71]
<i>Network Robustness Metric</i>	[50]
<i>Covering Degree</i>	[90]
<i>Covering Index</i>	[90]
<i>Effective Graph Resistance</i>	[51]
<i>Geographical Path Diversity</i>	[19]
<i>Effective Geographical Path Diversity</i>	[19]
<i>Normalized Aggregated Remaining Flow</i>	[19]
<i>Aggregated Remaining Flow</i>	[19]
<i>Compensated Total Graph Geographical Diversity</i>	[19]
<i>Total Graph Geographical Path Diversity</i>	[19]
<i>Robustness Measure 1 (No Name)</i>	[110]
<i>Conectivity Robustness Function</i>	[121]
<i>Efficiency Function</i>	[121]
<i>Relative Entropy</i>	[34]
<i>Node/Edge Resilience</i>	[88]
<i>Node/Edge Criticality</i>	[108]
<i>Network Criticality</i>	[108]
<i>Supply Availability</i>	[132]
<i>Network Connectivity</i>	[132]
<i>Best Delivery Efficiency</i>	[132]
<i>Average Delivery Efficiency</i>	[132]
<i>Natural Connectivity</i>	[118]
<i>Sensitivity</i>	[24]
<i>Deterioration</i>	[9]
<i>Temporal Efficiency</i>	[93]
<i>Bridgeness</i>	[18]
<i>Local Natural Connectivity</i>	[122]
<i>Subgraph Centrality</i>	[120]
<i>Random-Robustness Index</i>	[106]

<i>Unique Robustness Measure</i>	[94]
<i>Percolation Centrality</i>	[76]
<i>Supply Chain Index</i>	[77]
<i>Generalized Robustness Index</i>	[62]
<i>Relative Area Index</i>	[75]

Cuadro 9.6: Lista de las métricas encontradas por el mapeo sistemático.

### Métricas encontradas

Un sistema que ejerce, ya sea manteniendo o al menos restaurando la operabilidad bajo fallas o ataques, es considerado un sistema resiliente. Este trabajo de tesis explora las definiciones dadas en la literatura con el objetivo de cuantificar la resiliencia de un sistema interconectado. Cuando la resiliencia es considerada como tolerancia a fallas aleatorias de los componentes de la red, comúnmente se le llama robustez [21]. En la literatura, los conceptos flexibilidad y confiabilidad están relacionados también [97, 65].

Los orígenes de las fallas aleatorias en los sistemas interconectados incluyen la sobrecarga de componentes, pérdida de energía o enlaces de telecomunicación, configuración errónea de los componentes y fallas de dispositivos electrónicos.

Cuando el interés no yace en las fallas aleatorias sino en qué tan bien un sistema interconectado soporta ataques deliberados [22], el término vulnerabilidad es usado. El objetivo usual de aquel atacante es causar la mayor ruptura al sistema [131, 32]. El ataque puede consistir en una secuencia de ellos en vez de uno sólo [107].

Cuando múltiples amenazas existen para un sistema, la vulnerabilidad del mismo como un todo, puede ser cuantificada en términos de los impactos individuales y en la ocurrencia de probabilidades de estas amenazas [98]. Éste se extiende a la robustez sobre fallas aleatorias cuando los impactos y las probabilidades pueden ser estimados. Entonces, los eventos posibles pueden ser categorizados desde el más grave (el de mayor impacto y probabilidad) hasta el menos grave.

En ambos casos, robustez y vulnerabilidad, el impacto del daño no es la única medida interesante, sino también la velocidad con la cual el sistema es capaz de recuperarse [66].

Las estrategias y metodologías para controlar el “ciclo de la resiliencia” (refiriéndose a los cambios de estado entre operacional, interrumpido y recuperado) [98, 101] enfatiza cómo los sistemas son propensos a fallas y que un completo entendimiento de la operación normal de un sistema es la base necesaria para la identificación de posibles problemas. Los pasos básicos involucran identificar amenazas, detectar eventos indeseables y tener formulados los planes de respuesta para cualquier evento que pueda comprometer la funcionalidad del sistema.

#### Métricas basadas en eliminación

Muchas de las métricas basadas en eliminación de vértices son funciones del número de vértices eliminados del grafo. Éstas definiciones pueden ser aplicadas o bien para análisis del peor caso, caso promedio o como un muestreo aleatorio repetitivo de eliminación de subconjuntos (la eliminación de distintos sub-

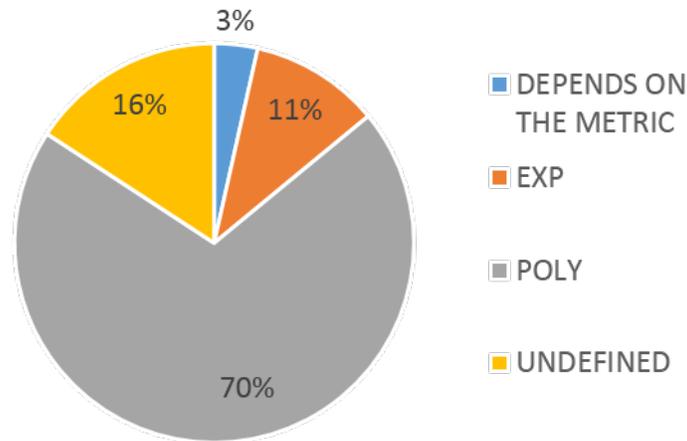


Figura 9.15: Frecuencia de los costos computacionales por métrica.

conjuntos de la misma cardinalidad puede tener efectos drásticamente distintos en la estructura del grafo dependiendo de cuales vértices son eliminados). La eliminación aleatoria es considerada como modelo de fallas, mientras que la eliminación en el peor caso es considerada como modelo de un ataque. La métrica *connectivity robustness function* (*POLY*, [*Con*, *D*]) [121] es calculada eliminando (al azar)  $k \in [0, n]$  vértices del grafo de entrada y calculando el orden de componente conectada más grande para cada  $k$ , normalizada por  $n - k$  de manera que los valores resultantes estén dentro de  $[0, 1]$ .

La conectividad y el balance de carga en los sistemas interconectados sometidos a eliminaciones de vértices o aristas han sido ampliamente estudiados [13, 97, 7]. El modelo matemático del fenómeno está relacionado con la percolación [69].

Adicionalmente, sólo hablando sobre conectividad en términos de la existencia de caminos, se han propuesto métricas relacionadas con un servicio: un grafo orientado al servicio  $S$  es autosuficiente (inglés: *self-sufficient*), con respecto a los requerimientos del servicio, si cada servicio requerido por  $v \in V_S$  puede ser suministrado por  $w \in V_S$ . Un grafo  $G$  se le dice resiliente ante  $k$  fallas (inglés: *k-failure resilient*) en términos de los vértices si un subconjunto arbitrario de  $k$  o menos vértices de  $G$  pueden fallar y aun así el subgrafo resultante es autosuficiente. Con estas definiciones, en [88] se propone una métrica llamada *node resilience* (*EXP*, [*Con*]) como el  $k$  más grande para el cual la red es resiliente a  $k$  fallas. La métrica propuesta también puede extenderse a aristas: *edge resilience* como el entero  $k$  más grande tal que el grafo es resiliente ante  $k$  fallas de enlaces, lo que significa que el grafo resultante es autosuficiente ante la pérdida de  $k$  o menos enlaces arbitrarios.

Una métrica definida por eliminación de subconjuntos de vértices de cardinalidad  $k$ , es *k-resilience factor* (*EXP*, [*Con*]) [91], la se construye mediante el porcentaje de grafos inducidos conectados, resultantes de la eliminación de  $k - 1$  vértices de todos los posibles (conectados y desconectados) grafos inducidos. Promediando esto por  $\forall k \in [2, n - 1]$  obtenemos *resilience factor*. Notar que el número de

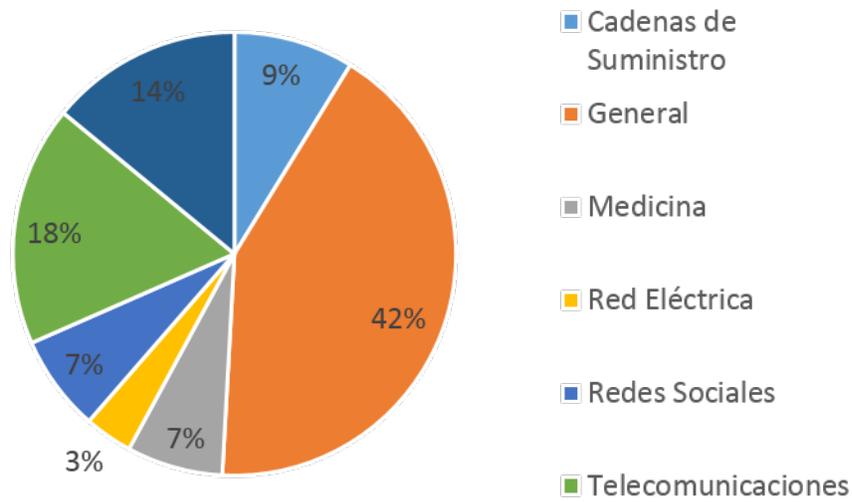


Figura 9.16: Frecuencia de los temas aplicados por métrica.

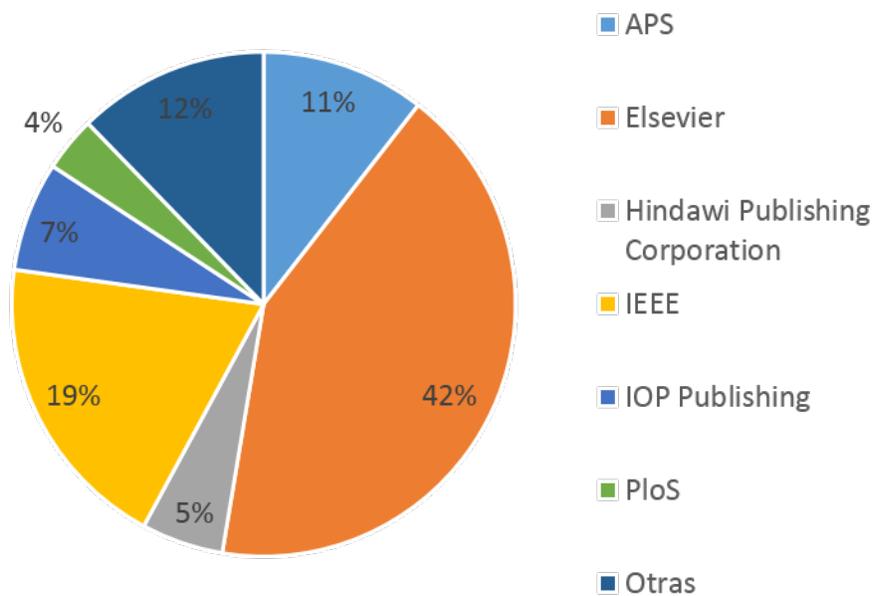


Figura 9.17: Frecuencia de los editoriales por métrica.

posibles subgrafos para un grafo tiene un comportamiento asintótico exponencial<sup>5</sup>, por lo que el cálculo

<sup>5</sup>Los posibles subconjuntos de  $n - k$  vértices es el coeficiente binomial para  $n$  y  $k$ , el cual varía desde  $k \in [0, n]$  sumando  $2^n$ , y por ende para el rango propuesto, la suma es  $2^n - 2n - 1 \in \mathcal{O}(2^n)$ .

es computacionalmente demandante incluso para grafos de orden moderado.

Si generalizamos la eliminación de vértices a perturbaciones arbitrarias de la estructura del grafo, el cálculo puede ser formulado como la diferencia entre el orden del componente conectado más grande del grafo original con el grafo perturbado, llamada *perturbation score* por [81] (*POLY*, [*Con*]). La robustez de diferentes grafos puede ser comparada entre sí aplicando una perturbación similar a ambos y calculando la diferencia de *perturbation score* obtenida. Dados dos grafos como input, ellos definen *preferential perturbation score* (*POLY*, [*Con*]) como aquella diferencia. Luego definen *maximum perturbation score* como el valor que es el máximo de *preferential perturbation score*, alcanzado por la perturbación que maximiza el daño en el primer grafo y minimiza el daño en el segundo.

Otro método que toma en cuenta todos los vértices en vez de solo los que pertenecen al componente conectado más grande es *pairwise disconnectivity index* [78] (*POLY*, [*Con*]), el cual es calculado en términos de los pares de vértices que están conectados en el grafo original  $\mathcal{P}(V)$ : *pairwise disconnectivity index* de un vértice  $v$  es el número de pares de vértices que siguen conectados luego de remover  $v$  del grafo  $\mathcal{P}(V \setminus \{v\})$ . Este método puede ser naturalmente generalizado para la eliminación de conjunto de vértices en vez de uno solo.

En [94] se propone la siguiente métrica, llamada *unique robustness measure* (*POLY*, [*Con*]), para los ataques basados en grados donde los vértices son eliminados de mayor a menor grado (con o sin recalculación de los grados después de la eliminación de los vértices) y después de cada eliminación, se calcula el orden del componente conectado más grande  $C_t$ . La suma de  $C_t$  sobre  $t = 1, \dots, n$  es luego normalizada por  $n$  y usada como una métrica de robustez.

#### Métricas basadas en caminos

Una forma común para caracterizar la estructura de un grafo es calculando las distancias de todos los pares de vértices. La eficiencia de  $u, v \in V$ ,  $u \neq v$ , es  $\epsilon_{u,v} = 1/D(u, v)$ ; en [53] miden la tolerancia a fallas en términos de la eficiencia local. Luego en [121] definen *efficiency function* (*POLY*, [*Con*, *D*]) como el promedio de la eficiencia para todos los pares de nodos normalizado por la cantidad de pares de nodos del grafo.

Otra forma muy popular de medir basándose en caminos es la centralidad (inglés: *betweenness*) que refiere al número de caminos más cortos que atraviesan una arista (o vértice) ponderado de tal forma que si vértices  $v$  y  $u$  se conectan con  $k$  caminos de largo mínimo, cada uno de ellos cuenta como  $1/k$  en la centralidad [68]; también se puede estimar con caminatas aleatorias [67]. Posteriormente en [92] se define *relative betweenness* (*POLY*, [*Cen*]), obtenida normalizando la centralidad de un vértice por la suma de todos los valores de centralidad de todos los vértices del grafo. Luego, se calcula *betweenness interference* (*POLY*, [*Cen*]) como la diferencia de *relative betweenness* de un vértice  $v$  antes y después de la eliminación de otro vértice  $w$ .

En [93] proponen una métrica llamada *temporal efficiency* (*POLY*, [*D*]), definida en términos de cómo la eficiencia (anteriormente definida) de un grafo se degrada (como un porcentaje de la eficiencia original) después de algún daño hecho (como la eliminación de un vértice o arista, o bajando el nivel de funcionalidad de un vértice o arista, si el grafo modela algún sistema en que los elementos pueden estar parcialmente operativos).

El autor en [76] denota el estado de percolación de un nodo  $i$  en un tiempo  $t$  como  $x_i^t$ . Cuando

el contexto temporal esta claro, simplemente usamos  $x_i$ . Específicamente,  $x_i^t = 0$  indica un estado no percolado y  $x_i^t = 1$  indica un estado completamente percolado, mientras que un estado parcialmente percolado corresponde a  $0 < x_i^t < 1$ .

La fracción

$$w_{s,v}^t = \frac{x_s^t}{[\sum x_i^t] - x_v^t} \quad (9.1)$$

muestra que tanto del estado de percolación total es el estado del nodo  $s$  excluyendo  $v$ . En [76] se define un camino percolado como el camino más corto de  $v \in V$  a  $w \in V$  tal que  $v$  esta infectado, y luego define *percolation centrality* (*POLY*, [*P*, *Cen*]) como la proporción de caminos percolados que pasan a través él sobre todos los caminos (percolados o no):

$$PC^t(v) = \frac{1}{N-2} \sum_{s \neq v \neq r} \frac{\sigma_{s,r}(v)}{\sigma_{s,r}} \frac{x_s^t}{[\sum x_i^t] - x_v^t} \quad (9.2)$$

$$PC^t(v) = \frac{1}{N-2} \sum_{s \neq v \neq r} \frac{\sigma_{s,r}(v)}{\sigma_{s,r}} w_{s,v}^t \quad (9.3)$$

Si cada nodo tiene el mismo nivel de percolación  $> 0$ ,  $w_{s,v}^t$  equivale a  $\frac{1}{N-1}$ , luego  $PC^t(v) = BC(v)$ , donde  $BC(v)$  es la centralidad de ese nodo.

Otra métrica relacionada con caminos, es *global functionality loss* (*POLY*, [*D*]), definida por [125] en términos de la funcionalidad de un nodo ante un ataque  $I$  (el cual remueve un nodo  $w$ ):

$$F_I(v) = F_{I-1}(v) - \frac{1}{D(v,w)2d(v)} F_{I-1}(v). \quad (9.4)$$

Donde  $D(v,w)$  y  $d(v)$  corresponden a la distancia y el grado después del ataque  $I-1$ . Esta definición se construye fijando todas las funcionalidades iniciales como funcionalidades no afectadas, es decir  $F_0(v) = 1, \forall v \in V$ . Usando esta funcionalidad y asumiendo que en cada ataque se elimina un vértice, se define la pérdida de la funcionalidad como la suma de las diferencias de la funcionalidades de un nodo antes y después del ataque para cada ataque sobre esta secuencia de  $k$  ataques (esto también permite extender para la eliminación de enlaces en vez de nodos):

$$FL(v) = \sum_{I=1}^k F_{I-1}(v) - F_I(v). \quad (9.5)$$

Así posteriormente *global functionality loss* (*FLN*) se obtiene con la siguiente fórmula:

$$FLN = \sum_{v, v \neq w_I}^N FL(v) \quad (9.6)$$

Donde  $w_I$  corresponde al nodo eliminado por el ataque  $I$ .

## Aplicaciones

### Transporte

Cuando el sistema bajo estudio transporta algo (bien puede ser algo físico o tráfico de redes), no es suficiente modelar y caracterizar la estructura del sistema sino también las dinámicas de carga que necesitan ser tomadas en cuenta por sí mismas.

En una topología de rutas activas, se sobreponen las decisiones de ruteo con la topología de la red en sí. La forma en que se dirige el tráfico sobre las rutas disponibles es, en esencia, un problema de optimización multicriterio [109, 8]. Lo mismo aplica al tráfico vehicular en problemas como control de semáforos, recomendación de rutas y vehículos autónomos.

En las redes de transporte, los enlaces representan las relaciones (caminos, segmentos de ferrocarril, vuelos, etc.), y cada uno posee un peso asociado llamado el tiempo de viaje (esto puede ser determinístico o estocástico, dependiendo del modelo), y la cantidad de tráfico en un enlace es llamada flujo sobre tal enlace. Cuando los flujos son conocidos, *vehicle-hours of travel* (VHT) (horas-vehículo de viaje) puede ser calculado como la suma ponderada de los flujos sobre los enlaces, usando los tiempos de viaje como pesos, en equilibrio<sup>6</sup>.

Ahora, si un enlace es agregado o eliminado, el VHT cambiará y la magnitud de tal cambio puede ser usada como métrica para el impacto de tal enlace. Notar que eliminar un enlace no solo afecta el flujo en el mismo si no que también puede forzar cambios de flujo en otros enlaces a fin de que un equilibrio sea alcanzado. En [71] se propone una métrica llamada *network trip robustness* (*POLY*, [*D*]), calculada como la suma de cambios de VHT sobre todos los enlaces, normalizada por la demanda total del grafo.

Otra métrica aplicada en este contexto utiliza los conceptos de distribución de grado y su entropía relativa. La entropía es una medida de incertidumbre de variables aleatorias y también es una medida de cantidad de información requerida para describir una variable aleatoria en un sentido común.

La entropía relativa (o distancia Kullback-Leibler) es una medida de distancia entre dos distribuciones aleatorias. En estadística, corresponde al logaritmo de la esperanza de los ratios de probabilidad. Toma dos funciones de densidad de probabilidad  $p(x)$  y  $q(x)$ , y se define como sigue:

$$RE\left(\frac{p}{q}\right) = \sum_{x \in A} p(x) \log\left(\frac{p(x)}{q(x)}\right) \quad (9.7)$$

Típicamente,  $p(x)$  representa la distribución verdadera, mientras que  $q(x)$  representa la distribución teórica. En [34] se propone que  $p(x)$  sea considerada como la distribución de grado de la red de ferrocarril a estudiar, y  $q(x)$  sea tratada como la red de ferrocarril con una distribución completamente desordenada.

Luego, usando la entropía relativa para medir la robustez, se define  $q(x)$  como una distribución de grado uniforme  $1/N$  (red desordenada), y  $p(x)$  como la verdadera distribución de grado. Así la ecuación 9.7, la cual define *relative entropy* (*ND*, [*Deg*]) se vuelve:

<sup>6</sup>Una red de transporte está en equilibrio cuando no es posible para ninguno de sus usuarios reducir sus tiempos de viajes con un cambio unilateral de ruta (*confer a game-theoretical equilibrium* [117]).

$$RE(p) = \sum_{x \in V} p(x) \log(Np(x)) \quad (9.8)$$

En las redes de tráfico aéreo, bajo el contexto de el problema de máximo flujo<sup>7</sup>, se define en [75] la métrica *relative area index* ( $ND$ , [ $Cen$ ]) de un nodo en función de su parámetro de degradación  $u$  y el flujo máximo del nodo  $F_{max}^v(u)$ . El parámetro de degradación representa la reducción de la capacidad de vuelo de algún nodo en específico. Se consideran dos tipos de degradación: (1) basadas en porcentaje; (2) basadas en valor absoluto. La basada en porcentaje varía entre 0 % y 100 % reducción de la capacidad del nodo. Mientras que la absoluta varía entre 0 y algún valor predeterminado  $\alpha$  (medida en vuelos por hora). Así asumiendo que  $F_{max}^v(u)$  es monotónicamente decreciente:

$$RAI(v) = \frac{\int_{u_0}^{u_T} w(u)(F_{max}^v(u_0) - F_{max}^v(u))du}{\int_{u_0}^{u_T} w(u)F_{max}^v(u_0)du} \quad (9.9)$$

Donde  $u_0$  y  $u_T$  son los valores mínimos y máximos permitidos para el parámetro de degradación, es decir  $[0, 1]$  y  $[0, \alpha]$  respectivamente para el valor en porcentaje y en absoluto. Notar que dos funciones de flujos distintas pueden poseer la misma área. El valor  $w(u)$  corresponde al parámetro de peso que se le asigna para distinguir estas funciones, asignando diferentes prioridades a los diferentes rangos de reducción de capacidad, dependiendo del tipo del nodo de interés, su naturaleza y capacidad de reducción y escenarios de aplicación. La intuición detrás de esta métrica es darle más importancia al nodo si éste se degrada más rápido “en promedio” (ya que no es una suma, sino una integral), donde el denominador corresponde a una normalización del valor para comparar diferentes nodos.

### Red eléctrica

Las redes eléctricas son indispensables hoy en día. Existe una gran dependencia en los países desarrollados con la energía eléctrica y por ende es importante contar con una red que sea confiable y disponible todo el tiempo. Los apagones pueden ser muy dañinos y paralizar la industria de casi cualquier índole. Otras investigaciones indican que los apagones son normalmente causados por fallas sucesivas de una gran porción de componentes desencadenadas por una perturbación inicial (por ejemplo, rayos, desastres naturales, contacto con las vegetaciones o error humano).

Avances recientes en las redes complejas muestran un potencial prometedor para evitar estas fallas, detectando, evaluando y mejorando la robustez del sistema.

Bajo este contexto, en [50] se propone la métrica *network robustness metric* ( $POLY$ , [ $Deg$ ]) que corresponde a la suma de la significancia y robustez nodal de cada nodo.

La robustez nodal se refiere, dado un nodo, a la suma de los valores del flujo normalizado (medido en Watts ( $W$ )) de cada enlace conectado a ese nodo, ponderado por el logaritmo de este flujo normalizado junto con su parámetro de tolerancia  $\alpha_i$ , es decir,

<sup>7</sup>El problema de máximo flujo involucra la búsqueda de un flujo factible a través de una red de flujo de una sola fuente y un solo sumidero tal que es máxima [96].

$$R_{v,i} = - \sum_{i=1}^{L_v} \alpha_i p_i \log(p_i) \quad (9.10)$$

Donde  $L_v$  es el tamaño del conjunto de enlaces conectados al nodo  $v$ . El signo menos – es usado para compensar el valor negativo que ocurre por el logaritmo de los valores de flujo normalizados,

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^E f_j}, \quad (9.11)$$

(Los logaritmos en  $(0, 1)$  corresponden a valores negativos). El parámetro de tolerancia de un enlace es simplemente el inverso del nivel de carga de un enlace arbitrario  $i$ , el cual es la proporción entre la carga y la capacidad máxima de aquel enlace. La carga es frecuentemente medida como la centralidad del aquel enlace y la capacidad medida como el máximo flujo de energía que puede pasar por el enlace.

La significancia nodal es la potencia distribuida por el nodo, normalizada por la suma de todas las potencias de todos los nodos.

Otra medida de robustez, esta vez global, propuesta en [51], es *effective graph resistance (POLY, [Con])*, que corresponde a la suma de todas las resistencias efectivas entre todos los pares de nodos de la red. La resistencia efectiva es una medida de “distancia de camino eléctrico” entre dos nodos. Utiliza la matriz Laplaciana  $\mathcal{L}$ , específicamente, en grafos ponderados:

$$\mathcal{L}_{ij} = \begin{cases} d(i), & \text{si } i = j \\ -w_{ij}, & \text{si } i \neq j \text{ e } (i, j) \in E \\ 0, & \text{si no.} \end{cases} \quad (9.12)$$

Donde  $w_{ij}$  es la ponderación del enlace  $(i, j)$ . Así, la resistencia efectiva del enlace  $(i, j)$  es medida como:

$$R_{ij} = \mathcal{L}_{ii}^+ - 2\mathcal{L}_{ij}^+ + \mathcal{L}_{jj}^+ \quad (9.13)$$

Donde  $M^+$  el pseudo-inverso de Moore-Penrose de la matriz  $M^8$ .

#### Telecomunicaciones

La comunicación a través de sistemas electromagnéticos puede ser fácilmente modelada a través de las redes complejas y, naturalmente medir su robustez asegura que aquella comunicación sea segura y confiable. Internet es un gran ejemplo, por ser casi imprescindible hoy en día. Crear una red resiliente nos permite comunicarnos en caso de desastres o peligros, lo que permite una clara y rápida respuesta ante aquellos problemas.

Una forma de modelar el comportamiento de un usuario de Internet es con caminatas aleatorias. Un usuario ubicado en un sitio, correspondiente a un nodo  $s$  en la red, navega impredeciblemente entre los

<sup>8</sup>Corresponde a una generalización del inverso de una matriz [30].

enlaces de las páginas hasta finalizar su “viaje” en su destino final  $d$ . Las páginas las cuales visitó, y, los enlaces por los cuales se dirigió corresponden a un camino sobre la red subyacente.

Así, para cuantificar qué tanto cambia la capacidad de la red ante la eliminación de un nodo, en [108] definen *node criticality* (*POLY*, [*Cen*]). Ésta corresponde a la centralidad basada en caminos aleatorios del nodo ponderada por su peso. La centralidad basada en caminos aleatorios (inglés: *random-walk betweenness*)  $b_{sk}(d)$  de un nodo  $k$  dados un par origen—destino  $(s, d)$ , se refiere al número esperado de veces que una caminata aleatoria pasa por  $k$  en su viaje desde el origen  $s$  al destino  $d$ . La centralidad total del nodo  $k$  es la suma de esta cantidad para todos los pares  $(s, d)$  posibles. Naturalmente, el autor extiende esta definición para los enlaces también.

Luego, usando esta métrica, el autor crea una métrica global de robustez *network criticality* (*POLY*, [*Cen*]), que simplemente es la suma de *node criticality* de cada nodo.

Otra opción estudiada para modelar robustez en redes de telecomunicaciones, corresponde al flujo de datos. Un flujo de datos (de ahora en adelante simplemente llamada flujo) es una asociación de datos entre un par de nodos que puede ser distribuido sobre uno o más caminos. Un flujo es considerado confiable si al menos un camino sigue conectado durante una falla (interrupción o eliminación de algún nodo o enlace de la red). Así nace la robustez de los flujos, que simplemente, es la cantidad de flujos confiables dividida por la cantidad total de flujos de la red.

Luego en [19] definen *aggregated remaining flow* (*POLY*, [*Con*]) como el promedio de la robustez de flujos de la red, después de cada ataque (eliminación de un nodo), dentro de un conjunto de ataques predefinido. El autor extiende esta métrica para comparar diferentes grafos, llamada *normalized aggregated remaining flow* (*POLY*, [*Con*]), normalizando por la cantidad de enlaces del grafo.

En el mismo estudio, también se utiliza la diversidad de caminos [101] que toma como medida el camino óptimo  $P_0$  y otro camino  $P$  y calcula:

$$D(P) = 1 - \frac{|P \cap P_0|}{|P_0|} \quad (9.14)$$

Donde los conjuntos se pueden manejar a base de vértices o aristas.

Usando la diversidad de caminos, se puede extender el análisis para un conjunto de caminos, diversidad de caminos efectiva, definido como la utilidad (ponderada) de un conjunto caminos alternativos simples:

$$EGPD = 1 - e^{-\lambda k_{sd}} \quad (9.15)$$

Donde  $\lambda$  es una constante de peso para la utilizada de cada camino adicional añadido y  $k_{sd}$  es la suma de las diversidades de cada camino:

$$k_{sd} = \sum_{i=1}^m D(P_i) \quad (9.16)$$

Así, para todos los caminos se define la diversidad de caminos total como el promedio de los diversidades de caminos efectiva para cada par de nodos del grafo.

En el mismo estudio [19], se redefine la diversidad de caminos como *geographical path diversity* (*POLY*, [*Con*])  $D(P_a)$ , como la distancia geográfica mínima  $D \geq d$  entre cualquiera de los nodos del camino  $P_a$  con los del camino más corto (excluyendo los nodos de origen y destino).

Naturalmente, extienden todas las definiciones anteriores en el sentido geográfico, esto es, diversidad de caminos efectiva a *effective geographical path diversity* (*POLY*, [*Con*]) y diversidad de caminos total a *total graph geographical diversity* (*POLY*, [*Con*]). Finalmente se puede calcular el *compensated total geographical graph diversity* (*POLY*, [*Con*]) para comparar un grafo  $G$  con el más grande grafo  $M$  (en cantidad de enlaces) dada la topología en consideración:

$$cTGGD = e^{TGGD-1} \left( \frac{|E(M)|}{|E(G)|} \right)^{-\rho} \quad (9.17)$$

Donde  $\rho$  es una constante experimentalmente elegida (y para términos prácticos puede omitirse).

#### Gestión de cadenas de suministro

Cuando el sistema consiste en la producción, transporte y consumo de algún elemento podemos hablar de redes de suministro. Una red de suministro usualmente consiste en productores, nodos de suministro que desarrollan un bien, y consumidores, nodos de demanda que requieren de tal bien para que el sistema sea factible.

Un caso especial de *connectivity robustness function*, para el caso de las redes de suministro, se aplica redefiniendo el componente conectado como uno donde no sólo la conectividad es requerida, sino también requiere que al menos un nodo de suministro debe estar presente en cada componente (aquellos componentes sin nodos de suministro son ignorados en el cálculo), esto es llamado *network connectivity* en [132] (*POLY*, [*Con*, *D*]). Es decir, se define como el tamaño del componente más grande que posea un nodo de suministro.

Bajo el mismo contexto, el autor también define *supply availability* (*POLY*, [*Con*, *D*]), que corresponde al porcentaje de nodos de demanda que tienen acceso (es decir, que existe un camino) a, al menos, un nodo de suministro.

Usando nuevamente el concepto de eficiencia, el autor plantea dos métricas más *best delivery efficiency* (*POLY*, [*Con*, *D*]) y *average delivery efficiency* (*POLY*, [*Con*, *D*]). La primera corresponde al recíproco del promedio, para cada nodo de demanda, de el camino más corto hacia algún nodo de suministro. La segunda corresponde al promedio de las eficiencias promedio hacia cada nodo de demanda (donde cada camino posee hacia un nodos de suministro posee una ponderación  $f(u)$ ). Específicamente, para cada nodo la eficiencia promedio corresponde:

$$ADE(v) = \sum_{u=1}^{|K(v)|} (\epsilon_{u,v})^{1/f(u)} \quad (9.18)$$

donde  $\epsilon_{u,v}$  corresponde a la eficiencia entre el nodo  $u$  y  $v$ . La función  $f(u)$  puede ser omitida y describe la importancia de cada camino hacia el nodo de suministro  $u$ . Así, se calcula el promedio y posteriormente se normaliza y obtenemos:

$$ADE(G) = \frac{1}{|V_D|} \sum_v^{|V_D|} ADE(v) \quad (9.19)$$

Adicionalmente, con el modelo de cadenas de suministro, se puede diferenciar la cantidad del producto recibido en cuestión o también un nodo de demanda puede recibir cantidades independientemente diferentes de suministro de cada nodo que lo proporcione. Una métrica que utiliza esta idea, llamada *supply chain index (POLY, [Cen])*, fue propuesta en [77] y diseñada para señalar la importancia de cada nodo. Primero, se calcula  $s_{ji}$  que representa la proporción del producto total recibido por el nodo  $j$  del nodo de suministro  $i$  relativo al total de producto recibido (y quizás eventualmente transferido) por  $j$ . Esto cumple con que para un nodo cualquiera  $j$ ,  $\sum_i s_{ji} = 1$ . Luego, una segunda variable,  $p_j$ , mide la proporción del producto total de la cadena de suministro para un nodo  $j$ . La métrica para cada elemento  $j$  se define de la siguiente manera:

$$SCI_j = \sum_{i=1}^n s_{ji} p_j^2 \quad (9.20)$$

### Biología y medicina

En la biología existen diversos métodos para estudiar los fenómenos químicos e interacciones. La teoría de grafos es ampliamente usada para caracterizar diversas relaciones entre distintos elementos biológicos. Por ejemplo, las múltiples reacciones químicas pueden ser modeladas por un grafo, donde cada nodo puede ser un compuesto químico (como una proteína) y cada enlace una reacción química. Medir la robustez en este contexto puede indicar que una proteína puede ser vital en una cadena de reacciones como puede no serlo, o bien puede indicar qué tan frágil es esta cadena de reacciones ante la privación de alguna enzima. Estas redes suelen ser extensas y un gran número de ellas tienden a seguir distribuciones de grado con leyes de potencia.

Una métrica que se usa en un contexto similar corresponde a *resilience score* la cual se divide en dos estrategias *random resilience score (ND, [Con])* y *targeted resilience score (ND, [Con])* propuestas en [104]. Cada nodo del grafo representa un metabolito<sup>9</sup> y cada enlace representa una reacción química entre metabolitos. Las métricas propuestas corresponden a la proporción de número de metabolitos a remover (al azar para *random* y siguiendo alguna regla de ataque para *targeted*) hasta que la ley de potencia (de la distribución de grado) se rompa, sobre la cantidad total de metabolitos.

A veces, en vez de proteger una red queremos destruirla, pero además, como exigencia adicional se requiere preservar otra red. Tal es el caso de las redes de células de cáncer, donde el objetivo es causar el mayor daño a las células malignas mientras que se trata de minimizar el daño en aquellas benignas. Usando el concepto de perturbación, el mismo autor [81] define *average perturbation gradient (POLY, [Con])*, que corresponde al *maximum perturbation score* dividido por la proporción de el número de vértices eliminados sobre el total. Es decir,

$$APG(G_1, G_2) = \left( \frac{PS(G_1, G_2)}{N_{rm}/N} \right)_{max} \quad (9.21)$$

<sup>9</sup>Cualquier sustancia producida durante el metabolismo (digestión u otros procesos químicos corporales).

La noción de esta definición no es solo maximizar el daño en una red y minimizar el daño en otra, sino que también queremos minimizar la cantidad de nodos totales eliminados.

#### Redes sociales

Algunas redes son construidas para modelar fenómenos sociales. Un ejemplo muy usado son las relaciones de artículos académicos, donde cada autor es un nodo y cada enlace es creado cuando es citado o cita a otro autor. En general, en estas redes cualquier tipo de interacción humana puede ser considerada como enlace. Medir la robustez en estas redes puede usarse para evaluar la fortaleza de una comunidad en sí o bien la importancia de algún individuo en ella.

Una métrica para medir la importancia de aquellos enlaces es *bridgeness* (*EXP*, [*Con*]) [18], que corresponde simplemente a la media geométrica<sup>10</sup> entre el tamaño de ambos cliques máximos<sup>11</sup>, los cuales incluyen el nodo de origen y destino del enlace a medir, dividida por el tamaño del clique máximo que contenga el enlace.

Otra métrica utilizada para medir la robustez en redes sociales corresponde a *fragmentation* (*POLY*, [*Con*]) [16], definida como la proporción de pares de nodos que fueron desconectados luego de la eliminación de una fracción de nodos  $q$  del total, sobre número total de nodos de la red original.

Usando las métricas de centralidad en [24] se propone *sensitivity* (*DEPENDS*, [*Deg*, *Cen*]). Dadas  $n$  variables,  $t_1, \dots, t_n$ , representando el grado de cada nodo, y dada una función de centralidad  $C$ , tal que  $C(t_1)$  es la centralidad para el nodo 1 y así, *sensitivity* del nodo  $i$  con respecto al nodo  $j$ , es el  $j$ -ésimo valor del vector de la derivada parcial con respecto a la variable  $j$ -ésima de la función  $C$ .

Existen casos extremos en que el grafo resultante es tan grande que las métricas convencionales no pueden ser calculadas en un tiempo razonable. Para lidiar con esto, en [62] se propone *generalized robustness index* (*POLY*, [*Cen*]), usada para aproximar el valor de otra métrica de interés llamada *normalized subgraph centrality*. Para cada nodo  $i$  en el grafo, dado un par valor propio y vector propio<sup>12</sup>  $(\lambda_i, u_i)$ ,  $NSC$  se puede aproximar como:

$$NSC_k(i) = \sum_{j=1}^k u_{ij}^2 \sinh(\lambda_j), \forall i \in V \quad (9.22)$$

Donde  $k$  es el número de valores propios que contribuirán a la aproximación de  $NSC$ . Basados en esta definición *generalized robustness index* de un grafo se define como

$$r_k = \left( \frac{1}{|V|} \sum_{i=1}^{|V|} \left\{ \log(u_{i1}) - \left( \log(\sinh^{-1/2}(\lambda_1)) + \frac{1}{2} \log(NSC_k(i)) \right) \right\}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9.23)$$

#### Redes complejas generales

<sup>10</sup>La raíz  $n$ -ésima del producto de todos los números.

<sup>11</sup>Un clique es un conjunto de vértices  $V$ , tal que el subgrafo inducido por  $V$  es un grafo completo. Un clique máximo es aquel conjunto más grande que satisfaga alguna condición.

<sup>12</sup>Los vectores propios de una matriz son los vectores no nulos que, cuando son transformados por el operador, dan lugar a un múltiplo escalar de sí mismos, con lo que no cambian su dirección. Aquel múltiplo escalar recibe el nombre de valor propio de la matriz.

Existen métricas que, en el contexto donde fueron propuestas, no fueron aplicadas a temas específicos. Sin embargo, aquellas poseen valor científico porque se tratan de describir fenómenos abstractos que ocurren en las redes complejas y sus diversos modelos.

En la matemática existe la teoría espectral de grafos, que consiste en el estudio de las propiedades de un grafo en relación con el polinomio característico<sup>13</sup>, valores propios y vectores propios asociados al grafo, tanto como de la matriz de adyacencia como la Laplaciana.

Una métrica clásica, y muy estudiada, corresponde a la conectividad algebraica [35], que corresponde al segundo valor propio más pequeño de la matriz Laplaciana. Si bien la definición puede parecer arbitraria, existen muchas implicancias conocidas acerca de los valores propios de la matriz Laplaciana. Por ejemplo la cantidad valores propios equivalentes a 0, corresponde a la cantidad de componentes del grafo. Por ende, si la conectividad algebraica es mayor a 0, implica que el grafo está conectado.

Otra métrica popular es el índice de Estrada. Fue definido por Ernesto Estrada para medir el plegamiento de proteínas [33], corresponde a la suma de las funciones exponenciales de cada valor propio de la matriz de adyacencia. Específicamente:

$$EE(G) = \sum_n^{j=1} e^{\lambda_j} \quad (9.24)$$

Donde  $\lambda_j$  es el  $j$ -ésimo valor propio de la matriz de adyacencia del grafo.

Luego, una métrica que basada en el índice de Estrada, llamada *natural connectivity* (*POLY*, [*Sp*]) [118], consiste en el logaritmo natural de este índice dividido por el orden del grafo. Prontamente, en [122] se extiende a una versión local, llamada *local natural connectivity* (*POLY*, [*Sp*]), que consiste en la misma definición pero solo contando los nodos del componente conectado a medir.

Otra métrica relacionada con los valores propios fue definida en [57], llamada *reconstructability coefficient* (*ND*, [*Sp*]). Ésta se define a la cantidad de valores propios que pueden ser igualados a cero, tal que la matriz de adyacencia pueda ser exactamente reconstruida. Una reconstructabilidad alta refleja un grafo “geoméricamente simple”, que necesita pocas dimensiones ortogonales para ser descrito.

Las distribuciones de grado también pueden ser un método para evaluar la robustez de un grafo. Así se describe en [111], donde definen *entropy of the degree distribution* (*POLY*, [*Deg*]) como una métrica de robustez. Su cálculo, autoexplicativo, corresponde a calcular la entropía de la distribución de grados del grafo. Más entropía se traduce a más heterogeneidad, que significa mayor robustez. Notar que la entropía mínima 0 se consigue cuando todos los nodos están conectados a un nodo central singular, mientras que la entropía máxima  $\log(n - 1)$  se puede lograr con una distribución aleatoria uniforme.

Por otra parte, bajo el gran crecimiento de páginas web nace la necesidad de evaluar su importancia. Modelando la estructura de Internet usando teoría de grafos, llevó a uno de los fundadores de *Google*<sup>14</sup> a crear el indicador *pagerank* [11]. Este indicador determina la “importancia” de las páginas web basada en la “importancia” de sus páginas padres. Un algoritmo relacionado llamado *HITS* [49] también fue

<sup>13</sup>Polinomio que contiene una gran cantidad de información sobre la matriz, los más significativos son los valores propios, su determinante y su traza.

<sup>14</sup><https://google.com>

desarrollado por IBM<sup>15</sup>.

Con el mismo objetivo en [26] se definen dos métricas. La primera, *entropy rank* ( $ND$ , [ $Cen$ ,  $Sp$ ]) que se basa en que cada camino que realice un navegante es igual de probable que cualquier otro. Se define, para en nodo  $i$  (de un grafo acíclico fuertemente conectado) como la probabilidad  $u_i(v_i)$ , donde  $u(v)$  es el vector propio dominante<sup>16</sup> izquierdo<sup>17</sup> (derecho).

La segunda, *free energy rank* ( $ND$ , [ $Cen$ ,  $Sp$ ]), similar a la definición anterior, pero reemplazando la matriz de adyacencia por otra matriz  $B$  obtenida de la matriz de adyacencia reemplazando los valores en cero por  $e^\epsilon$ , con  $\epsilon > 0$ . Ésto es para extender la métrica a grafos que no sean necesariamente fuertemente conectados o acíclicos.

Volviendo a los temas de propagación de epidemias y percolación, existe un modelo de propagación llamado redes con epidemias susceptible-infectado-susceptible (SIS). Durante la propagación, un nodo puede estar en uno de los dos estados. Primero, un nodo infectado puede infectar vecinos susceptibles a un ritmo de infección  $\beta$ . Además puede curarse a sí mismo (y volver ser susceptible a infección) a un ritmo de curación  $\delta$ . Adicionalmente, la proporción entre  $\beta$  y  $\delta$  es llamada ritmo de infección efectiva  $\tau = \beta/\delta$ , y su recíproco  $s$  ritmo de curación efectiva. En [123] denotan el número de nodos infectados en un tiempo  $t$  como  $Y(t)$ . Si la población  $n$  es lo suficientemente grande, podemos convertir  $Y(t)$  a  $y(t) = Y(t)/N$ , lo que produce una cantidad continua que representa la fracción de nodos infectados. La métrica *virial conductance* ( $ND$ , [ $P$ ]) de una red  $G$  con respecto a la propagación de epidemias representa la fracción promedio de nodos infectados para todos los tipos de ataques epidémicos capaces de producir brotes en las redes. Se define como

$$VC = \int_0^\rho y_\infty(s) ds = \rho \bar{y}_\infty \quad (9.25)$$

Donde  $y_\infty$  es la función que satisface la evolución en el tiempo del epidemia SIS,  $\rho$  es el radio espectral (máximo valor propio) de la matriz de adyacencia de la red (además  $y_\infty(\rho) = 0$ ) y  $\bar{y}_\infty$  es el valor promedio de la fracción de nodos infectados para todo  $s$ , con  $0 \leq s \leq \rho$ .

En temas más generales de redes complejas se han desarrollado las siguientes métricas. Primero *node load* ( $POLY$ , [ $Deg$ ]) [112], métrica que mide la robustez de un nodo y corresponde al grado del nodo multiplicado por la suma de los grados de los nodos vecinos, todo elevado a un parámetro variable.

Cuando se pueden modelar las probabilidades de falla de los nodos, en [54], usando el concepto de eficiencia se propone *fragility* ( $POLY$ , [ $D$ ]), que corresponde al promedio de las delta eficiencias para cada nodo. La delta eficiencia de un nodo es la diferencia de los promedios de la eficiencia del grafo antes y después de remover ese nodo.

El mismo autor también propone *dynamic robustness metric* ( $POLY$ , [ $D$ ]), que es el promedio de las delta eficiencia para cada nodo, pero ponderado por la probabilidad de falla de cada nodo.

Relacionado con la centralidad en [120] se calcula *subgraph centrality* ( $ND$ , [ $Cen$ ]) de un nodo como

<sup>15</sup><https://www.ibm.com/>

<sup>16</sup>Aquel vector propio que posee el mayor valor propio relacionado.

<sup>17</sup>Vector fila que satisface la propiedad de un vector propio multiplicando a la matriz por la izquierda. La versión por la derecha, que usa un vector columna es la más usada.

la suma (a través de todos los largos de camino hacia infinito) de todas caminatas hacia todos los nodos de la red. Para evitar valores infinitos, el valor de la suma se divide por el factorial de largo del camino y luego se le aplica el logaritmo natural.

$$S_C = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{i=1}^n (A^k)_{ii} = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{i=1}^n \lambda_i^k \quad (9.26)$$

Usando series de Taylor<sup>18</sup>  $e^x = \sum_{k=0}^{\infty} x^k/k!$  y la ecuación 9.26

$$S_C = \ln \left( \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\lambda_i^k}{k!} \right) \approx \left( \sum_{i=1}^n \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\lambda_i^k}{k!} \right) = \left( \sum_{i=1}^n e^{\lambda_i} \right) \quad (9.27)$$

Una métrica simple definida en el contexto de ataque malicioso es *link robustness index* (*POLY*, [*Con*]) [124], se calcula como la fracción promedio de enlaces en el componente conectado más grande sobre el tamaño del grafo, después de  $1 \dots |E|$  eliminaciones de enlaces, consecuente de un ataque.

Similarmente, otra métrica propuesta en [106] llamada *random-robustness index* (*EXP*, [*Con*]) indica la suma (por cada ronda de ataques) de la suma de el tamaño del componente conectado más grande después de la eliminación de cada posible fracción de nodos dividida por el orden del grafo.

Particularmente, en [110] se desarrolla una métrica sin nombre, la cual llamaremos *robustness measure I* (*POLY*, [*Con*]), la cual corresponde, dado un entero  $n$ , al número de enlaces que deben ser eliminados de la red para obtener una red con  $n$  componentes, normalizada por el orden del grafo.

Otra métrica que se basa en conjunto de ataques es *community robustness* (*POLY*, [*Con*]) propuesta en [61], se calcula dados  $a$  ataques y  $k$  comunidades, el promedio sobre todos los ataques del promedio sobre todas las comunidades de todos los nodos restantes de la comunidad (déspués de el  $q$ -ésimo ataque) dividido en el número total de nodos en tal comunidad. Una comunidad es simplemente un conjunto predeterminado de nodos.

Por último, una métrica relacionada con el problema de cobertura de vértices<sup>19</sup> son propuestas en [90]. La primera, *covering degree* (*EXP*, [*Deg*]) medida a nivel de un vértice  $v$ , corresponde la cantidad de coberturas de vértices minimales que contienen aquel vértice  $v$ . La segunda *covering index*, también a nivel de un vértice  $v$ , se calcula como el número de coberturas de vértices mínimas que contienen al vértice  $v$  más la proporción de el número de coberturas de vértices minimales que contienen  $v$  sobre la cantidad de total de coberturas de vértices minimales en  $G$ .

<sup>18</sup>Una serie de Taylor es una aproximación de funciones mediante una serie de potencias o suma de potencias enteras de polinomios.

<sup>19</sup>Una cobertura de vértices para un grafo  $G$  es un conjunto de vértices  $V$  en los que cada arco de  $G$  incide al menos en un nodo de  $V$ . La cobertura de vértices minimal es aquella que no contiene otra cobertura de vértices. La cobertura de vértices mínima es la más pequeña de las coberturas de vértices.

### 9.3.4. Conclusiones

Los resultados del mapeo sistemático indican una auge en el desarrollo de las métricas en los últimos años y, lamentablemente la mayoría de las propuestas tienden a ser complejas y poco aplicables a grafos simples e intrínsecamente poco robustos. No se encontraron métricas que, por naturaleza, fuesen aplicables a modelos simples y frágiles (aquellos con conectividad igual a 1), ya que, probablemente, este caso no se ha considerado lo suficientemente interesante para aplicaciones reales.

Así también, en consecuencia, observando la topología posible y las restricciones de territorio, la mayoría de las métricas dan resultados poco favorables para el caso de estudio y se conjetura, con fuertes bases, que tampoco serán favorables para el grafo real de la red física chilena, debido a que ésta también presenta una topología similar (árboles con raíces conectadas con un poco de redundancia).

Por otro lado, sí existen métricas, un poco más básicas y antiguas, que logran capturar de algún modo estas vulnerabilidades. Un clásico ejemplo es *betweenness centrality* que logra capturar la importancia de un nodo (o arista) en términos de los caminos que pasan por él. También, tenemos la proporción de conjuntos de corte que desconectan el grafo, que describen claramente la conectividad del grafo en términos de sus enlaces (notar que una falla de un nodo se puede simular como la falla de sus enlaces). Lo negativo es que la métrica tiene un costo exponencial lo que desalienta su uso en grafos más grandes. Además, tenemos la centralidad de enlaces, que indica que tan importante son los enlaces en términos de la cantidad de caminos más cortos, pero no necesariamente indica robustez en términos de conectividad, ya que no toma en cuenta, ni la existencia ni el largo de, los caminos secundarios que puedan ser usar. Afortunadamente, sí existe una métrica, el impacto nodal de Wiener, que toma en cuenta los largos de los caminos (y su diferencia con el camino alternativo) y se puede usar para evaluar la robustez del grafo, suponiendo que es al menos 2-conexo.

Con respecto a la pregunta de investigación inicial, este trabajo de tesis logra reconocer y resumir la literatura científica a través de la última década, correspondiente al tema de las métricas de robustez en redes complejas. Adicionalmente, dado que el impacto de Wiener presenta correlaciones favorables con las otras métricas evaluadas, se concluye que esta métrica es útil para medir robustez en redes con escasa o nula redundancia. Por ende, esta métrica también amerita estudio adicional.

## 9.4. Revisión sistemática: modelamiento de redes interconectadas

*La presente revisión sistemática de literatura forma parte de la Tesis de Magister en Ciencia de la Computación de la alumna Ivana Bachmann, desarrollada en el contexto del proyecto CORFO 15BPE-47225 [3].*

En esta sección se presentará la revisión sistemática llevada a cabo sobre la literatura existente respecto a *frameworks* para el estudio de robustez de redes interdependientes. Para llevar a cabo esta revisión sistemática se utilizó el protocolo propuesto por Kitchenham en [48].

### 9.4.1. Método de investigación

#### Antecedentes y objetivos

Dada la problemática de analizar la robustez de redes interdependientes se desea responder la siguiente pregunta **¿Qué *frameworks* existen para estudiar la robustez de redes interdependientes?** Hasta donde tiene conocimiento la tesista este problema particular no ha sido abordado previamente en el marco de una revisión sistemática.

Esta revisión tiene como objetivos identificar y describir *frameworks* que estudien la robustez de redes *multilayer* y generar una caracterización detallada de estos *frameworks* en cuanto a los modelos, técnicas, métricas, entre otros.

#### Preguntas de investigación

A continuación se presentan la preguntas que se utilizaron durante la revisión sistemática para cada documento estudiado. Estas preguntas a su vez han sido desglosadas en subpreguntas para la realización de la revisión sistemática.

PI.1. ¿Qué aspectos de las redes estudia el *framework*?

PI.2. ¿Cómo es el modelo utilizado por el *framework*?

PI.3. ¿Cómo se validó el *framework*?

### Estrategia de obtención de datos

La búsqueda de estudios primarios fue realizada en los siguientes repositorios: ScienceDirect<sup>20</sup>, PLOS ONE<sup>21</sup>, Nature<sup>22</sup>, ACM digital library<sup>23</sup> e IEEE Xplore<sup>24</sup>. Estos repositorios fueron escogidos por estar entre los más relevantes dentro del área de ciencias de la computación y redes complejas.

A continuación se muestra la estructura para la búsqueda de *papers* dentro de los repositorios. Se utilizan los conectores lógicos **AND**, **OR** y **NOT** para mostrar la estructura de la búsqueda. Los puntos debajo de un conector corresponden a elementos o grupos de elementos separados por dicho conector.

- **AND**
  - **OR**
    - *percolation*
    - *robustness*
    - *resilience*
  - **OR**
    - *interdependent network(s)*
    - *multilayer network(s)*
    - *multi-layer network(s)*
    - *network of networks*
    - *cascading failure(s)*
  - **NOT**
    - *neural*

Esta consulta se puede resumir en la siguiente frase "buscar aquellos *papers* que hablen de robustez, de redes interdependientes y que no hablen de redes neuronales".

En la tabla 9.7 se pueden observar las consultas realizadas en cada repositorio salvo IEEE Xplore, cuyas consultas se encuentran en la tabla 9.8. En el caso del repositorio IEEE Xplore se tuvo que realizar 4 consultas diferentes pues la consulta tiene un máximo de 15 términos de búsqueda<sup>25</sup>, los papers obtenidos de este repositorio corresponden a la unión de los papers obtenidos por cada consulta.

### Criterios de selección de estudios

Para seleccionar qué *papers* estudiar en detalle se aplicaron los siguientes criterios de inclusión y exclusión sobre los *papers* obtenidos.

---

<sup>20</sup><http://www.sciencedirect.com/>

<sup>21</sup><http://journals.plos.org/plosone/>

<sup>22</sup><http://www.nature.com/>

<sup>23</sup><http://dl.acm.org/>

<sup>24</sup><http://ieeexplore.ieee.org>

<sup>25</sup>Ver <http://ieeexplore.ieee.org/search/advsearch.jsp?expression-builder>

Cuadro 9.7: Consultas realizadas en ScienceDirect, Plos ONE, ACM y Nature

Repositorio	Consulta
ScienceDirect	TITLE-ABSTR-KEY("network of networks" OR "cascading failure" OR "interdependent network" OR "multilayer network" OR "multi-layer network" OR "multi-layer networks" OR "multilayer networks" OR "interdependent networks") AND TITLE-ABSTR-KEY(percolation OR robustness OR resilience) AND NOT TITLE-ABSTR-KEY(neural)
Plos One	(abstract:"interdependent network" OR abstract:"interdependent networks" OR abstract:"multilayer network" OR abstract:"multilayer networks" OR abstract:"multi-layer network" OR abstract:"multi-layer networks" OR abstract:"cascading failure" OR abstract:"network of networks" OR title:"interdependent network" OR title:"interdependent networks" OR title:"multilayer network" OR title:"multilayer networks" OR title:"multi-layer network" OR title:"multi-layer networks" OR title:"cascading failure" OR title:"network of networks") AND (abstract:"percolation" OR abstract:"robustness" OR abstract:"resilience" OR title:"percolation" OR title:"robustness" OR title:"resilience") AND NOT (abstract:"neural" OR title:"neural")
ACM	acmdlTitle:(+(interdependent networkinterdependent networksmultilayer networkmultilayer networksmulti-layer networkmulti-layer networksnetwork of networkscascading failure") +(percolation robustness resilience) -neural) OR recordAbstract:(+(interdependent networkinterdependent networksmultilayer networkmultilayer networksmulti-layer networkmulti-layer networksnetwork of networkscascading failure") +(percolation robustness resilience) -neural)
Nature	(percolation OR robustness OR resilience) AND ("multilayer networks" OR "interdependent networks" OR "multi-layer networks" OR "multilayer network" OR "interdependent network" OR "multi-layer network" OR "network of networks" OR "cascading failure" OR "cascading failures")

Cuadro 9.8: Consultas realizadas en IEEE Xplore

Repositorio	Consulta
IEEE Xplore	(“Abstract”:percolation OR “Abstract”:robustness OR “Abstract”:resilience) AND (“Document Title”:.QT.interdependent network.QT. OR “Document Title”:.QT.multilayer networks.QT. OR “Document Title”:.QT.multi-layer networks.QT. OR “Document Title”:.QT.multi-layer network.QT. OR “Document Title”:.QT.multilayer network.QT. OR “Document Title”:.QT.interdependent networks.QT. OR “Document Title”:.QT.network of networks.QT. OR “Document Title”:.QT.cascading failure.QT.) AND NOT (“Document Title”:neural OR “Abstract”:neural)
	(“Abstract”:percolation OR “Abstract”:robustness OR “Abstract”:resilience) AND (“Abstract”:.QT.interdependent network.QT. OR “Abstract”:.QT.multilayer networks.QT. OR “Abstract”:.QT.multi-layer networks.QT. OR “Abstract”:.QT.multi-layer network.QT. OR “Abstract”:.QT.multilayer network.QT. OR “Abstract”:.QT.interdependent networks.QT. OR “Abstract”:.QT.network of networks.QT. OR “Abstract”:.QT.cascading failure.QT.) AND NOT (“Document Title”:neural OR “Abstract”:neural)
	(“Document Title”:percolation OR “Document Title”:robustness OR “Document Title”:resilience) AND (“Document Title”:.QT.interdependent network.QT. OR “Document Title”:.QT.multilayer networks.QT. OR “Document Title”:.QT.multi-layer networks.QT. OR “Document Title”:.QT.multi-layer network.QT. OR “Document Title”:.QT.multilayer network.QT. OR “Document Title”:.QT.interdependent networks.QT. OR “Document Title”:.QT.network of networks.QT. OR “Document Title”:.QT.cascading failure.QT.) AND NOT (“Document Title”:neural OR “Abstract”:neural)
	(“Document Title”:percolation OR “Document Title”:robustness OR “Document Title”:resilience) AND (“Abstract”:.QT.interdependent network.QT. OR “Abstract”:.QT.multilayer networks.QT. OR “Abstract”:.QT.multi-layer networks.QT. OR “Abstract”:.QT.multi-layer network.QT. OR “Abstract”:.QT.multilayer network.QT. OR “Abstract”:.QT.interdependent networks.QT. OR “Abstract”:.QT.network of networks.QT. OR “Abstract”:.QT.cascading failure.QT.) AND NOT (“Document Title”:neural OR “Abstract”:neural)

Cuadro 9.9: Número de *papers* según repositorio y etapa.

Repositorio	Cantidad de <i>papers</i> encontrados	Cantidad de <i>papers</i> luego de la primera revisión
ScienceDirect	90	22
Plos One	14	2
ACM	10	1
Nature	104	14
IEEE Xplore	74	18
<b>Total</b>	<b>292</b>	<b>57</b>

■ **Criterios de inclusión:**

- El *paper* está escrito en inglés
- El *paper* es un estudio primario (*journal* o *proceeding*)
- El *paper* fue publicado entre enero de 2005 y diciembre de 2016
- El *paper* habla sobre *frameworks* para estudiar la robustez en redes interdependientes
- El *paper* realiza conclusiones sobre el trabajo presentado

■ **Criterios de exclusión:**

- El *paper* no se encuentra disponible en línea
- El *paper* habla de redes neuronales
- El *paper* no es concluyente
- El *paper* no presenta un estudio con datos simulados o reales que utilice el framework presentado
- El *paper* es un *survey*

### Proceso de selección

Los *papers* estudiados fueron seleccionados por 3 investigadores (la tesista más 2 estudiantes) de acuerdo a los criterios de inclusión y exclusión. Cada uno de los investigadores debió leer tanto el título como el *abstract* de cada *paper* obtenido durante la primera etapa de recolección. Aquellos *papers* aceptados por la mayoría de los investigadores pasaron a la siguiente etapa de extracción y clasificación de datos, la cual fue llevada a cabo únicamente por la tesista. Como parte de la documentación se mantuvieron los motivos de rechazo en los casos correspondientes.

En la tabla 9.9 se muestra la cantidad de *papers* encontrados en cada repositorio en la etapa inicial y cuántos *papers* de cada uno quedaron luego de la primera revisión. Cabe destacar que no se encontraron repeticiones de *papers* entre los distintos repositorios.

### Evaluación de calidad

Para asegurar su calidad, las siguientes preguntas debieron ser respondidas positivamente por el *paper*.

- ¿El tema del *paper* es descrito apropiadamente?
- ¿El *framework* es descrito en detalle?
- ¿Es el modelo utilizado por el *framework* explicado apropiadamente?
- ¿El *paper* muestra conclusiones y resultados?
- ¿Los resultados mostrados por el *paper* son concretos y completos?

### Extracción de datos

De cada *paper* se extrajo el nombre, la fuente, el área principal, autores y su afiliación, las preguntas de investigación y el *abstract*. Esta extracción fue llevada a cabo por la tesista.

### Análisis de datos

Para realizar un análisis exhaustivo de los documentos los investigadores se guiaron por el desglose de las preguntas de investigación. El desglose de las preguntas se muestra en el cuadro 9.10. Las preguntas allí mostradas corresponden a las subpreguntas que se desprenden de las preguntas de investigación mostradas anteriormente.

#### *Resultados*

Luego de analizar la literatura quedaron 57 *papers* para ser revisados de manera exhaustiva. Sobre ellos se realizó un estudio del contenido específico de cada uno. Este estudio identificó y clasificó aspectos relevantes comunes dentro de los *frameworks* encontrados. La tabla 9.11 muestra una vista general de la clasificación, mientras que el detalle de cada aspecto es presentado en su correspondiente subsección.

La subsección 9.4.1 muestra la clasificación de los *frameworks* según el tipo de modelo que cada *framework* utiliza. La subsección 9.4.1 identifica el tipo de métricas utilizadas en cada *framework* para medir la robustez del sistema interdependiente. En la subsección 9.4.1 se muestran los principales estudios realizados por los *frameworks* de la literatura estudiada. Finalmente en la subsección 9.4.1 se muestra el tipo de redes sobre las que cada artículo testeó su *frameworks*.

#### *Modelo de redes interdependientes*

Cada *framework* supone el uso de un modelo de redes interdependientes en el cual se definen los tipos de interacciones entre nodos dentro de una misma red, los tipos de interacciones entre nodos de diferentes redes y los tipos de nodos que pueden haber. El modelo utilizado en un determinado *framework* indica el tipo de red que se desea analizar, dependiendo del caso el modelo puede ser aplicable a redes con comportamientos específicos o para redes en general. De acuerdo a los *papers* estudiados para efecto de este *survey*, se identificaron 8 clasificaciones de modelos: “tipo one-to-one” (29), “dependencias múltiples”

PI	Pregunta	Respuesta posible
PI.1.1	¿Qué estudios realiza el <i>framework</i> ?	Nombre del estudio
		Descripción del estudio
PI.1.2	¿Qué medida es utilizada para medir la robustez?	Nombre de la medida
		Interpretación de los valores que entrega la medida
PI.1.3	¿Qué parámetros de las redes mide el <i>framework</i> ?	Conjunto de parámetros utilizado por la medida
PI.1.4	¿Qué supuestos hace el <i>framework</i> ?	Lista de supuestos que hace el <i>framework</i>
PI.2.1	¿El <i>framework</i> propone un modelo o usa uno existente?	{ <i>propone un modelo, usa uno existente</i> }
PI.2.2	¿Cómo es el modelo estudiado?	Nombre del modelo
		Descripción del modelo
PI.2.3	¿El modelo describe arcos o nodos especiales?	{ <i>sí, no</i> }
		Tipo de nodos y su descripción
		Tipo de arcos y su descripción
PI.2.4	¿Cómo son las interacciones descritas por el modelo?	{ <i>dirigido, no dirigido, ambos</i> }
		Descripción de interacciones de los nodos dentro de una red
		Descripción de interacciones de los nodos fuera de una red
PI.3.1	¿Qué datos se utilizaron para obtener los resultados?	{ <i>simulados, reales, ambos</i> }

Cuadro 9.10: Desglose de las preguntas de investigación

Cuadro 9.11: Aspectos principales de los *frameworks* estudiados

Aspecto	Resumen
Modelo de redes independientes	Ocho clasificaciones: <b>“tipo one-to-one”</b> [12, 95, 82, 20, 85, 27, 37, 89, 14, 44, 115, 15, 113, 114, 58, 17, 126, 102, 25, 5, 1, 6, 56, 83, 38, 36, 103, 129, 59], <b>“dependencias múltiples”</b> [80, 79, 29, 87, 15, 70, 45, 55], <b>“red eléctrica acoplada”</b> [42, 72, 41, 63, 74, 39, 73], <b>“transmisión de carga entre redes”</b> [133, 127, 40, 116, 134, 119], <b>“mezcla de interacción intra/inter red”</b> [28, 130, 60, 31], <b>“mapeo”</b> [128, 2], <b>“cadena de suministro”</b> [105] y <b>“definido por probabilidades”</b> [84]
Tipo de métrica para medir robustez	Ocho clasificaciones: <b>“cantidad de elementos”</b> [95, 5, 70, 102, 45, 63, 87, 72, 28, 40, 15, 17, 55, 127, 20, 42, 41, 38, 31, 115, 134, 129, 59, 60, 130, 27, 36, 58, 116, 37, 14, 105, 119, 44, 113, 114, 1, 39, 128], <b>“punto de quiebre”</b> [12, 85, 83, 74, 25, 126, 29, 45, 102, 87, 6, 28, 20, 82, 114, 127, 42, 40, 37, 59, 31, 56], <b>“tiempo”</b> [128, 25, 5, 29, 20, 27, 2], <b>“probabilidad”</b> [12, 82, 89, 84], <b>“costo”</b> [80, 79, 128], <b>“largo de camino”</b> [133, 14, 103], <b>“ratio”</b> [1] y <b>“desempeño”</b> [73].
Estudios realizados	Siete clasificaciones principales: <b>“tamaño de la componente gigante”</b> [12, 126, 95, 5, 70, 45, 87, 102, 72, 28, 55, 40, 15, 17, 41, 127, 42, 20, 44, 115, 56, 134, 129, 59, 103, 60, 130, 27, 36, 37, 14, 105, 31], <b>“acoplamiento”</b> [85, 95, 5, 80, 25, 29, 113, 45, 63, 87, 72, 17, 40, 28, 55, 38, 127, 114, 44, 31, 115, 134, 129, 59, 103, 60, 39, 37, 89, 119], <b>“percolación”</b> [12, 95, 5, 25, 29, 45, 87, 102, 28, 41, 82, 6, 38, 42, 20, 27, 60, 59, 134, 31], <b>“ataques intencionales”</b> [70, 20, 15, 40, 17, 41, 133, 114, 127, 14, 119, 31, 115, 129, 103, 39, 89, 130], <b>“carga y capacidad”</b> [80, 79, 40, 17, 133, 42, 114, 127, 105, 2, 116, 58, 129, 119], <b>“optimización”</b> [128, 70, 80, 74, 79, 55, 2] y <b>“costo”</b> [128, 80, 79, 55, 2, 58].
Redes usadas para testear el framework	Dos clasificaciones: <b>“simuladas”</b> [12, 128, 83, 25, 80, 79, 126, 1, 45, 102, 63, 29, 6, 17, 15, 40, 28, 20, 127, 114, 42, 105, 56, 115, 31, 119, 44, 59, 103, 60, 130, 58, 39, 37, 89, 84, 27] y <b>“simuladas y reales”</b> [85, 5, 95, 70, 74, 113, 87, 72, 55, 73, 133, 38, 41, 82, 14, 116, 36, 129, 134, 2].

(8), “red eléctrica acoplada” (7), “transmisión de carga entre redes” (6), “mezcla de interacción intra/inter red” (4), “mapeo” (2), “cadena de suministro” (1) y “definido por probabilidades” (1).

La clasificación “tipo one-to-one” contiene a todos aquellos modelos cuya principal característica es que las interacciones entre redes son uno a uno con dependencia bidireccional, es decir, cada nodo solo

puede estar conectado a un único nodo en otra red. Si un nodo falla entonces su nodo dependiente también falla y viceversa. Los modelos que se encuentran dentro de esta clasificación típicamente no presentan interacciones entre nodos a nivel de intra-red [12, 95, 82, 20, 85, 27, 37, 89, 14, 44, 115, 15], sin embargo existen modelos en esta clasificación que presentan variaciones en cuanto a sus interacciones internas o características generales como es el caso de [113, 114, 58, 17] donde se tiene que al interior de cada red hay cargas y capacidades donde se pueden generar fallas si la carga que recibe un arco o nodo excede su capacidad, o [126] donde cada componente tiene un ‘tiempo de vida promedio’ luego del cual falla.

Siguiendo una línea similar, [102] considera un modelo que introduce el concepto de “recuperación” donde con cierta probabilidad los arcos pueden reestablecer conexión entre nodos desconectados, [25, 5, 1, 6] introducen espacialidad al modelo donde los arcos tienen largo y para que dos nodos de distintas redes se puedan conectar estos deben estar a una cierta distancia. [56] mezcla la noción de “tiempo de vida” y de espacialidad recién mencionados. En [83] los arcos entre redes tienen pesos en base a los cuales se estudian puntos de transición de fase. En [38, 36, 103, 129, 15] se admite que no necesariamente todos los nodos poseen una contraparte, pero, si la tienen, es única y dependen uno del otro como se describió anteriormente. [59] presenta el caso donde si un nodo falla, su contraparte puede perder sus arcos con cierta probabilidad, el peor caso es aquel en el que se pierden todos los arcos, el cual es equivalente al modelo *one-to-one* original.

Los modelos tipo “dependencias múltiples” tienen como principal característica que entre redes los nodos se pueden relacionar con múltiples otros nodos. Dentro de estos modelos están aquellos que establecen relaciones de soporte-dependencia dirigidas entre nodos de distintas redes donde un nodo sigue funcionando siempre y cuando al menos uno de sus nodos de soporte se encuentre funcionando [80, 79, 29, 87, 15]. También encontramos aquellos cuya relación entre nodos de distintas redes tienen dependencias no dirigidas donde los nodos se dan soporte mutuamente, de esta forma basta que cada nodo esté conectado a al menos un otro nodo en la otra red para mantenerse funcionando [70, 45, 55]. Finalmente dentro de éstos también podemos encontrar variaciones, como es el caso de [80, 79], que además de presentar relaciones tipo soporte-dependencia dirigidas se tiene que al interior de cada red hay cargas y capacidades donde se pueden generar fallas si la carga que recibe un arco o nodo excede su capacidad.

En el caso de la clasificación “red eléctrica acoplada” tenemos modelos que se distinguen de los demás por modelar la red eléctrica junto a alguna otra red. Típicamente se estudia el par “red eléctrica-red de control”, pero también es posible encontrar otros acoplamientos. Dentro del primer caso tenemos que los modelos manejan siempre 2 redes donde una de ellas modela de la red eléctrica, y la otra modela la red de control (*Control Network* o *Supervisory Control And Data Acquisition*). En esta última se suele separar entre nodos que representan *routers* o fuentes de información y centros de control cuya función es redistribuir. Dentro de estas podemos distinguir entre aquellas que modelan los arcos y nodos con cargas y capacidades eléctricas mínimas y/o máximas para el correcto funcionamiento de la red eléctrica [42, 72, 39] y aquellas que no [41, 63, 74]. Un único modelo presenta a la red eléctrica acoplada a una red distinta de la red de control [73]. Aquí la red eléctrica es acoplada a la red de distribución de gasolina la cual depende del suministro eléctrico para funcionar.

En la clasificación “transmisión de carga entre redes” hay exactamente 6 papers [133, 127, 40, 116, 134, 119]. En éstos la característica principal es que los arcos y/o nodos poseen cierta carga y capacidad tal que si un nodo falla la carga de éste se redistribuye dentro de la red y entre redes. Es interesante destacar

una posible aplicación al mundo real presentada en [133] donde las redes pueden ser vistas como el par de redes de transporte bus-metro donde se transfiere la carga de pasajeros.

En “mezcla de interacción intra/inter red” se tienen [28, 130, 60, 31]. Esta clasificación contiene a aquellos modelos tales que existe más de un tipo de interacción entre redes [28, 130, 31] o dentro de las redes [59], es decir, existen distintos tipos de arco y dependiendo del tipo de arco se define qué ocurre con sus vecinos en otras redes o dentro de la red si un nodo falla o es desconectado.

“Mapeo” por otro lado, contiene a aquellos modelos que representan redes que deben ser “mapeadas” o “ruteadas” en otras redes. De esta forma, una de las redes depende de la estructura de la otra y del tipo de mapeo que se hace sobre ésta. En esta clasificación se encuentran [128, 2].

La clasificación “cadena de suministro” contiene a aquellos modelos cuya característica principal es representar sistemas de cadenas de suministro. Dentro de esta clasificación está [105] donde se modela una red física que representa la cadena misma de suministro (productor, distribuidor, etc.) y una red cibernética, compuesta por sistemas computacionales, que representa el sistema de control digital de la cadena de suministro.

Finalmente en la clasificación “definido por probabilidades” se encuentran aquellos modelos cuyo comportamiento se encuentra enteramente definido por probabilidades. Aquí se encuentra [84] en cuyo modelo cada nodo tiene una cierta probabilidad de falla y al fallar un nodo la probabilidad de que sus vecinos en otra red de fallen puede aumentar, disminuir o mantenerse.

#### *Tipo de métrica usada para el estudio de robustez*

Los *frameworks* utilizan una variedad de métricas para estudiar la robustez de una red frente a fallos. Un mismo *framework* puede utilizar una o más de una métrica para medir la robustez. Las métricas para medir la robustez de una red utilizadas en el *framework* determinan cuáles son los aspectos que el *framework* considera como determinantes para definir a una red como robusta o frágil. En este estudio se identificaron 8 clasificaciones: “cantidad de elementos” (39), “punto de quiebre” (22), “tiempo” (7), “probabilidad” (4), “costo” (3), “largo de camino” (3), “ratio” (1) y “desempeño” (1).

Las métricas de tipo “cantidad de elementos” corresponden a todas aquellas que midan la cantidad de algún parámetro, como por ejemplo la cantidad de nodos en la componente conexas más grande, o bien que extraigan un valor de acuerdo a la cantidad de un parámetro tal que la dimensión en la cual este se expresa se conserva, como es el caso del promedio de vecinos de un nodo. Dentro de este tipo de métricas podemos distinguir a aquellas que miden la cantidad de nodos que permanecen funcionales luego de que ocurre una falla en la red (con su subsecuente falla en cascada) [95, 5, 70, 102, 45, 63, 87, 72, 28, 40, 15, 17, 55, 127, 20, 42, 41, 38, 31, 115, 134, 129, 59, 60, 130, 27, 36, 58, 116, 37, 14, 105, 119, 44], aquellas que miden la cantidad de nodos perdidos luego de la falla [113, 114, 1, 39] y las que miden la cantidad de caminos redundantes que hay de una red en otra en los casos en que se utilizan modelos de “mapeo” [128].

En el caso de la clasificación “punto de quiebre” tenemos métricas tales que miden en qué punto ocurre un quiebre de la red. Algunos ejemplos son la cantidad de nodos o arcos que se deben remover para el colapso total de la red, el tiempo de vida de la red antes de su colapso, etc. Para el caso de redes interdependientes el colapso es abrupto luego de que se pasa el punto de quiebre. En esta clasificación encontramos a aquellas que buscan el número de nodos que se pueden remover antes de que la red colapse

[12, 83, 74, 25, 29, 45, 102, 87, 6, 28, 20, 82, 37, 59, 31], aquellas que en el caso de tenerse redes con carga consideran cual es la capacidad de carga crítica para que la red colapse en caso de que fallen nodos [114, 127, 42, 40], las que cuentan el número crítico de arcos a desconectar para que colapse la red [74, 85], las que consideran qué tan acopladas pueden estar las redes interdependientes [29] y aquellas que miden el tiempo esperado antes del colapso [126, 56].

La clasificación “tiempo” contiene a aquellas métricas donde se mide el tiempo que toma algún proceso dentro de las redes interdependientes. En estos casos la duración de dichos procesos determina qué tan bien se encuentra funcionando la red frente a situaciones adversas, lo que convierte a estas métricas en medidas de robustez del sistema. Dentro de los documentos estudiados encontramos métricas que miden el número de iteraciones que toma una falla en cascada [25, 5, 29, 20, 27], el tiempo que tiene un usuario antes de perder la disponibilidad de servicios provistos por la red [2] y el tiempo promedio de retardo o *delay* en una red [128].

Dentro de la clasificación “probabilidad” encontramos métricas que evalúan la robustez de acuerdo a qué tan probable es que ocurra algún evento que sea determinante para la robustez de las redes interdependientes. En el estudio realizado se encontraron 4 métricas. En [12] se observa qué tan probable es que aún exista una componente conexa gigante mutuamente conectada dentro del sistema interdependiente, mientras que [82, 89] observan qué tan probable es que un nodo se encuentre conectado a la componente conexa más grande y que dos nodos cualesquiera se encuentren conectados entre sí, respectivamente. Finalmente en [84] se estudia que tan confiable es una red según la distribución en probabilidad del tamaño de fallo en cascada.

Las métricas que se encuentran en la clasificación “costo” miden que tan costoso es aumentar la robustez de una red hasta un cierto punto. Esto puede ocurrir mediante la adición de arcos o nodos, el cambiar nodos de dependientes a autónomos, etc. Los siguientes trabajos utilizan métrica de tipo “costo” para medir qué tanto cuesta aumentar la robustez de las redes interdependientes frente a fallos [80, 79, 128].

En la clasificación “largo de camino” se encuentran aquellas métricas que miden qué tan bien conectada se encuentra la red respecto al largo de sus caminos, donde a más cortos sean los caminos entre nodos, en mejores condiciones se encuentra la red [133, 14, 103].

La clasificación “ratio” contiene a aquellas métricas que observan como alguna característica de la red se distribuye en otra. En esta clasificación encontramos una única métrica en [1] la cual mide la tasa de nodos que fallan por iteración durante un fallo en cascada, con el objetivo de medir qué tan abrupta es la red.

Finalmente la clasificación “desempeño” contiene a aquellas métricas que miden el rendimiento del sistema interdependiente. En este caso hay que notar que el rendimiento de las redes va a estar definido según el tipo de sistema y qué se espera de él. En [73] se evalúa que tan bien rinde la red respecto a su rendimiento óptimo esperado.

#### *Estudios realizados por el framework*

Otra cualidad que caracteriza a los *frameworks* es el tipo de estudios que realizan para evaluar la robustez de los sistemas interdependientes, además de las métricas. Cada *framework* puede realizar diversos estudios donde, por ejemplo, evalúa el impacto que puede tener el alterar ciertas variables de las

redes interdependientes que están siendo analizadas sobre la robustez. Según los *papers* analizados en este estudio se identificaron 7 clasificaciones principales: “tamaño de la componente gigante” (33), “acoplamiento” (30), “percolación” (20), “ataques intencionales” (18), “carga y capacidad” (14), “optimización” (7) y “costo” (6). Para ver el detalle de todas las clasificaciones ver la tabla 9.17.

En el caso de la clasificación “tamaño de la componente gigante” se tienen aquellos *frameworks* que estudiaron cambios en el tamaño de la componente conexa más grande del sistema interdependiente al someterlo a diferentes condiciones. Este estudio puede ser tanto el foco principal para estudiar la robustez de las redes dentro del *framework* como información complementaria. Estudiar el tamaño de la componente conexa más grande es relativamente común dentro de los documentos estudiados, presentándose en un total de 33 *papers* [12, 126, 95, 5, 70, 45, 87, 102, 72, 28, 55, 40, 15, 17, 41, 127, 42, 20, 44, 115, 56, 134, 129, 59, 103, 60, 130, 27, 36, 37, 14, 105, 31].

La clasificación “acoplamiento” hace referencia a los estudios que observan el efecto que tiene el acoplamiento de las redes interdependientes en la robustez. El acoplamiento de redes interdependientes corresponde a cómo están interconectadas las redes. Típicamente se estudian criterios de acoplamiento o fuerza del acoplamiento. Algunos ejemplos de criterios de acoplamiento son acoplar nodos de grado alto con nodos de grado bajo, acoplar nodos de igual grado, acoplar aleatoriamente, etc. Por otro lado la fuerza del acoplamiento se refiere a la cantidad de nodos acoplados entre redes. Este estudio fue realizado por un total de 30 *papers* [85, 95, 5, 80, 25, 29, 113, 45, 63, 87, 72, 17, 40, 28, 55, 38, 127, 114, 44, 31, 115, 134, 129, 59, 103, 60, 39, 37, 89, 119].

Se considera que un *framework* realizó estudios de “percolación” si estudió el umbral de percolación de las redes interdependientes o si realizó estudios sobre medidas que se basan en teoría de percolación [100]. Dentro del contexto de los estudios de percolación se tiene que  $1 - p$  es la probabilidad de que un nodo falle o se desconecte. El umbral de percolación, típicamente denotado como  $p_c$ , representa el valor crítico tal que si  $p < p_c$  entonces en la red ya no es posible identificar una componente conexa gigante. A menor  $p_c$ , más robusto es considerado el sistema interdependiente (pues esto implica un mayor valor de  $1 - p_c$ ). Se interpreta en el conexto de medir la robustez de redes interdependientes que un menor  $p_c$  implica que es posible desconectar un mayor número de nodos antes de llegar al punto en que el sistema colapsa. Al estudiar percolación pueden ocurrir fases de transición de primer y segundo orden. Las fases de transición de segundo orden son características de redes aisladas las cuales decaen de forma continua conforme se aumenta el valor de  $1 - p$ . Las transiciones de primer orden corresponden a redes donde ocurre un decaimiento abrupto conforme aumenta  $1 - p$ ; el punto donde ocurre dicho decaimiento corresponde a  $p_c$ . Las transiciones de primer orden son características de las redes interdependientes. En total 20 *papers* realizan estudios de percolación [12, 95, 5, 25, 29, 45, 87, 102, 28, 41, 82, 6, 38, 42, 20, 27, 60, 59, 134, 31].

La clasificación “ataques intencionales” contiene a todos aquellos *frameworks* que realizan ataques intencionales y observan su efecto en las redes. En este contexto para que un ataque se considere intencional este debe utilizar algún parámetro determinista para escoger el nodo o arco que desea atacar. Estos ataques pueden realizarse según medidas de centralidad o valores característicos del sistema como el caso de la carga de un nodo en redes con cargas, capacidades y flujos. Un total de 18 *papers* realizan estudios de ataques intencionales [70, 20, 15, 40, 17, 41, 133, 114, 127, 14, 119, 31, 115, 129, 103, 39, 89, 130].

Los estudios de “carga y capacidad” se enmarcan en el contexto de *frameworks* que utilizan modelos

que asumen que al menos una de las redes participantes tiene carga (eléctrica, pasajeros, etc.), y por ende, capacidades mínimas o máximas de tolerancia de carga, tal que si se excede algún límite se genera una falla. Estos estudios observan el efecto que tiene alterar ciertas variables que definen la capacidad de carga tienen los distintos elementos de las redes participantes en la robustez, pues al alterar estos parámetros se cambia el comportamiento de fallos en cascada por sobrecarga (o por falta de carga). En esta revisión se encontraron 14 *papers* que estudiaron la carga y capacidad [80, 79, 40, 17, 133, 42, 114, 127, 105, 2, 116, 58, 129, 119].

Dentro de la clasificación de estudios “optimización” se encuentran los *frameworks* que realizan optimizaciones para probar o aumentar la robustez de una red. Algunos ejemplos particulares de esto son [70] donde se desea identificar los nodos críticos de una red interdependiente para maximizar la destrucción de la misma y [80] donde se quiere minimizar el costo de aumentar la robustez de las redes interdependientes. Un total de 7 *papers* presentan *frameworks* que caen dentro de esta clasificación [128, 70, 80, 74, 79, 55, 2].

La clasificación “costo” contiene a aquellos *frameworks* que realizan estudios de costos para aumentar la robustez del sistema interdependiente. Estos costos pueden corresponder a costos de agregar arcos, agregar nodos, desacoplar nodos, etc. Los estudios de costos pueden considerar la relación costo-beneficio o el costo por sí solo de realizar dichas mejoras en la red. Se encontraron 6 *papers* cuyos *frameworks* realizan estudios de costo [128, 80, 79, 55, 2, 58].

#### *Redes usadas para testear el framework*

Dados los requisitos exigidos a cada *paper* para ser considerado dentro de este estudio todo *paper* debe probar su *framework* sobre redes ya sean reales o simuladas. Dentro de este estudio se encontraron 2 categorías de redes testeadas: “simuladas” (37) y “simuladas y reales” (20).

Aquellos *frameworks* dentro de la clasificación “simuladas” utilizaron únicamente redes simuladas para probar sus *frameworks*, algunos ejemplos de redes simuladas corresponden a Erdős-Renyi, Power-Law y Random-Regular. En total 37 *papers* testean únicamente sobre redes simuladas [12, 128, 83, 25, 80, 79, 126, 1, 45, 102, 63, 29, 6, 17, 15, 40, 28, 20, 127, 114, 42, 105, 56, 115, 31, 119, 44, 59, 103, 60, 130, 58, 39, 37, 89, 84, 27].

Finalmente, los pertenecientes a la clasificación “simuladas y reales” corresponden a aquellos que utilizaron tanto redes reales como redes simuladas para su testeo, es decir, si bien puede que hayan utilizado redes puramente simuladas para su testeo al menos una de las redes de prueba utilizadas corresponde a una red real. Los sistemas acoplados pueden corresponder a redes puramente reales, como es el caso de [133] donde se utiliza la red interconectada de transporte público de Beijing, o mixtas como es el caso de [5] donde se utiliza la red eléctrica de Europa y la de Estados Unidos acopladas a redes *Random Regular*. Un total de 20 *papers* se encuentran dentro de esta categoría [85, 5, 95, 70, 74, 113, 87, 72, 55, 73, 133, 38, 41, 82, 14, 116, 36, 129, 134, 2].

### 9.4.2. Discusión

Basada en la revisión conducida y los 4 principales aspectos identificados, la discusión se centrará en analizar la evolución general de área de estudio de robustez en redes interdependientes y las tendencias de las categorías predominantes de cada aspecto. En las tablas 9.13, 9.14, 9.15 y 9.16 del apéndice se

encuentra el resumen de las clasificaciones a las que pertenece cada uno de los *papers* estudiados. En las tablas 9.20 y 9.19 se encuentran las listas de combinaciones de estudios versus redes de testeo y de modelos versus métricas respectivamente, con los *papers* presentes en cada una de las combinaciones. Además en la tabla 9.18 del apéndice se encuentran los títulos y citas de todos los *papers* estudiados en esta revisión.

Como se puede apreciar en la tabla 9.12 el uso de *frameworks* para estudiar la robustez en redes interdependientes no comienza hasta el año 2010 con el trabajo de Buldyrev et al. [12]. Aún así el área no suma una cantidad mayor de *papers* hasta el año 2013, en particular durante la revisión sistemática no se encontraron *papers* que presentasen *frameworks* en el año 2012. Así, a partir del 2013 el área se mantiene y presenta un importante crecimiento pasando de 8 *papers* el año 2014 a 15 el año 2015 y 22 durante 2016. Lo cual representa un aumento de casi el triple de artículos entre el año 2014 y el 2016.

Cuadro 9.12: Cantidad de papers publicados por año

Año	Número de <i>papers</i> publicados	Porcentaje de <i>papers</i> publicados en <i>journals</i>	Porcentaje de <i>papers</i> publicados en <i>proceedings</i>	Porcentaje de <i>papers</i> publicados respecto al total
2005	0	0 %	0 %	0 %
2006	0	0 %	0 %	0 %
2007	0	0 %	0 %	0 %
2008	0	0 %	0 %	0 %
2009	0	0 %	0 %	0 %
2010	1	100 %	0 %	1,8 %
2011	2	0 %	100 %	3,5 %
2012	0	0 %	0 %	0 %
2013	9	55,6 %	44,4 %	15,8 %
2014	8	75 %	25 %	14 %
2015	15	86,7 %	13,3 %	26,3 %
2016	22	81,8 %	18,2 %	38,6 %

En cuanto a las tendencias de modelos, como se puede ver en la figura 9.18b la categoría más popular corresponde a la “tipo *one-to-one*”, presente en un 50,9 % de los *papers* estudiados en la etapa final, sobrepasando por mucho a la segunda categoría más popular de “dependencias múltiples” que cuenta con tan sólo un 14 % de los artículos estudiados. Tal como se puede apreciar en la figura 9.18a el modelo utilizado en el primer artículo del área [12] también se encuentra dentro de los modelos “tipo *one-to-one*”. Sin embargo esta tendencia no queda totalmente establecida hasta el año 2015 donde un 46,7 % de los artículos de dicho año presenta un modelo “tipo *one-to-one*”, porcentaje que aumenta a un 54,5 % en el año 2016. Entre los años 2010 y 2013 aparecen otras variedades de modelo como “mapeo”, “dependencias múltiples” y “red eléctrica acoplada”, los cuales fueron perdiendo popularidad en el tiempo. Recientemente se han presentado nuevos tipos de modelo, sin embargo aún no hay suficientes publicaciones para juzgar si éstos se seguirán desarrollando.

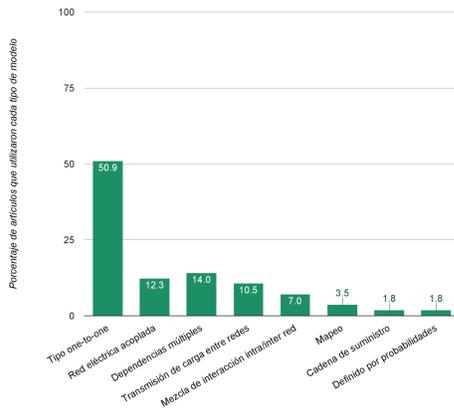
Dentro de la categoría métricas se puede observar en la figura 9.19a que las métricas de tipo “cantidad de elementos” predominan con un 68,4 % de los artículos estudiados. Las métricas de tipo “punto de quiebre” le siguen en segundo lugar, apareciendo como métrica de robustez en un 38,6 % de los artículos estudiados. Como se puede apreciar en la figura 9.19b, otros tipos de métrica como “costo”, “tiempo” y “probabilidad” surgen durante el año 2013, sin embargo su popularidad termina por decaer en el tiempo. Asimismo se puede observar que el uso de métricas de “punto de quiebre” decae durante el año 2016, pasando de ser utilizadas en un 53,3 % de los artículos publicados el año 2015 a un 18,2 % de los artículos el año 2016. Por otro lado las métricas de tipo “cantidad de elementos” mantienen un crecimiento sostenido a partir del 2013, tal que en el último año este tipo de métrica es utilizada en un 77,3 % de los *papers* publicados en dicho periodo.

Para la categoría de estudios realizados, de la figura 9.20a, se puede apreciar que hay 4 estudios populares: “tamaño de la componente gigante” utilizado en un 57,9 % de los artículos, “acoplamiento” utilizado en un 52,6 % de los artículos, “percolación” utilizado en un 36,8 % de los artículos y “ataques intencionales” utilizado en un 31,6 % de los artículos. Los estudios de “tamaño de la componente gigante” y “acoplamiento” mantienen un crecimiento sostenido en el tiempo a partir del año 2013 como se aprecia en la figura 9.20b. Este no ha sido el caso del uso de estudios de “percolación” lo cuales pierden su popularidad durante el año 2016 pasando de ser usados en un 40 % de los *papers* publicados en 2015 a un 22,7 % en el año 2016. Los estudios de “costo” y “optimización” son utilizados en un porcentaje no menor de los artículos publicados en 2013 (44,4 % y 22,2 % respectivamente), sin embargo esto no se mantuvo en los años siguientes. Recientemente, estudios de “ataques intencionales” y de “carga y capacidad” se han posicionado dentro de los estudios más populares siendo realizados por un 40,9 % y un 27,3 % de los *papers* publicados durante el 2016. Cabe destacar que dentro de la categoría de estudios realizados varios fueron realizados por menos de 3 artículos (ver tabla 9.17). El número de este tipo de estudios poco usados ha aumentado con el pasar de los años partiendo en 2 estudios de este tipo durante el año 2011, 1 durante 2013, 3 durante 2014, 2 durante 2015 y 7 durante el año 2016. Lo que da cuenta de una tendencia al alza de diversificación de tópicos y métodos para estudiar la robustez en redes interdependientes.

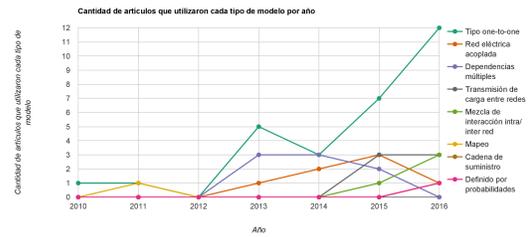
En la categoría de redes testeadas vemos que el tipo de redes para testear *frameworks* que se utilizan es mayormente de tipo “simuladas” con un 64,9 % de los *papers* estudiados mientras que el uso de redes “simuladas y reales” se queda bastante atrás con un 35,1 % de los *papers* estudiados (ver figura 9.21a). Sin embargo podemos observar en la figura 9.21b que esta disparidad no fue tremendamente significativa entre los años 2010 y 2014. Es durante el año 2015 y 2016, con el aumento de *papers* publicados en el tema, que la disparidad se vuelve marcada con una diferencia de un 45,5 % entre el número de *papers* que utilizaron redes de testeo de tipo “simuladas” y el número de *papers* que utilizaron redes de testeo de tipo “simuladas y reales”.

Finalmente, se mostrarán los 5 escenarios, o combinaciones de aspectos, más comunes dentro de los *frameworks* estudiados. En concordancia con los resultados previamente discutidos se tiene que el escenario más común, con un 15,8 % de los artículos, corresponde al de aquellos *frameworks* que utilizan modelos “tipo *one-to-one*”, métricas de “cantidad”, realizan estudios de “tamaño de la componente gigante” y utilizan redes “simuladas” para testear el *framework*. En segundo lugar, con un 12,3 % de los *papers*, tenemos un escenario igual al primero salvo por el tipo de métrica, la que en este caso corresponde a métricas de “punto de quiebre”. En tercer lugar, con un 10,5 % de los *papers*, se tiene nuevamente un escenario casi igual al anterior salvo por el estudio que realiza que en este caso corresponde a estudios

de “percolación”. En cuarto (10,5 %) y quinto (8,8 %) lugar tenemos escenarios que utilizan métricas de “cantidad”, modelos de “tipo *one-to-one*”, usan datos “simulados” para probar el *framework* y realizan estudios de “acoplamiento” y “ataques intencionales” respectivamente. Cabe mencionar que los *frameworks* presentados por cada artículo pueden caer en más de uno de estos escenarios pues cada *framework* puede utilizar más de un modelo, métrica o realizar más de un estudio. Un total de 15 *papers* distintos se encuentran dentro de estos 5 escenarios, lo que corresponde a un 26,3 % del total de artículos considerados en la revisión.

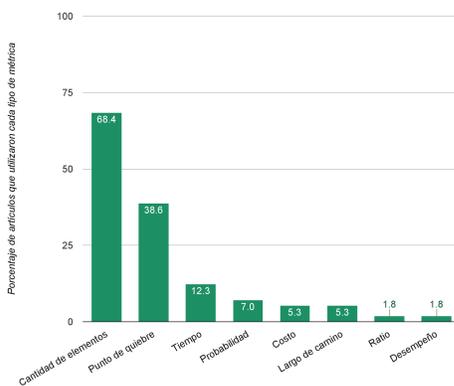


(a) Porcentaje de *papers* que utilizaron cada modelo.

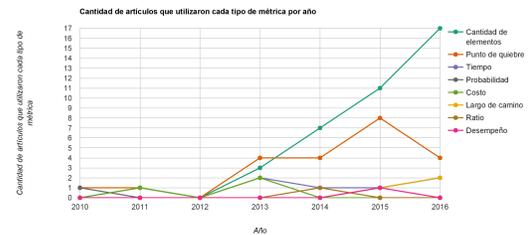


(b) Cantidad de *papers* por año que utilizaron cada modelo.

Figura 9.18: Resultados por modelos

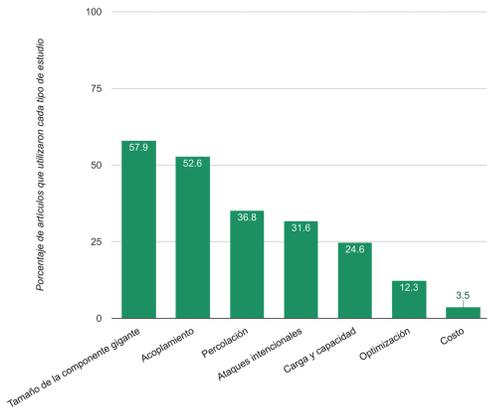


(a) Porcentaje de *papers* que utilizaron cada métrica.

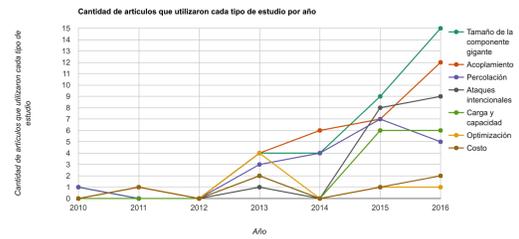


(b) Cantidad de *papers* por año que utilizaron cada métrica.

Figura 9.19: Resultados por métrica



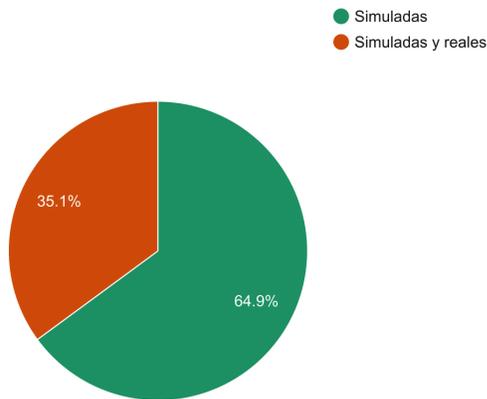
(a) Porcentaje de *papers* que utilizaron cada estudio.



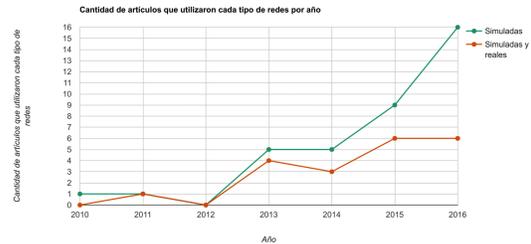
(b) Cantidad de *papers* por año que utilizaron cada estudio.

Figura 9.20: Resultados por estudios

Porcentaje de artículos que utiliza cada tipo de redes para testear su framework



(a) Porcentaje de *papers* que utilizaron cada tipo de redes para testear el *framework*.



(b) Cantidad de *papers* por año que utilizaron cada tipo de redes para testear el *framework*.

Figura 9.21: Resultados por tipo de red usada para testear el *framework*.

## 9.4.3. Apéndice: Tablas

Clasificación	Descripción	Papers
“tamaño de la componente gigante”	Estudios sobre el tamaño de la componente conexa más grande. Puede contener estudios de promedios de su tamaño u otras variaciones.	[12, 126, 95, 5, 70, 45, 87, 102, 72, 28, 55, 40, 15, 17, 41, 127, 42, 20, 44, 115, 56, 134, 129, 59, 103, 60, 130, 27, 36, 37, 14, 105, 31]
“acoplamiento”	Estudios de cómo se acoplan las redes interdependientes. Puede ser en cuanto a fuerza como a estrategia de acoplamiento.	[85, 95, 5, 80, 25, 29, 113, 45, 63, 87, 72, 17, 40, 28, 55, 38, 127, 114, 44, 31, 115, 134, 129, 59, 103, 60, 39, 37, 89, 119]
“percolación”	Estudios derivados de la teoría de percolación. Típicamente umbral de percolación.	[12, 95, 5, 25, 29, 45, 87, 102, 28, 41, 55, 82, 6, 38, 42, 20, 27, 60, 59, 134, 31]
“Ataques intencionales”	Ataques que determinan qué elemento atacar según algún parámetro específico como grado o carga de un nodo.	[70, 20, 15, 40, 17, 41, 133, 114, 127, 14, 119, 31, 115, 129, 103, 39, 89, 130]
“carga y capacidad”	Estudios sobre el efecto de alterar las capacidades y cargas del modelo.	[80, 79, 40, 17, 133, 42, 114, 127, 105, 2, 116, 58, 129, 119]
“optimización”	Estudios de optimización que buscan aumentar la robustez o detectar vulnerabilidades.	[128, 70, 80, 74, 79, 55, 2]
“Costoo”	Estudios sobre el costo de mejorar la red.	[128, 80, 79, 55, 2, 58]
“Avalancha”	Estudia la cantidad de nodos que deja de ser funcional luego de un fallo en cascada.	[113, 114, 17, 39, 58]
“Tiempo de cascada”	Estudios del tiempo que toma un fallo en cascada.	[25, 5, 29, 20]
“Recuperación”	Estudios del proceso recuperación de un sistema interdependiente	[38, 73, 36, 27]

“Largo de arco”	Estudio de los efectos de modificar el largo de arcos en la robustez de la red.	[25, 6, 56]
“Algoritmo genético”	Estudios de algoritmos genéticos para crear redes interdependientes robustas.	[1, 73]
“Laplaciano”	Estudios que se basan en la matriz Laplaciana para estudiar la red.	[85, 83]
“Tiempo de vida”	Estudios sobre el tiempo de vida de una red dado que sus arcos y nodos tienen una cierta esperanza de vida.	[126, 56]
“Ataques localizados”	Estudios de ataques que se centran en un nodo (puede ser o no elegido al azar) e infringen daño en un radio alrededor de él.	[1, 6]
“Probabilidad de fallos”	Estudios sobre la probabilidad o distribución de probabilidad de fallos en un sistema.	[58, 130]
“Delay”	Estudios del tiempo de demora de servicios provistos por el sistema interdependiente.	[128]
“Cadenas de Markov”	Estudios sobre redes cuyo comportamiento se puede modelar con cadenas de Markov.	[84]
“Contraste con red aislada”	Estudios de la robustez del sistema interdependiente en comparación con una red aislada	[113]
“Clusters funcionales”	Estudios sobre la cantidad de pequeños <i>clusters</i> funcionales y su tamaño. Estos <i>clusters</i> pueden ser variados y más pequeños que la componente gigante.	[41]
“Radio de ataque”	Estudios sobre la estabilidad de redes con restricciones físicas. Se dice que el sistema es estable si para un ataque de radio finito esta no decae abruptamente, metaestable si existe un radio de ataque luego del cual el sistema colapsa e inestable si para un ataque de cualquier radio la red queda destruida.	[6]
“Prob. de detención de cascada”	Estudios sobre la probabilidad de que en el siguiente paso del fallo en cascada ésta se detenga.	[84]
“PMF del tamaño de falla”	Estudios sobre el comportamiento del PMF ( <i>Probability Mass Function</i> ) del tamaño de falla.	[84]
“Número de componentes”	Estudios sobre la cantidad de componentes conexas de un sistema y/o sus características.	[14]

"Información para atacar"	Estudios sobre el efecto que tiene la cantidad de información que posee un atacante sobre la red al momento de atacar.	[134]
---------------------------	--	-------

Cuadro 9.17: Lista de clasificaciones de estudios

Título	Cita
Catastrophic cascade of failures in interdependent networks	[12]
How to 'Glue' a Robust Smart-Grid?	[85]
An Overlay Mapping Model for Achieving Enhanced QoS and Resilience Performance	[128]
Interdependent Spatially Embedded Networks: Dynamics at Percolation Threshold	[25]
Optimal weighting scheme and the role of coupling strength against load failures in degree-based weighted interdependent networks	[80]
The extreme vulnerability of interdependent spatially embedded networks	[5]
Reliability Analysis of Interdependent Networks Using Percolation Theory	[126]
Towards designing robust coupled networks	[95]
Robustness of Interdependent Networks: The case of communication networks and the power grid	[74]
Abrupt transition in the structural formation of interconnected networks	[83]
Detecting Critical Nodes in Interdependent Power Networks for Vulnerability Assessment	[70]
The effect of clustering-based and degree-based weighting on robustness in symmetrically coupled heterogeneous interdependent networks	[79]
Study of the Use of a Genetic Algorithm to Improve Networked System-of-Systems Resilience	[1]
The effect of interdependence on the percolation of interdependent networks	[45]
Analysis of percolation behaviors of clustered networks with partial support-dependence relations	[29]
Avoiding catastrophic failure in correlated networks of networks	[87]
Enhancing resilience of interdependent networks by healing	[102]
Modeling the Interaction of Power Line and SCADA Networks	[63]
Robustness of interdependent networks with different link patterns against cascading failures	[113]
Design of Robust Dependent Networks against Flow-based Cascading Failures	[72]
Robust allocation of weighted dependency links in cyber-physical networks	[55]
Cascading failure of interdependent networks with different coupling preference under targeted attack	[17]
Resilience assessment of interdependent infrastructure systems: With a focus on joint restoration modeling and analysis	[73]
Cascading failure propagation in interconnected networks with tunable load redistribution strategy	[40]
Robustness of network of networks with interdependent and interconnected links	[28]

Towards Optimal Link Patterns for Robustness of Interdependent Networks against Cascading Failures	[15]
Small Cluster in Cyber Physical Systems: Network Topology, Interdependence and Cascading Failures	[41]
Effect of network size on robustness of interconnected networks under targeted attack	[127]
Cascading load model in interdependent networks with coupled strength	[114]
Cascading Failures in Smart Grid: Joint Effect of Load Propagation and Interdependence	[42]
Enhancing robustness of coupled networks under targeted recoveries	[38]
Cascading failures in interconnected networks with dynamical redistribution of loads	[133]
Cascade of failures in interdependent networks coupled by different type networks	[20]
Localized attacks on spatially embedded networks with dependencies	[6]
Percolation in real interdependent networks	[82]
Impact of Degree Heterogeneity on Attack Vulnerability of Interdependent Networks	[103]
Cascading failures in coupled networks: The critical role of node-coupling strength across networks	[59]
Cascade-robustness optimization of coupling preference in interconnected networks	[129]
Fuzzy-information-based robustness of interconnected networks against attacks and failures	[134]
Reliability analysis of interdependent lattices	[56]
Robustness of single and interdependent scale-free interaction networks with various parameters	[115]
Targeted attack on networks coupled by connectivity and dependency links	[31]
The effect of capacity redundancy disparity on the robustness of interconnected networks	[119]
Cascading failures in coupled networks with both inner-dependency and inter-dependency links	[60]
Recovery of Interdependent Networks	[27]
Complex interdependent supply chain networks: Cascading failure and robustness	[105]
Improving interdependent networks robustness by adding connectivity links	[44]
Cascading Failures in Interdependent Infrastructures: An Interdependent Markov-Chain Approach	[84]
Supporting differentiated resilience classes in multilayer networks	[2]
Resilience of interdependent communication and power distribution networks against cascading failures	[14]
Reducing the impact of targeted attacks in interdependent telecommunication networks	[89]
Shell attack on interdependent networks	[37]
Improved percolation theory incorporating power flow analysis to model cascading failures in Cyber-Physical Power System	[39]
Study of Robustness in Functionally Identical Coupled Networks against Cascading Failures	[116]
Redundant Design in Interdependent Networks	[58]
Operational resilience: concepts, design and analysis	[36]
The robustness of multiplex networks under layer node-based attack	[130]

Cuadro 9.18: Lista de papers incluidos en la revisión sistemática

Modelo	Métrica	Citas
Tipo one-to-one	Cantidad de elementos	[5, 95, 102, 1, 113, 17, 15, 20, 114, 38, 14, 115, 129, 59, 27, 36, 58, 44, 37]
Tipo one-to-one	Punto de quiebre	[12, 85, 83, 126, 25, 102, 113, 82, 20, 6, 37, 59, 56]
Red eléctrica acoplada	Cantidad de elementos	[72, 63, 42, 41, 39]
Dependencias múltiples	Cantidad de elementos	[70, 87, 45, 55, 15]
Transmisión de carga entre redes	Cantidad de elementos	[127, 40, 116, 134, 119]
Tipo one-to-one	Tiempo	[25, 5, 20, 27]
Mezcla de interacción intra/inter red	Cantidad de elementos	[28, 130, 60, 31]
Tipo one-to-one	Probabilidad	[12, 82, 89]
Dependencias múltiples	Punto de quiebre	[29, 87, 45]
Red eléctrica acoplada	Punto de quiebre	[74, 42]
Tipo one-to-one	Largo de camino	[14, 103]
Dependencias múltiples	Costo	[80, 79]
Mezcla de interacción intra/inter red	Punto de quiebre	[28, 31]
Mapeo	Tiempo	[128, 2]
Transmisión de carga entre redes	Punto de quiebre	[127, 40]
Cadena de suministro	Cantidad de elementos	[105]
Definido por probabilidades	Probabilidad	[84]
Red eléctrica acoplada	Desempeño	[73]
Tipo one-to-one	Ratio	[1]
Dependencias múltiples	Tiempo	[29]
Mapeo	Costo	[128]
Mapeo	Cantidad de elementos	[128]
Transmisión de carga entre redes	Largo de camino	[133]

Cuadro 9.19: Lista de papers según modelo y métrica usadas

Estudio	Tipo de redes de testeo	Citas
Tamaño de la componente gigante	Simuladas	[12, 126, 102, 45, 17, 15, 40, 20, 28, 42, 127, 37, 44, 31, 115, 56, 59, 103, 60, 105, 27, 130]

Acoplamiento	Simuladas	[25, 80, 29, 63, 45, 40, 17, 28, 114, 127, 44, 119, 31, 115, 59, 103, 60, 39, 89, 37]
Ataques intencionales	Simuladas	[20, 15, 40, 17, 127, 114, 39, 130, 89, 115, 31, 119, 103]
Percolación	Simuladas	[12, 25, 29, 45, 102, 42, 6, 20, 28, 27, 60, 59, 31]
Tamaño de la componente gigante	Simuladas y reales	[5, 95, 70, 87, 72, 41, 55, 14, 36, 129, 134]
Acoplamiento	Simuladas y reales	[85, 5, 95, 113, 87, 72, 55, 38, 129, 134]
Carga y capacidad	Simuladas	[80, 79, 42, 40, 17, 127, 114, 58, 119, 105]
Percolación	Simuladas y reales	[5, 95, 87, 38, 82, 41, 134]
Ataques intencionales	Simuladas y reales	[70, 133, 41, 14, 129]
Optimización	Simuladas y reales	[70, 74, 55, 2]
Costo	Simuladas	[128, 80, 79, 58]
Carga y capacidad	Simuladas y reales	[133, 2, 116, 129]
Avalancha	Simuladas	[114, 17, 39, 58]
Recuperación	Simuladas y reales	[38, 73, 36]
Optimización	Simuladas	[128, 80, 79]
Largo de arco	Simuladas	[25, 6, 56]
Tiempo de cascada	Simuladas	[25, 29, 20]
Ataques localizados	Simuladas	[1, 6]
Tiempo de vida	Simuladas	[126, 56]
Costo	Simuladas y reales	[55, 2]
Radio de ataque	Simuladas	[6]
Clusters funcionales	Simuladas y reales	[41]
Contraste con red aislada	Simuladas y reales	[113]
Recuperación	Simuladas	[27]
Laplaciano	Simuladas	[83]
Laplaciano	Simuladas y reales	[85]
Algoritmo genético	Simuladas	[1]
Algoritmo genético	Simuladas y reales	[73]
Delay	Simuladas	[128]
Número de componentes	Simuladas y reales	[14]
Tiempo de cascada	Simuladas y reales	[5]
Avalancha	Simuladas y reales	[113]
Prob. de detención de cascada	Simuladas	[84]
Probabilidad de fallos	Simuladas	[130]
PMF del tamaño de falla	Simuladas	[84]
Cadenas de Markov	Simuladas	[84]

---

Información para atacar	Simuladas y reales	[134]
-------------------------	--------------------	-------

Cuadro 9.20: Lista de papers según estudios realizados y redes usadas para testeo

Cuadro 9.13: Tabla resumen: parte I

Papers	[12]	[128]	[85]	[83]	[70]	[25]	[80]	[126]	[74]	[79]	[5]	[95]	[29]	[87]	[72]
Modelos	Tipo one-to-one	✓		✓	✓	✓		✓			✓	✓			
	Dependencias múltiples				✓		✓			✓			✓	✓	
	Red eléctrica acoplada								✓						✓
	Transmisión de carga entre redes														
	Mezcla de interacción intra/inter red														
	Mapeo		✓												
	Cadena de suministro														
	Definido por probabilidades														
Métricas	Cantidad de elementos		✓		✓						✓	✓		✓	✓
	Punto de quiebre	✓		✓	✓	✓		✓	✓				✓	✓	
	Tiempo		✓			✓					✓		✓		
	Probabilidad	✓													
	Costo		✓				✓			✓					
	Largo de camino														
	Ratio														
	Desempeño														
Estudios	Tamaño de la componente gigante	✓			✓			✓			✓	✓		✓	✓
	Acoplamiento			✓		✓	✓				✓	✓	✓	✓	✓
	Percolación	✓				✓					✓	✓	✓	✓	
	Ataques intencionales				✓										
	Carga y capacidad						✓			✓					
	Optimización		✓		✓		✓		✓	✓					
	Costo		✓				✓			✓					
	Avalancha														
	Tiempo de cascada					✓					✓		✓		
	Recuperación														
	Largo de arco					✓									
	Algoritmo genético														
	Laplaciano			✓	✓										
	Tiempo de vida							✓							
	Ataques localizados														
	Probabilidad de fallos														
	Delay		✓												
	Cadenas de Markov														
	Contraste con red aislada														
	Clusters funcionales														
Radio de ataque															
Prob. de detención de cascada															
PMF del tamaño de falla															
Número de componentes															
Información para atacar															
Redes	Simuladas y reales			✓	✓				✓		✓	✓		✓	✓
	Simuladas	✓	✓		✓	✓	✓	✓		✓			✓		

Cuadro 9.14: Tabla resumen: parte II

Papers	[63]	[1]	[45]	[113]	[102]	[20]	[17]	[15]	[40]	[28]	[41]	[55]	[82]	[6]	[38]
Modelos	Tipo one-to-one		✓		✓	✓	✓	✓					✓	✓	✓
	Dependencias múltiples			✓				✓				✓			
	Red eléctrica acoplada	✓									✓				
	Transmisión de carga entre redes								✓						
	Mezcla de interacción intra/inter red									✓					
	Mapeo														
	Cadena de suministro														
	Definido por probabilidades														
Métricas	Cantidad de elementos	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓
	Punto de quiebre			✓		✓			✓	✓			✓	✓	
	Tiempo					✓									
	Probabilidad												✓		
	Costo														
	Largo de camino														
	Ratio		✓												
Estudios	Desempeño														
	Tamaño de la componente gigante			✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
	Acoplamiento	✓		✓	✓		✓			✓		✓			✓
	Percolación			✓		✓			✓	✓	✓		✓	✓	✓
	Ataques intencionales					✓	✓	✓			✓				
	Carga y capacidad						✓		✓						
	Optimización											✓			
	Costo											✓			
	Avalancha				✓			✓							
	Tiempo de cascada					✓									
	Recuperación														✓
	Largo de arco													✓	
	Algoritmo genético		✓												
	Laplaciano														
	Tiempo de vida														
	Ataques localizados		✓												✓
	Probabilidad de fallos														
	Delay														
	Cadenas de Markov														
	Contraste con red aislada				✓										
	Clusters funcionales										✓				
	Radio de ataque														✓
	Prob. de detención de cascada														
PMF del tamaño de falla															
Número de componentes															
Información para atacar															
Redes	Simuladas y reales				✓						✓	✓	✓		✓
	Simuladas	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓				✓	

Cuadro 9.15: Tabla resumen: parte III

Papers	[127]	[114]	[42]	[133]	[73]	[44]	[130]	[60]	[103]	[59]	[129]	[134]	[56]	[115]	[31]
Modelos	Tipo one-to-one		✓			✓			✓	✓	✓		✓	✓	
	Dependencias múltiples														
	Red eléctrica acoplada			✓		✓									
	Transmisión de carga entre redes	✓			✓							✓			
	Mezcla de interacción intra/inter red						✓	✓							✓
	Mapeo														
	Cadena de suministro														
	Definido por probabilidades														
Métricas	Cantidad de elementos	✓	✓	✓		✓	✓	✓		✓	✓	✓		✓	✓
	Punto de quiebre	✓	✓	✓						✓			✓		✓
	Tiempo														
	Probabilidad														
	Costo														
	Largo de camino				✓				✓						
	Ratio														
	Desempeño					✓									
Estudios	Tamaño de la componente gigante	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Acoplamiento	✓	✓			✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
	Percolación			✓				✓		✓		✓			✓
	Ataques intencionales	✓	✓		✓		✓		✓		✓			✓	✓
	Carga y capacidad	✓	✓	✓	✓						✓				
	Optimización														
	Costo														
	Avalancha		✓												
	Tiempo de cascada														
	Recuperación					✓									
	Largo de arco												✓		
	Algoritmo genético					✓									
	Laplaciano														
	Tiempo de vida													✓	
	Ataques localizados														
	Probabilidad de fallos							✓							
	Delay														
	Cadenas de Markov														
	Contraste con red aislada														
	Clusters funcionales														
	Radio de ataque														
	Prob. de detención de cascada														
	PMF del tamaño de falla														
	Número de componentes														
Información para atacar												✓			
Redes	Simuladas y reales				✓	✓					✓	✓			
	Simuladas	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓

Cuadro 9.16: Tabla resumen: parte IV

Papers	[27]	[36]	[105]	[84]	[2]	[14]	[89]	[37]	[39]	[116]	[58]	[119]
Modelos	Tipo one-to-one	✓	✓			✓	✓	✓			✓	
	Dependencias múltiples											
	Red eléctrica acoplada								✓			
	Transmisión de carga entre redes									✓		✓
	Mezcla de interacción intra/inter red											
	Mapeo					✓						
	Cadena de suministro			✓								
	Definido por probabilidades				✓							
Métricas	Cantidad de elementos	✓	✓	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓
	Punto de quiebre							✓				
	Tiempo	✓				✓						
	Probabilidad				✓		✓					
	Costo											
	Largo de camino						✓					
	Ratio											
	Desempeño											
	Tamaño de la componente gigante	✓	✓	✓			✓		✓			
	Acoplamiento								✓	✓		✓
Estudios	Percolación	✓					✓		✓			
	Ataques intencionales					✓	✓					✓
	Carga y capacidad			✓		✓				✓	✓	✓
	Optimización					✓						
	Costo					✓					✓	
	Avalancha								✓		✓	
	Tiempo de cascada											
	Recuperación	✓	✓									
	Largo de arco											
	Algoritmo genético											
	Laplaciano											
	Tiempo de vida											
	Ataques localizados											
	Probabilidad de fallos											✓
	Delay											
	Cadenas de Markov				✓							
	Contraste con red aislada											
	Clusters funcionales											
	Radio de ataque											
	Prob. de detención de cascada											
	PMF del tamaño de falla				✓							
	Número de componentes						✓					
	Información para atacar											
Redes	Simuladas y reales		✓			✓	✓			✓		
	Simuladas	✓		✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓

## 9.5. Situaciones anómalas detectadas

Durante la extensa documentación de infraestructura en las 345 comunas de Chile bi-continental, encontramos situaciones que no son compatibles con una red física resiliente. Suponemos que estas situaciones, algunas que se repiten con más frecuencia que otras, suceden por falta de una norma técnica que regule estándares mínimos en los tendidos de cables de telecomunicaciones e infraestructura en general.

Se hace necesario, entonces, normar para evitar que sucedan los problemas que presentamos a continuación, junto con un plan de fiscalización en terreno regular.

## Amarres y ferretería deficiente o en mal estado

La gran mayoría de la fibra óptica en Chile está en tendido aéreo, lamentablemente, nos encontramos bastante con amarres informales, ausentes o en mal estado.



(a) Cable bajo y amarrado con bolsa plástica, Nacimiento



(b) Cable amarrado con cable paralelo, Quinta de Tilcoco



(c) Amarres ausentes cometido edificio publico, San Gregorio



(d) Bolsa de amarre informal llena de agua, Trapi

Figura 9.22: Amarres y ferretería deficiente, ausente o en mal estado

## Cables sin cortes a baja altura

Es bastante frecuente encontrar cables que, no estando cortados y sin tocar el suelo, están mucho más bajo de lo que deberían, permitiendo que sean fácilmente vandalizados.



(a) Cable colgando a baja altura, Andacollo



(b) Cable colgando a baja altura, Lautaro



(c) Cable colgando a muy baja altura, Pelluhue



(d) Cable colgando a baja altura, La Serena



(e) Cable colgando a baja altura, Yungay

Figura 9.23: Cables sin cortes a baja altura

## Cables cortados

Es bastante preocupante la existencia de cables que utilizan kilómetros de franja fiscal para disponer de sus tendidos, pese a que no están siendo usados, ya que están cortados en algún lugar.



(a) Cable cortado, Antofagasta



(b) Cable cortado, Coihueco



(c) Cable cortado, Litueche



(d) Cable cortado, Pichidanguí



(e) Cable cortado, Pucón

Figura 9.24: Cables cortados



(a) Cable cortado, Primavera



(b) Cable cortado, Retiro



(c) Cable cortado, San Carlos



(d) Cable cortado, Purranque

Figura 9.25: Cables cortados

## Cables en el suelo

En algunas partes se han encontrado cables sin cortes pero completamente en el suelo, debido a postes que han caído o a amarres que han cedido. O simplemente por diseño original de la red.



(a) Cable en el suelo, Coyhaique



(b) Cable en el suelo, Diego de Almagro



(c) Cable en el suelo, Puyehue



(d) Cable y mufa en el suelo, Punitaqui

Figura 9.26: Cables en el suelo

## Cometidos al mar

En Chile existe cerca de una docena de cometidos al mar de cables de fibra óptica. Se pudo documentar uno en Aysén. Es necesario tener también una normativa con respecto a este tipo de infraestructura para resguardarla de posibles tsunamis, vandalismo y estrés del cable.



(a) Cable utiliza ramas de la flora local como soporte



(b) Amarres a raíces de manera informal



(c) Cable fuertemente tensionado



(d) Cable ingresa al mar de manera desprotegida

Figura 9.27: Cometido cable fibra óptica al mar, Cisnes

## Desorden en cables

Este fenómeno ocurre también con los cables de distribución eléctrica. Falta disminuir el desorden en el uso de la postación. No tiene sentido profundizar este punto, ya que es un tema conocido por la población en general.



(a) Desorden en cables, El Tabo



(b) Desorden en cables, La Serena

Figura 9.28: Desorden en cables

## Vegetación sin manejo

La falta de poda ha causado innumerables cortes en el pasado, ramas de árboles que al crecer se quiebran y caen, o vegetación en exceso que deteriora la infraestructura de manera acelerada. Se necesita una política de limpieza y mantenimiento regular, para que estos casos no se repitan.



(a) Poste cubierto de vegetación, Colbún



(b) Maleza cubre tendido de fibra óptica, Putaendo



(c) Poste cubierto de vegetación, San Clemente



(d) Maleza cubre tendido de fibra óptica, Talca



(e) Vegetación tensiona fibra óptica, Licantén



(f) Árbol crece entre el cable, Quinchamalí

Figura 9.29: Vegetación sin manejo



(a) Ganchos se rompen y amenazan fibra óptica, (b) Falta de poda en torre celular, Seno Obstrucción Quinchamalí

Figura 9.30: Vegetación sin manejo

## Postes con material añadido fuera de estándar

Algunas veces, en situaciones donde el poste se rompe, inclina o no alcanza subir el cable a la altura deseada, el instalador en vez de reponer con un poste adecuado, añade material de manera artesanal, lo que, claramente, está fuera de toda norma.



(a) Poste con material añadido informal, Marchihue



(b) Poste con apoyo informal, Chanco



(c) Poste con material añadido informal, Pica

Figura 9.31: Postes con material añadido

## Postes en mal estado o ausentes

Uno de los sucesos mas frecuentes es éste, postes en mal estado que dan soporte a los cables de telecomunicaciones en el país. En algunos casos no hay postes donde deberían estar, siendo reemplazados por arboles, ramas, tablas o materiales ligeros que no ofrecen garantía de estabilidad y menos resiliencia. Además, se deben considerar los casos de vandalismo.



(a) Varilla hace de poste, Chaitén



(b) Varillas reemplazando a poste, Coltauco



(c) Palos de cerco rural, usados como poste, Vicuña



(d) Varilla amarrada con alambre, soporta troncal fibra óptica, Hualaihue

Figura 9.32: Postes en mal estado o ausentes



(a) Falta de poste es reemplazado tensionando cable contra árbol, Navidad



(b) Poste fracturado es reparado con alambre simple, Navidad



(c) Varilla es usada para sostener fibra óptica, Navidad



(d) Árbol podado es usado como poste, Parral



(e) Rama de árbol reemplaza poste y ferretería, Pemuco



(f) Tubo de PVC actúa de poste, Toltén



(g) Poste roto en uso, Cabrero



(h) Poste vandalizado, Constitución

Figura 9.33: Postes en mal estado o ausentes



(a) Poste roto en uso, Peumo



(b) Tablas improvisan poste, Puyuhuapi

Figura 9.34: Postes en mal estado o ausentes

## 9.6. Calidad de servicios de telecomunicaciones en zonas extremas y rurales

No era el propósito de este trabajo, pero debido al recorrido y trabajo realizado, se aprovechó de constatar, con testimonios y mediciones en terreno, la calidad de los servicios en varias zonas extremas y rurales. Como resultado, pudimos verificar que existen problemas recurrentes. Por ejemplo, en varias de esas localidades nuestra experiencia de conectividad digital no fue estable, ni rápida y, además, con gran latencia.

La falta de velocidad o de la mayor latencia se explica, al parecer, por las bases de los concursos de telecomunicaciones en esas localidades, las que no satisfacen las expectativas actuales de banda ancha (por ejemplo, pedir que la latencia sea menor a 900 ms, o velocidades máximas bastante bajas).<sup>26</sup>

La situación que vivimos utilizando los Wifi públicos a lo largo del país, en general, fue bastante similar, ya que encontramos conectividad de lenta velocidad y en algunos casos equipos apagados.

Independientemente de las razones de la falta de infraestructura que permita mejores anchos de banda en esas localidades, es evidente que falta fiscalizar mejor y más frecuentemente en estos territorios apartados.

Se recomienda implementar un sistema de monitoreo remoto, que permita a la empresa prestadora del servicio y a SUBTEL, saber inmediatamente cuando ocurra interrupción del servicio. Esto debe ser complementado con visitas a terreno periódicas de los fiscalizadores de SUBTEL.

---

<sup>26</sup>[http://www.subtel.gob.cl/images/stories/apoyo\\_articulos/concurso\\_700/respuesta\\_a\\_consultas\\_700.pdf](http://www.subtel.gob.cl/images/stories/apoyo_articulos/concurso_700/respuesta_a_consultas_700.pdf)

# Capítulo 10

## Bibliografía

- [1] Charles O Adler and Cihan H Dagli. Study of the use of a genetic algorithm to improve networked system-of-systems resilience. *Procedia Computer Science*, 36:49–56, 2014.
- [2] Abdulaziz Alashaikh, David Tipper, and Teresa Gomes. Supporting differentiated resilience classes in multilayer networks. In *2016 12th International Conference on the Design of Reliable Communication Networks (DRCN)*, pages 31–38. IEEE, 2016.
- [3] Ivana Bachmann. Framework de estudio multi-capa para resiliencia de internet chileno. Master’s thesis, Universidad de Chile - Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2017.
- [4] Albert-László Barabási and Réka Albert. Emergence of scaling in random networks. *Science*, 286:509–512, 1999.
- [5] Amir Bashan, Yehiel Berezin, Sergey V Buldyrev, and Shlomo Havlin. The extreme vulnerability of interdependent spatially embedded networks. *Nature Physics*, 9(10):667–672, 2013.
- [6] Yehiel Berezin, Amir Bashan, Michael M Danziger, Daqing Li, and Shlomo Havlin. Localized attacks on spatially embedded networks with dependencies. *Scientific reports*, 5, 2015.
- [7] Alina Beygelzimer, Geoffrey Grinstein, Ralph Linsker, and Irina Rish. Improving network robustness by edge modification. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 357:593–612, November 2005.
- [8] Ramesh Bhandari. *Survivable Networks: Algorithms for Diverse Routing*. Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, USA, 1998.
- [9] Kashif Bilal, Marc Manzano, Samee U Khan, Eusebi Calle, Keqin Li, and Albert Y Zomaya. On the characterization of the structural robustness of data center networks. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 1(1):1–1, 2013.
- [10] Stefano Boccaletti, Vito Latora, Yamir Moreno, Martin Chavez, and D-U Hwang. Complex networks: Structure and dynamics. *Physics reports*, 424(4-5):175–308, 2006.

- [11] Sergey Brin and Lawrence Page. The anatomy of a large-scale hypertextual web search engine. *Computer networks and ISDN systems*, 30(1):107–117, 1998.
- [12] Sergey V Buldyrev, Roni Parshani, Gerald Paul, H Eugene Stanley, and Shlomo Havlin. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks. *Nature*, 464(7291):1025–1028, 2010.
- [13] Duncan S. Callaway, M. E. J. Newman, Steven H. Strogatz, and Duncan J. Watts. Network robustness and fragility: Percolation on random graphs. *Physical Review Letters*, 85:5468, December 2000.
- [14] Wei Koong Chai, Vaios Kyritsis, K Katsaros, and George Pavlou. Resilience of interdependent communication and power distribution networks against cascading failures. *15th IFIP Networking, Vienna, Austria*, 2016.
- [15] Srinjoy Chattopadhyay and Huaiyu Dai. Towards optimal link patterns for robustness of interdependent networks against cascading failures. In *2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pages 1–6. IEEE, 2015.
- [16] Yiping Chen, Gerald Paul, Reuven Cohen, Shlomo Havlin, Stephen P Borgatti, Fredrik Liljeros, and H Eugene Stanley. Percolation theory applied to measures of fragmentation in social networks. *Physical Review E*, 75(4):046107, 2007.
- [17] Zhen Chen, Wen-Bo Du, Xian-Bin Cao, and Xing-Lian Zhou. Cascading failure of interdependent networks with different coupling preference under targeted attack. *Chaos, Solitons & Fractals*, 80:7–12, 2015.
- [18] Xue-Qi Cheng, Fu-Xin Ren, Hua-Wei Shen, Zi-Ke Zhang, and Tao Zhou. Bridgeness: a local index on edge significance in maintaining global connectivity. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2010(10):P10011, 2010.
- [19] Yufei Cheng, M Todd Gardner, Junyan Li, Rebecca May, Deep Medhi, and James PG Sterbenz. Analysing geopath diversity and improving routing performance in optical networks. *Computer Networks*, 82:50–67, 2015.
- [20] Zunshui Cheng and Jinde Cao. Cascade of failures in interdependent networks coupled by different type networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 430:193–200, 2015.
- [21] Reuven Cohen, Keren Erez, Daniel ben Avraham, and Shlomo Havlin. Resilience of the internet to random breakdowns. *Physical Review Letters*, 85:4626, November 2000.
- [22] Reuven Cohen, Keren Erez, Daniel ben Avraham, and Shlomo Havlin. Breakdown of the internet under intentional attack. *Physical Review Letters*, 86:3682, April 2001.
- [23] Zagreb Consultores. Estudio de modelos de inversión y explotación bajo el concepto de asociación público privada. Technical report, 2017.
- [24] Carlos Correa, Tarik Crnovrsanin, and Kwan-Liu Ma. Visual reasoning about social networks using centrality sensitivity. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 18(1):106–120, 2012.

- 
- [25] Michael M Danziger, Amir Bashan, Yehiel Berezin, and Shlomo Havlin. Interdependent spatially embedded networks: dynamics at percolation threshold. In *Signal-Image Technology & Internet-Based Systems (SITIS), 2013 International Conference on*, pages 619–625. IEEE, 2013.
- [26] Jean-Charles Delvenne and Anne-Sophie Libert. Centrality measures and thermodynamic formalism for complex networks. *Physical Review E*, 83(4):046117, 2011.
- [27] MA Di Muro, CE La Rocca, HE Stanley, S Havlin, and LA Braunstein. Recovery of interdependent networks. *Scientific reports*, 6, 2016.
- [28] Gaogao Dong, Ruijin Du, Lixin Tian, and Runran Liu. Robustness of network of networks with interdependent and interconnected links. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 424:11–18, 2015.
- [29] Gaogao Dong, Lixin Tian, Ruijin Du, Min Fu, and H Eugene Stanley. Analysis of percolation behaviors of clustered networks with partial support–dependence relations. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 394:370–378, 2014.
- [30] Arnold Dresden. The fourteenth western meeting of the american mathematical society. *Bulletin of the American Mathematical Society*, 26(9):385–396, 1920.
- [31] Ruijin Du, Gaogao Dong, Lixin Tian, and Runran Liu. Targeted attack on networks coupled by connectivity and dependency links. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 450:687–699, 2016.
- [32] E. Estrada. Network robustness to targeted attacks. the interplay of expansibility and degree distribution. *The European Physical Journal B*, 52:563–574, August 2006.
- [33] Ernesto Estrada. Characterization of 3d molecular structure. *Chemical Physics Letters*, 319(5):713–718, 2000.
- [34] Fenling Feng and Lei Wang. Robustness measure of china’s railway network topology using relative entropy. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2013, 2013.
- [35] Miroslav Fiedler. Algebraic connectivity of graphs. *Czechoslovak mathematical journal*, 23(2):298–305, 1973.
- [36] Alexander A Ganin, Emanuele Massaro, Alexander Gutfraind, Nicolas Steen, Jeffrey M Keisler, Alexander Kott, Rami Mangoubi, and Igor Linkov. Operational resilience: concepts, design and analysis. *Scientific reports*, 6, 2016.
- [37] Dong Gaogao, Du Ruijin, Hao Huifang, and Tian Lixin. Shell attack on interdependent networks. In *Control Conference (CCC), 2016 35th Chinese*, pages 1198–1201. TCCT, 2016.
- [38] Maoguo Gong, Lijia Ma, Qing Cai, and Licheng Jiao. Enhancing robustness of coupled networks under targeted recoveries. *Scientific reports*, 5, 2015.
- [39] Yuqi Han, Zhi Li, Chuangxin Guo, and Yuezhong Tang. Improved percolation theory incorporating power flow analysis to model cascading failures in cyber-physical power system. In *Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 2016*, pages 1–5. IEEE, 2016.

- [40] Sheng Hong, Baoqing Wang, and Jianghui Wang. Cascading failure propagation in interconnected networks with tunable load redistribution strategy. In *Prognostics and System Health Management Conference (PHM), 2015*, pages 1–7. IEEE, 2015.
- [41] Zhen Huang, Cheng Wang, Amiya Nayak, and Ivan Stojmenovic. Small cluster in cyber physical systems: Network topology, interdependence and cascading failures. *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on*, 26(8):2340–2351, 2015.
- [42] Zhen Huang, Cheng Wang, Tieying Zhu, and Amiya Nayak. Cascading failures in smart grid: Joint effect of load propagation and interdependence. *Access, IEEE*, 3:2520–2530, 2015.
- [43] T. Bates J. Hawkinson. Autonomous system. <https://tools.ietf.org/html/rfc1930>, 1996. Accessed: 21-03-2017.
- [44] Xingpei Ji, Bo Wang, Dichen Liu, Guo Chen, Fei Tang, Daqian Wei, and Lian Tu. Improving interdependent networks robustness by adding connectivity links. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 444:9–19, 2016.
- [45] J Jiang, W Li, and X Cai. The effect of interdependence on the percolation of interdependent networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 410:573–581, 2014.
- [46] Assaf Y Keren and Keren Elazari. Internet as a cii-a framework to measure awareness in the cyber sphere. In *Cyber Conflict (CYCON), 2012 4th International Conference on*, pages 1–13. IEEE, 2012.
- [47] B. Kitchenham and S Charters. Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering, 2007.
- [48] Barbara Kitchenham. Procedures for performing systematic reviews. *Keele, UK, Keele University*, 33(2004):1–26, 2004.
- [49] Jon M Kleinberg. Authoritative sources in a hyperlinked environment. *Journal of the ACM (JACM)*, 46(5):604–632, 1999.
- [50] Yakup Koç, Martijn Warnier, Robert E Kooij, and Frances MT Brazier. An entropy-based metric to quantify the robustness of power grids against cascading failures. *Safety science*, 59:126–134, 2013.
- [51] Yakup Koç, Martijn Warnier, Piet Van Mieghem, Robert E Kooij, and Frances MT Brazier. The impact of the topology on cascading failures in a power grid model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 402:169–179, 2014.
- [52] Denés Konig. Gráfok és mátrixok. matematikai és fizikai lapok, 38: 116–119, 1931.
- [53] Vito Latora and Massimo Marchiori. Efficient behavior of small-world networks. *Physical Review Letters*, 87(19):198701, November 2001.
- [54] Li Li, Qing-Shan Jia, Hengtao Wang, Ruixi Yuan, and Xiaohong Guan. A systematic method for network topology reconfiguration with limited link additions. *Journal of Network and Computer Applications*, 35(6):1979–1989, 2012.

- 
- [55] Xin Li, Haotian Wu, Caterina Scoglio, and Don Gruenbacher. Robust allocation of weighted dependency links in cyber–physical networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 433:316–327, 2015.
- [56] Zhang Limiao, Li Daqing, Qin Pengju, Fu Bowen, Jiang Yinan, Enrico Zio, and Kang Rui. Reliability analysis of interdependent lattices. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 452:120–125, 2016.
- [57] Dajie Liu, Huijuan Wang, and Piet Van Mieghem. Spectral perturbation and reconstructability of complex networks. *Physical Review E*, 81(1):016101, 2010.
- [58] Lijun Liu, Yongfeng Yin, Zenghu Zhang, and Yashwant K Malaiya. Redundant design in interdependent networks. *PloS one*, 11(10):e0164777, 2016.
- [59] Run-Ran Liu, Ming Li, and Chun-Xiao Jia. Cascading failures in coupled networks: The critical role of node-coupling strength across networks. *Scientific Reports*, 6, 2016.
- [60] Run-Ran Liu, Ming Li, Chun-Xiao Jia, and Bing-Hong Wang. Cascading failures in coupled networks with both inner-dependency and inter-dependency links. *Scientific reports*, 6, 2016.
- [61] Lijia Ma, Maoguo Gong, Qing Cai, and Licheng Jiao. Enhancing community integrity of networks against multilevel targeted attacks. *Physical Review E*, 88(2):022810, 2013.
- [62] Fragkiskos D Malliaros, Vasileios Megalooikonomou, and Christos Faloutsos. Estimating robustness in large social graphs. *Knowledge and Information Systems*, 45(3):645–678, 2015.
- [63] Yuki Matsui, Hideharu Kojima, and Tatsuhiro Tsuchiya. Modeling the interaction of power line and scada networks. In *2014 IEEE 15th International Symposium on High-Assurance Systems Engineering*, pages 261–262. IEEE, 2014.
- [64] Fernando Morales. Métricas de robustez para el análisis de redes. Master’s thesis, Universidad de Chile - Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2017.
- [65] Edward K. Morlok and David J. Chang. Measuring capacity flexibility of a transportation system. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 38:405–420, July 2004.
- [66] Pamela M. Murray-Tuite. A comparison of transportation network resilience under simulated system optimum and user equilibrium conditions. In L. F. Perrone, F. P. Wieland, J. Liu, B. G. Lawson, and D. M. Nicoland R. M. Fujimoto, editors, *Proc. of the 2006 Winter Simulation Conference*, pages 1398–1405. IEEE, 2006.
- [67] Mark E. J. Newman. A measure of betweenness centrality based on random walks. Technical Report cond-mat/0309045, arXiv.org e-Print archive, <http://arxiv.org/>, 2003.
- [68] Mark E. J. Newman and Michelle Girvan. Mixing patterns and community structure in networks. In Romualdo Pastor-Satorras, Miguel Rubi, and Albert Diaz-Guilera, editors, *Statistical Mechanics of Complex Networks*, volume 625 of *Lecture Notes in Physics*, pages 66–87, Berlin, Germany, 2003. Springer-Verlag GmbH.

- [69] Mark E. J. Newman and Duncan J. Watts. Scaling and percolation in the small-world network model. *Physical Review E*, 60(6):7332–7342, 1999.
- [70] Duy T Nguyen, Yilin Shen, and My T Thai. Detecting critical nodes in interdependent power networks for vulnerability assessment. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, 4(1):151–159, 2013.
- [71] David C Novak, James L Sullivan, and Darren M Scott. A network-based approach for evaluating and ranking transportation roadway projects. *Applied geography*, 34:498–506, 2012.
- [72] TM Ouboter, DTH Worm, RE Kooij, and Huijuan Wang. Design of robust dependent networks against flow-based cascading failures. In *Reliable Networks Design and Modeling (RNDM), 2014 6th International Workshop on*, pages 54–60. IEEE, 2014.
- [73] Min Ouyang and Zhenghua Wang. Resilience assessment of interdependent infrastructure systems: With a focus on joint restoration modeling and analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 141:74–82, 2015.
- [74] Marzieh Parandehgheibi and Eytan Modiano. Robustness of interdependent networks: The case of communication networks and the power grid. In *Global Communications Conference (GLOBECOM), 2013 IEEE*, pages 2164–2169. IEEE, 2013.
- [75] Kuang-Chang Pien, Ke Han, Wenlong Shang, Arnab Majumdar, and Washington Ochieng. Robustness analysis of the european air traffic network. *Transportmetrica A: Transport Science*, 11(9):772–792, 2015.
- [76] Mahendra Piraveenan, Mikhail Prokopenko, and Liaquat Hossain. Percolation centrality: Quantifying graph-theoretic impact of nodes during percolation in networks. *PloS one*, 8(1):e53095, 2013.
- [77] Éva E Plagányi, Ingrid Van Putten, Olivier Thébaud, Alistair J Hobday, James Innes, Lilly Lim-Camacho, Ana Norman-López, Rodrigo H Bustamante, Anna Farmery, Aysha Fleming, et al. A quantitative metric to identify critical elements within seafood supply networks. *PloS one*, 9(3):e91833, 2014.
- [78] Anatolij P Potapov, Björn Goemann, and Edgar Wingender. The pairwise disconnectivity index as a new metric for the topological analysis of regulatory networks. *BMC bioinformatics*, 9(1):227, 2008.
- [79] Yuzhuo Qiu. The effect of clustering-based and degree-based weighting on robustness in symmetrically coupled heterogeneous interdependent networks. In *2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, pages 3984–3988. IEEE, 2013.
- [80] Yuzhuo Qiu. Optimal weighting scheme and the role of coupling strength against load failures in degree-based weighted interdependent networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 392(8):1920–1924, 2013.
- [81] AP Quayle, AS Siddiqui, and SJM Jones. Preferential network perturbation. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 371(2):823–840, 2006.

- 
- [82] Filippo Radicchi. Percolation in real interdependent networks. *Nature Physics*, 11(7):597–602, 2015.
- [83] Filippo Radicchi and Alex Arenas. Abrupt transition in the structural formation of interconnected networks. *Nature Physics*, 9(11):717–720, 2013.
- [84] Mahshid Rahnamay-Naeini and Majeed Hayat. Cascading failures in interdependent infrastructures: An interdependent markov-chain approach. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7, 2016.
- [85] Gyan Ranjan and Zhi-Li Zhang. How to ‘glue’ a robust smart-grid? a "finite-network" theory for interdependent network robustness. In *Energy Infrastructure Cyber Protection, CSIRW11*, 2011.
- [86] VJ Rayward-Smith. Combinatorial optimization by william j. cook, william h. cunningham, william r. pulleyblank and alexander schrijver, wiley, new york, 1998. isbn 0-471-55894-x. no. of pages: 355. price:£ 24.95. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 11(5):273–273, 1998.
- [87] Saulo DS Reis, Yanqing Hu, Andrés Babino, José S Andrade Jr, Santiago Canals, Mariano Sigman, and Hernán A Makse. Avoiding catastrophic failure in correlated networks of networks. *Nature Physics*, 10(10):762–767, 2014.
- [88] Daniel J Rosenkrantz, Sanjay Goel, SS Ravi, and Jagdish Gangolly. Resilience metrics for service-oriented networks: a service allocation approach. *IEEE Transactions on Services Computing*, 2(3):183–196, 2009.
- [89] DF Rueda, E Calle, FA Maldonado-Lopez, and Y Donoso. Reducing the impact of targeted attacks in interdependent telecommunication networks. In *Telecommunications (ICT), 2016 23rd International Conference on*, pages 1–5. IEEE, 2016.
- [90] Eduardo Sáenz-de Cabezón and Henry P Wynn. Measuring the robustness of a network using minimal vertex covers. *Mathematics and Computers in Simulation*, 104:82–94, 2014.
- [91] Ronaldo M Salles and Donato A Marino. Strategies and metric for resilience in computer networks. *The Computer Journal*, page bxr110, 2011.
- [92] Giovanni Scardoni and Carlo Laudanna. Identifying critical traffic jam areas with node centralities interference and robustness. *NETWORKS AND HETEROGENEOUS MEDIA*, 7(3):463–471, 2012.
- [93] Salvatore Scellato, Ilias Leontiadis, Cecilia Mascolo, Prithwish Basu, and Murtaza Zafer. Evaluating temporal robustness of mobile networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 12(1):105–117, 2013.
- [94] Christian M Schneider, André A Moreira, José S Andrade, Shlomo Havlin, and Hans J Herrmann. Mitigation of malicious attacks on networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(10):3838–3841, 2011.
- [95] Christian M Schneider, Nuri Yazdani, Nuno AM Araújo, Shlomo Havlin, and Hans J Herrmann. Towards designing robust coupled networks. *Scientific reports*, 3, 2013.

- [96] Alexander Schrijver. On the history of the transportation and maximum flow problems. *Mathematical Programming*, 91(3):437–445, 2002.
- [97] Darren M. Scott, David C. Novak, Lisa Aultman-Hall, and Feng Guo. Network robustness index: A new method for identifying critical links and evaluating the performance of transportation networks. *Journal of Transport Geography*, 14:215–227, May 2006.
- [98] Paul Smith, David Hutchison, James P. G. Sterbenz, Marcus Schöller, Ali Fessi, Merkouris Karaliopoulos, Chidung Lac, and Bernhard Plattner. Network resilience: A systematic approach. *IEEE Communications Magazine*, 49:88–97, July 2011.
- [99] The Internet Society. Border gateway protocol. <https://tools.ietf.org/html/rfc4271>. Accessed: 02-08-2016.
- [100] Dietrich Stauffer and Amnon Aharony. *Introduction to percolation theory*. CRC press, 1994.
- [101] James P.G. Sterbenz, Egemen K. Çetinkaya, Mahmood A. Hameed, Abdul Jabbar, Shi Qian, and Justin P. Rohrer. Evaluation of network resilience, survivability, and disruption tolerance: analysis, topology generation, simulation, and experimentation. *Telecommunication Systems*, 52:705–736, February 2013.
- [102] Marcell Stippinger and János Kertész. Enhancing resilience of interdependent networks by healing. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 416:481–487, 2014.
- [103] Shiwen Sun, Yafang Wu, Yilin Ma, Li Wang, Zhongke Gao, and Chengyi Xia. Impact of degree heterogeneity on attack vulnerability of interdependent networks. *Scientific Reports*, 6, 2016.
- [104] Somnath Tagore and Rajat K De. Detecting breakdown points in metabolic networks. *Computational biology and chemistry*, 35(6):371–380, 2011.
- [105] Liang Tang, Ke Jing, Jie He, and H Eugene Stanley. Complex interdependent supply chain networks: Cascading failure and robustness. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 443:58–69, 2016.
- [106] Xianglong Tang, Jing Liu, and Mingxing Zhou. Enhancing network robustness against targeted and random attacks using a memetic algorithm. *EPL (Europhysics Letters)*, 111(3):38005, 2015.
- [107] T. Tanizawa, G. Paul, R. Cohen, S. Havlin, and H. E. Stanley. Optimization of network robustness to waves of targeted and random attacks. *Physical Review E*, 71:047101, 2005.
- [108] Ali Tizghadam and Alberto Leon-Garcia. Autonomic traffic engineering for network robustness. *IEEE journal on selected areas in communications*, 28(1):39–50, 2010.
- [109] Ali Tizghadam and Alberto Leon-Garcia. Autonomic traffic engineering for network robustness. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 28:39–50, January 2010.
- [110] Rostislav Vodák, Michal Bíl, and Jiří Sedoník. Network robustness and random processes. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 428:368–382, 2015.

- 
- [111] Bing Wang, Huanwen Tang, Chonghui Guo, and Zhilong Xiu. Entropy optimization of scale-free networks' robustness to random failures. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 363(2):591–596, 2006.
- [112] Jian-Wei Wang and Li-Li Rong. A model for cascading failures in scale-free networks with a breakdown probability. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 388(7):1289–1298, 2009.
- [113] Jianwei Wang, Chen Jiang, and Jianfei Qian. Robustness of interdependent networks with different link patterns against cascading failures. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 393:535–541, 2014.
- [114] Jianwei Wang, Yun Li, and Qiaofang Zheng. Cascading load model in interdependent networks with coupled strength. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 430:242–253, 2015.
- [115] Shuai Wang and Jing Liu. Robustness of single and interdependent scale-free interaction networks with various parameters. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 460:139–151, 2016.
- [116] Xingyuan Wang, Jianye Cao, and Xiaomeng Qin. Study of robustness in functionally identical coupled networks against cascading failures. *PLoS one*, 11(8):e0160545, 2016.
- [117] John Glen Wardrop. Road paper. some theoretical aspects of road traffic research. In *ICE Proceedings: engineering divisions*, volume 1, pages 325–362. Thomas Telford, 1952.
- [118] Jun Wu, Mauricio Barahona, Yue-Jin Tan, and Hong-Zhong Deng. Spectral measure of structural robustness in complex networks. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 41(6):1244–1252, 2011.
- [119] Yongxiang Xia, Wenping Zhang, and Xuejun Zhang. The effect of capacity redundancy disparity on the robustness of interconnected networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 447:561–568, 2016.
- [120] Yan Xin and Wu Yang. Topological and spectral perturbations in complex networks. *Chinese Physics Letters*, 29(12):128901, 2012.
- [121] Ting Yang, Zhixian Lin, and Bo Yuan. A betweenness calibration topology optimal control algorithm for wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013, 2013.
- [122] Shang Yi-Lun. Local natural connectivity in complex networks. *Chinese Physics Letters*, 28(6):068903, 2011.
- [123] Mina Youssef, Robert Kooij, and Caterina Scoglio. Viral conductance: Quantifying the robustness of networks with respect to spread of epidemics. *Journal of Computational Science*, 2(3):286–298, 2011.
- [124] An Zeng and Weiping Liu. Enhancing network robustness against malicious attacks. *Physical Review E*, 85(6):066130, 2012.

- [125] Jianhua Zhang, Xiaoming Xu, Liu Hong, Shuliang Wang, and Qi Fei. Networked analysis of the shanghai subway network, in china. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 390(23):4562–4570, 2011.
- [126] Qiong Zhang, Daqing Li, Rui Kang, Enrico Zio, and Peng Zhang. Reliability analysis of interdependent networks using percolation theory. In *Signal-Image Technology & Internet-Based Systems (SITIS), 2013 International Conference on*, pages 626–629. IEEE, 2013.
- [127] Wenping Zhang, Yongxiang Xia, Bo Ouyang, and Lurong Jiang. Effect of network size on robustness of interconnected networks under targeted attack. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 435:80–88, 2015.
- [128] Xian Zhang, Chris Phillips, and Xiuzhong Chen. An overlay mapping model for achieving enhanced qos and resilience performance. In *Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2011 3rd International Congress on*, pages 1–7. IEEE, 2011.
- [129] Xue-Jun Zhang, Guo-Qiang Xu, Yan-Bo Zhu, and Yong-Xiang Xia. Cascade-robustness optimization of coupling preference in interconnected networks. *Chaos, Solitons & Fractals*, 92:123–129, 2016.
- [130] Da-wei Zhao, Lian-hai Wang, Yong-feng Zhi, Jun Zhang, and Zhen Wang. The robustness of multiplex networks under layer node-based attack. *Scientific reports*, 6, 2016.
- [131] Kang Zhao, Akhil Kumar, Terry P. Harrison, and John Yen. Analyzing the resilience of complex supply network topologies against random and targeted disruptions. *IEEE Systems Journal*, 5:28–39, March 2011.
- [132] Kang Zhao, Akhil Kumar, and John Yen. Achieving high robustness in supply distribution networks by rewiring. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 58(2):347–362, 2011.
- [133] Zhuang Zhao, Peng Zhang, and Hujiang Yang. Cascading failures in interconnected networks with dynamical redistribution of loads. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 433:204–210, 2015.
- [134] Qian Zhu, Zhiliang Zhu, Yifan Wang, and Hai Yu. Fuzzy-information-based robustness of interconnected networks against attacks and failures. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 458:194–203, 2016.