INFRAESTRUCTURA CRÍTICA PARA EL DESARROLLO 2020

CAMARA CHILENA DE LA CONSTRUCCION

INTRODUCCIÓN

El informe Infraestructura Crítica para el Desarrollo (ICD) es el resultado de un esfuerzo gremial permanente que apunta a contribuir en la discusión de políticas públicas en materia de infraestructura. De esta forma, se presenta un análisis en 11 sectores clave para un desarrollo sostenible, agrupados en tres ejes estratégicos: infraestructura basal (recursos hídricos, energía y telecomunicaciones), infraestructura de apoyo logístico (vialidad interurbana, vialidad urbana, aeropuertos, puertos y ferrocarriles), e infraestructura de uso social (hospitales, cárceles y educación).

Para esta oportunidad, se realiza un informe más acotado, que destaca, por un lado, los principales avances y/o cambios respecto a lo realizado en la edición anterior de este (2018-2027) por sector o tipo de infraestructura, sin profundizar sobre estimaciones de inversión para un nuevo horizonte temporal. Por otro lado, se desarrollan temáticas específicas transversales a distintos sistemas de infraestructuras[1].

De esta manera, se toman en cuenta dos aspectos claves en cuanto a sus temáticas principales; el seguimiento del avance de las inversiones materializadas en el período 2018-19 respecto de las estimaciones efectuadas en el informe anterior (2018-2027), en conjunto con analizar cambios normativos u otros que puedan impactar requerimientos futuros, lo cual será abordado con detalle en la próxima versión del informe. Por otro lado, el desarrollo de un capítulo especial en el que se presenta un estudio en profundidad sobre aspectos de riesgo y resiliencia en la infraestructura aplicada al caso chileno.

1 En ese sentido, los posibles cambios en las estimaciones de necesidades de inversión producidos por la propagación del COVID-19, serán analizados en la próxima versión.

Respecto a lo primero, resulta fundamental generar los análisis correspondientes en el tiempo para evidenciar si efectivamente se están cerrando las brechas identificadas, por un lado, y entender si los ritmos de ejecución por sector son suficientes para efectos de alcanzar los niveles de inversión en el horizonte temporal definido de diez años. Como se puede observar de la tabla presentada a continuación, se evidencia un avance agregado de 9% en dos años respecto a los montos identificados en el ICD 2018-2027, situación que, de mantenerse constante en el tiempo, no llegaría ni a suplir la mitad de las brechas identificadas. Este es un primero esfuerzo que aplica este enfoque, el cual se debe mantener en el tiempo para efectos de identificar el nivel de dinamismo que poseen las inversiones en los distintos sectores identificados como críticos en materia de infraestructura.

ICD 2020: Tabla resumen de inversiones y avance 2018-19

Sector	USD Millones		%
	2018-2027	Avance 2018-19	
Recursos Hídricos	18.254	1.531	8%
Energía	8.959	1.871	21%
Telecomunicaciones	24.838	2.463	10%
Total (1)	**52.051**	**5.865**	**11%**
Vialidad Interurbana	20.343	4.449	22%
Vialidad Urbana	60.776	1.251	2%
Aeropuertos	1.659	545	33%
Puertos	5.242	462	9%
Ferrocarriles	4.893	135	3%
Total (2)	**92.913**	**6.842**	**7%**
Salud	10.448	1.811	17%
Cárceles	975	43	4%
Educación	15.693	217	1%
Total (3)	**27.116**	**2.071**	**8%**
Total (1)+(2)+(3)	**172.080**	**14.778**	**9%**

Fuente: CChC.

Respecto a lo segundo, este capítulo especial presenta los conceptos fundamentales del riesgo y resiliencia de las infraestructuras sometidas a amenazas naturales extremas. Este es autocontenido y entrega en su introducción los conceptos esenciales que deben ser conocidos para entender cómo se cuantifica el riesgo y la resiliencia de un activo físico frente a una amenaza natural extrema. El capítulo sigue en cierta forma la estructura de una evaluación de riesgo y utiliza ejemplos para facilitar su comprensión. Luego de introducir los conceptos básicos, se presenta la cuantificación del riesgo y la resiliencia en un marco de incertidumbre para distintas escalas que abarcan desde la estructura como sistema individual hasta la integración de sistemas en una ciudad o región. Luego describe someramente la realidad del cambio climático en Chile y sus consecuencias en la infraestructura para la provisión de agua y la protección de las distintas infraestructuras frente a amenazas derivadas de este fenómeno. El escrito continúa con una descripción de los sistemas críticos considerados a nivel habitacional y de redes de infraestructura, incluyendo aquellos que mayor impacto pueden generar sobre la población. Para entregar un contexto y aplicación se describe brevemente el caso del terremoto del 27F, el que entregó una serie de lecciones muy relevantes en términos del riesgo y la resiliencia de nuestra infraestructura urbana y sus líneas vitales. La siguiente sección sube una escala y presenta el concepto asociado a ciudades resilientes, donde se discute brevemente cómo también el espacio urbano puede alcanzar mayores niveles de resiliencia frente a amenazas naturales para luego pasar a los criterios utilizados en la mitigación de estas amenazas naturales y la reducción del riesgo de desastres. Finalmente, se describe las principales conclusiones de este capítulo y sintetiza las acciones que pueden permitir avanzar en mejorar la resiliencia de la infraestructura y reducir el riesgo de desastres frente a amenazas naturales extremas.

INFRAESTRUCTURA BASAL

CAMARA CHILENA DE LA CONSTRUCCION

RECURSOS HÍDRICOS

1. RESUMEN EJECUTIVO

La realidad de Chile hoy, en comparación con el pasado, muestra un país cada vez más seco, que requiere, y requerirá, cantidades incrementales de agua para asegurar la sustentabilidad social, económica y medioambiental de la nación. Si no se adoptan e implementan los cambios estructurales requeridos en el sector hídrico en el futuro inmediato, y ello no es realizado como una nación moderna, racional, organizada, unida y comprometida con el presente y futuro, nuestro destino probable será pasar, en pocos años, a ser un país con serios problemas de disponibilidad hídrica, sin posibilidades de atender la totalidad de las necesidades básicas derivadas del uso del agua, y con una calidad de vida significativamente disminuida.

La sociedad chilena ha dado un vuelco dramático en su visión acerca del agua, entendida como un recurso natural necesario para el desarrollo de todas las actividades humanas (agua potable y saneamiento, producción de alimentos, producción minera, producción industrial, sustentabilidad de los ecosistemas), adoptando un concepto aún más amplio, donde el agua es, de ahora en adelante, un bien de carácter social. Este nuevo paradigma se orienta a que el uso del agua debe satisfacer el bienestar de todos los habitantes del país, en un plano de trasparencia en su gestión, bajo un ordenamiento de gobernanza racional y eficiente, teniendo como base la propiedad de derechos de aprovechamiento del recurso y en el mercado de los mismos en su calidad de mejor asignador del recurso.

La demanda global por agua en Chile sigue incrementándose en el tiempo, especialmente en los sectores de agua potable y saneamiento, debido al crecimiento de las ciudades y su consecuente necesidad de contar con el recurso en términos cuantitativos y muy especialmente, en términos cualitativos. Paradojalmente, el país está sufriendo el peor episodio de sequía de su historia (entendida como una disminución dramática en las precipitaciones en casi toda la extensión del país), y que ha iniciado en 2020 su undécimo año consecutivo. La información científica disponible indica que esta sequía creciente es una consecuencia del cambio climático global y que posiblemente se mantendrá como un proceso creciente en las próximas décadas.

No vivimos, todavía, en un país desértico (si bien una parte del territorio presenta zonas totalmente desprovistas de precipitaciones naturales, otras zonas reciben una precipitación muchas veces superior a los requerimientos regionales); sin embargo, por ahora la posibilidad de trasvases masivos de agua desde las fuentes de agua del Sur hacia el Norte de Chile está totalmente limitada, tanto por la extensión de nuestro territorio, como por otras importantes restricciones de carácter ecosistémico, legal y tecnológico. Existen iniciativas a nivel de proyectos para la eventual construcción de "carreteras de agua", tanto en la superficie continental (un conjunto de grandes canales de conducción de aguas invernales desde ríos caudalosos, como el Rio Maule y el Rio Bio-bío, asociados con obras de acumulación temporal, como embalses y estrategias de recargas de acuíferos), como submarinas (tuberías ancladas sobre el fondo marino, para conducir parte de los excedentes hídricos de esos mismos ríos antes de su descarga al mar). Las restricciones mencionadas (ecosistémicas, legales, tecnológicas y también financieras) indican que estos proyectos difícilmente podrán iniciarse en el periodo 2020 -2027, ni deben proyectarse como solución a la situación hídrica del país en un futuro previsible.

De esta manera, resulta de extrema importancia el identificar como se está invirtiendo en tanto obras de almacenamiento y regulación como en mejoras de gestión en el uso del recurso, elementos reflejados a cabalidad en el informe Infraestructura Crítica para el Desarrollo (ICD) para el período 2018-2027. Con todo, el avance de las inversiones efectivamente realizadas en el sector Recursos Hídricos durante los años 2018 y 2019, respecto de lo identificado en el informe para el horizonte temporal definido asciende a 8,4%, evidenciando un ritmo de ejecución bastante por debajo de lo requerido para efectos de suplir la brecha estimada. En línea con lo anterior, si se continua en la misma senda de inversiones, se llegaría a 43% de los requerimientos identificados en el informe anterior, acumulando un déficit futuro de US$ 10.360 millones hacia 2027.

Tabla 1. Resumen de avances y requerimientos futuros.

	Avance 2018-19	ICD 2018-2027	% de avance	Déficit futuro
Disponibilidad de Agua	566	7.644	7,4%	4.815
Agua Potable y Saneamiento	770	7.260	10,6%	3.163
Protección contra inundaciones /aluviones	195	3.350	5,8%	2.381
Total	**1.531**	**18.254**	**8,4%**	**10.359**

DEMANDA ACTUAL

Con una población creciente, cuyas demandas por agua aumentan aún más rápidamente que el crecimiento en el número de habitantes, y con una economía nacional en la que la producción agrícola representa cerca del 24% de las exportaciones totales del país, los cambios estructurales esperados en el tema hídrico se hacen vitales y más urgentes que nunca. Las inversiones en infraestructura, educación y extensión de las tecnologías del agua requeridas para aumentar la eficiencia de uso del recurso ya no pueden esperar largos años de discusiones legislativas, ni décadas para la implementación de inversiones, políticas, ordenamientos y sistemas de gestión modernos y eficientes.

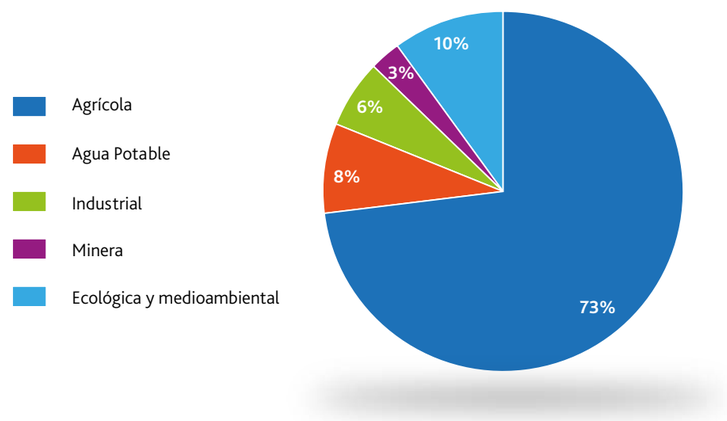
Debemos recordar que el usuario más importante del agua disponible en una cuenca hidrológica es, por lejos, la agricultura. Tanto a nivel mundial como en nuestro país, la producción de alimentos (agricultura regada) utiliza entre un 70 y 80% de toda el agua dulce disponible. Por lo tanto, cualquier esfuerzo destinado a mejorar la eficiencia en el uso del agua para el riego de los cultivos agrícolas, tiene un impacto trascendental y positivo sobre las cantidades de agua que quedan disponibles para las otras actividades humanas.

La demanda de recursos hídricos calculada en el ICD 2018-2027 ha permanecido relativamente inalterada con respecto a la situación actual, salvo por la reducción en las superficies regadas y las restricciones en la dotación de agua en los cultivos motivadas por la sequía. El detalle del consumo por área productiva se presenta a continuación.

Tabla 2. Uso de agua dulce según industria productiva.

Demanda por actividad	[Hm^3 – $año^{-1}$]
Agrícola	16.512
Agua Potable	1.719
Industrial	1.375
Minera	627
Ecológica y medio-ambiental	2.203
Demanda Total	**22.436**

Gráfico 1. Distribución porcentual de la demanda de agua.



La demanda ecológica o medioambiental, que no se encuentra adecuadamente dimensionada en Chile, es una tarea urgente para establecer los caudales que debieran estar en cada uno de los ríos para su escurrimiento final hacia el mar (ICD 2018). En este informe se ha definido que esta demanda corresponde a un 10% de la suma de las demandas de todas las otras actividades que utilizan agua, de acuerdo con el estudio de Poff *et al.* (2010)[1].

La sequía actual ha estimado una reducción de aproximadamente 50.000 hectáreas agrícolas regadas con respecto a la superficie en producción agrícola en 2017 (una reducción del 5%), así como la implementación significativa de riego deficitario en 250.000 hectáreas adicionales (aplicación de agua por debajo del consumo evapo – transpirativo), en las cuales los cultivos han recibido en promedio un 35% menos que sus requerimientos reales, con un fuerte impacto negativo en la productividad y en la calidad de la producción. Así, la reducción estimada en el consumo de agua para riego se estima en 2.816,34 Hm^3/año, esto es, una reducción de 17,05% anual.

Por otra parte, a pesar de las significativas inversiones en infraestructura de riego tecnificado implementadas entre 2018 y 2019, el aumento de la eficiencia de uso del agua para el riego agrícola sigue siendo marginal, lo que resulta paradójico, ya que se ha invertido de forma sistemática en el uso de tecnologías eficientes para el riego; sin embargo, la mala utilización de los equipos de riego y los deficientes planes de mantenimiento de los mismos, afectan significativamente su eficiencia de diseño (80%-90%). La eficiencia de uso actual promedio en la agricultura de riego en Chile ha sido estimada en 54%, con valores máximos de 95% en huertos frutales regados por goteo, y valores mínimos de 20% en cultivos anuales con riego de inundación[2].

Un actor importante en el aumento de la eficiencia de los sistemas de riego agrícola es la Comisión Nacional de Riego[3], que desde el 2016 a la fecha ha logrado incorporar aproximadamente 13.000 hectáreas anuales de superficie bajo riego tecnificado, de las cuales cerca de 8.000 corresponden a un incremento en nueva superficie cultivable, equivalente a un aumento de 1,4% en la superficie regada del país entre los años 2018 y 2019.

Con respecto a los derechos de aprovechamiento de agua (DDA), según la DGA, las transacciones de DDA han tenido un aumento sostenido desde el año 2005 en adelante, concentrando más del 80% entre las Regiones de Coquimbo y Maule. Desde antes de 1980 hasta 2015, se habían registrado un total de 259.105 transacciones de DDA en el país[4]. Según la Base de Datos de DDA concedidos a nivel nacional que mantiene la Dirección General de Aguas (DDA), el número total de otorgamientos anuales en 2017 y 2018 fue de 3.179 y 3.169 solicitudes respectivamente.

En cuanto al sector sanitario, actualmente la cobertura de agua potable en zonas concesionadas alcanza un 99,93%, mientras que el alcantarillado llega a un 97,17%, correspondiendo estas zonas a lugares donde habita cerca del 80% de la población del país. A la vez, cerca de 2 millones de personas viven en zonas rurales, siendo abastecidas por servicios de agua potable rural[5].

El total de clientes usuarios de agua potable supera los 5,4 millones, con un consumo aproximado por cliente de 18 m^3/año. Para soportar esta demanda de agua y servicios de alcantarillado, se cuenta en la actualidad con 256 plantas de tratamiento de agua potable, y cerca de 70 mil Km de red sanitaria, compuesta por 40 mil Km de redes de agua potable, y 30 mil Km de redes de alcantarillado.

1 Poff, N. L., Richter, B. D., Arthington, A. H., Bunn, S. E., Naiman, R. J., Kendy, E., Acreman, M., Apse, C., Bledsoe, B. P., Freeman, M. C., Henriksen, J., Jacobson, R. B., Kennen, J. G., Merritt, D. M., O'Keeffe, J. H., Olden, J. D., Rogers, K., Tharme, R. E., and Warner, A. 2010. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards. Freshwater Biology 55:147-170.

2 CNR-0430 v1 Estudio Básico "Diagnostico de la eficiencia de aplicación del riego en Chile" Gurovich & Asociados s. A., Informe Ejecutivo. Santiago, agosto de 2014

3 Balances de Gestión Integral (BGI). Disponibles en: http://www.dipres.cl/598/w3-propertyvalue-15229.html#instrumentos

4 Mercado del agua en Chile e inscripción y transacciones de los derechos de aprovechamiento de aguas. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Abril de 2018.

5 Plan estratégico Agenda Sector Sanitario 2030. Superintendencia de Servicios Sanitarios. 2019.

2 IDENTIFICACIÓN DE NORMATIVAS Y/O CAMBIOS QUE PUEDAN IMPACTAR A LAS PROYECCIONES DEL ICD 2018.

CAMBIOS NORMATIVOS RELEVANTES

Durante los años 2018 y 2019 se han introducido algunas modificaciones menores, o se encuentran en etapa de discusión legislativa, cuatro normas legales que se relacionan con la gestión y gobernanza del agua:

a. **Modernización Ley de Servicios Sanitarios:** regula los servicios que actualmente no están consignados en la legislación sanitaria y establece un nuevo mecanismo de fijación de tarifas, e incluso genera una fórmula para que la ciudadanía participe del proceso. Hoy cada cinco años las empresas determinan los costos del servicio, esto considerando su tasa de inversión (capital propio más endeudamiento) y de operación. La norma introduce cambios a estos cálculos, por ejemplo, respecto a la tasa de interés que deben obtener las empresas al endeudarse[6].

b. **Regulación de aguas lluvias:** La regulación de sistemas de evacuación y drenaje de aguas lluvias en Chile está normada por la Ley 19.525, del 24 de octubre 1997. Esta normativa fue revisada en la Revista de Derecho Administrativo Económico N.º 15, págs. 133 - 146 [2005] 133 por el Sr. Alejandro Vergara Blanco, en el texto "Potestades administrativas en materia de aguas lluvias". Se encuentra en trámite de discusión parlamentaria un proyecto que regula sistemas de evacuación y drenaje de aguas lluvias, presentado el 18 junio de 2003. Con fecha 16 de enero de 2019 este proyecto de ley fue archivado.

c. **Modernización del Código de Aguas:** El código de Aguas vigente corresponde al Decreto con fuerza de Ley 1122, de fecha 13 de agosto de 1981, cuya última modificación corresponde a la Ley 21.064, de fecha 27 de enero de 2018. Existe un proyecto de Ley que modifica sustancialmente una gran cantidad de normas del Código de Aguas, e ingresada a tramitación en marzo de 2011, pero que al inicio del año 2020 no se ha concretado; el proyecto busca modificar el concepto de derechos de aprovechamiento de aguas, con el objeto de darles un carácter temporal; restringir el uso de ciertos derechos de aprovechamiento de aguas en situaciones de escasez; establecer causales de extinción y caducidad; facilitar la intervención en áreas hidrológicas por parte del Estado; y reformar el sistema de pago de patente por no uso.

d. **Reorientación de la Ley de Fomento al Riego:** La Ley 18.450 de fecha 22 de octubre de 1985, estableció una normativa para subsidiar las inversiones privadas en tecnologías de riego y drenaje, por un periodo de vigencia de 25 años; sus disposiciones se mantuvieron para un nuevo periodo de 15 años, a través de la Ley 20.401 de fecha 4 de abril de 2009, con muy pequeñas modificaciones. La Comisión Nacional de Riego está preparando una nueva versión de esta Ley para su discusión a partir del año 2021, proponiendo cambiar algunas orientaciones y normativas vigentes.

6 Senado: Ley de Servicios Sanitarios. Disponible en: https://www.senado.cl/ley-de-servicios-sanitarios-aprueban-en-general-el-proyecto-y-esperan/senado/2019-12-05/162148.html

INICIATIVAS PÚBLICAS PARA EL DESARROLLO DE INFRAESTRUCTURA

2.1.1 OBRAS MAYORES DE ALMACENAMIENTO DE AGUAS

Una de las medidas que ha dispuesto el Gobierno para enfrentar los efectos del cambio climático es el Plan Nacional de Regulación y Embalses (junio de 2019), el cual persigue almacenar mayor cantidad de aguas lluvias invernales, y eventuales excedentes de escurrimiento por derretimiento de nieve y glaciares.

Con una inversión de US $ 6.084 millones, el proyecto comprende la construcción de 26 nuevos grandes embalses (depósitos artificiales), entre las regiones de Arica y Parinacota y La Araucanía, que permitirían incrementar la oferta de agua para riego y para consumo humano principalmente en zonas de escasez hídrica y desarrollo agrícola deficiente, en la medida de que en esas zonas se produzcan precipitaciones invernales significativas. Cuatro de dichos embalses están en construcción y/o licitación --Valle Hermoso, Chironta, Las Palmas y Punilla- de los cuales el último aún no comienza sus trabajos, mientras que los otros 22 proyectos aún están en fase de estudios.

Una vez finalizadas las obras, se espera que anualmente éstas lleguen a almacenar aproximadamente 2.600[7] millones de metros cúbicos de agua adicionales, que, sumados al almacenamiento actual, totalizarían cuando todas estas obras estén en funcionamiento cerca de 7.800 millones de metros cúbicos de agua almacenada al año, en un horizonte no menor a 15 años.

La capacidad actual de los embalses en Chile es de aproximadamente 12.900 millones de metros cúbicos, con una ocupación cercana al 40% de su capacidad[8] durante el año 2018, y que hoy podría estar bordeando el 30%[9], lo que indica que existen obras de infraestructura de almacenamiento estarían sobredimensionadas para la realidad actual y futura de los regímenes de precipitación. Asociado a esta situación, existen cuencas que carecen de este tipo de obras y que pierden por escurrimiento cualquier excedente de precipitación invernal.

2.1.2 OBRAS SANITARIAS

Se estima que a 2022 deberían destinarse cerca de 700 millones de dólares para el desarrollo, en el corto plazo, de obras de agua potable rural, que actualmente suman 1.902 sistemas ligados al MOP, y que abastecen a 1,7 millones de personas (10% de la población del país). La urgencia radica en que

7 En la actualidad (2019), la cantidad de agua almacenada en los embalses existentes en Chile es de aproximadamente 5.200 millones de metros cúbicos de agua (DGA). Fuente: La Tercera, El Mercurio y Fundación Terram, 2019.

8 El Mercurio, 2018. Disponible en: https://www.emol.com/noticias/Nacional/2018/09/20/920798/Conoce-la-situacion-de-los-principales-embalses-del-pais-y-su-evolucion-en-la-temporada.html

9 Revista del Campo de EL Mercurio, 2019. Disponible en: https://www.elmercurio.com/Campo/Noticias/Noticias/2019/05/30/Embalses-para-riego-con-70-de-deficit-de-agua-acumulada.aspx?disp=1

los efectos de la sequía que afecta a Chile, junto con la incertidumbre del cambio climático, hacen necesario contar con un sistema de distribución del recurso vital que sea seguro, redundante y que no sufra riesgos de corte[10].

2.1.3 TECNOLOGÍA EN DESALINIZACIÓN DE AGUA DE MAR

Como se comentó previamente, el sector minero es aquel que ha invertido, desde hace ya varios años, importantes montos en el desarrollo de plantas de desalinización de agua de mar, principalmente para sus procesos industriales. Sin embargo, en la zona costera de Punta Zorro, comuna de Caldera, se construye la primera planta desaladora estatal, cuya primera fase está prevista que entre en operaciones en agosto de 2020.

"La planta asegurará el consumo de agua potable a 210 mil personas de la Región de Atacama. Con US$ 250 millones de inversión a ejecutar en tres etapas, su objetivo será abastecer de agua potable a las ciudades de Caldera, Copiapó, Chañaral y Tierra Amarilla. Una vez en operación, producirá 1.200 litros por segundo de agua tratada y mitigará la falta de recursos hídricos de Atacama. "La construcción ya registra un 70% de avance", a octubre de 2019"[11].

2.1.4 LEY 21.075 QUE REGULA LA RECOLECCIÓN, REUTILIZACIÓN Y DISPOSICIÓN DE AGUAS GRISES

Ante los evidentes efectos del cambio climático y la, cada vez más, escaza disponibilidad de recursos hídricos para algunas actividades humanas como limpieza de exteriores o el riego de áreas verdes. Se dicta la ley 21.075[12] la cual establece y regula los sistemas de reutilización de las aguas grises, aplicable a áreas urbanas y rurales para abrir campo a un uso más eficiente de los recursos hídricos.

Según la ley, se entiende por aguas grises a aguas servidas domésticas residuales provenientes de las tinas de baño, duchas, lavaderos, lavatorios y otros, excluyendo las aguas negras. Esto plantea ciertos desafíos en términos de instalaciones de obras sanitarias, ya que conlleva la diferenciación o construcción de un sistema de alcantarillado y/o red pública de recolección de aguas grises, diferente a los existentes en la actualidad, que además debe contar con un sistema domiciliario o público, según sea el caso, para el tratamiento de estas aguas.

Una medida como esta, sin lugar a duda, va en la dirección de mejorar la racionalidad en el uso del recurso, y las inversiones necesarias deberían ser significativas. Es entonces, **el reglamento** la herramienta que debería estimular y otorgar todas las facilidades e incentivos para el desarrollo de la infraestructura necesaria para la reutilización de aguas grises. Sin embargo, la reglamentación que permite la aplicación de esta ley aún no está lista, lo que probablemente termine postergando las inversiones en este tipo de obras sanitarias.

10 Ministerio de Obras Públicas, 2019.

11 El Mercurio, Domingo 06 de octubre de 2019

12 Diario Oficial. Disponible en: https://www.diariooficial.interior.gob.cl/publicaciones/2018/02/15/41984/01/1353300.pdf

3 SEGUIMIENTO DE LAS INVERSIONES REALIZADAS

3.1 NIVELES DE INVERSIONES Y BRECHAS

3.1.1 REQUERIMIENTOS EN INFRAESTRUCTURA DE ALMACENAMIENTO Y CONDUCCIÓN EN EMBALSES SUPERFICIALES

Según las metas establecidas en el ICD 2018-2027, las inversiones a realizar para cumplir con las metas establecidas representarían un total de MUS$6.000, con un gasto promedio anual cercano a los MUS$ 600. Este monto "anual" es consistente con la estimación del Ministerio de Obras Públicas (MOP), que ha sido publicada por este mismo organismo durante el año 2019. Sin embargo, los plazos desde la adjudicación hasta la materialización de un proyecto de embalse superficial, en promedio, son de aproximadamente 15 años, por lo que es probable que durante la realización de informes de actualización posteriores al ICD 2018-2027 no sea posible apreciar grandes avances en el desarrollo de este tipo de infraestructura.

Hasta el momento, según la información recopilada, las únicas obras con avances significativos corresponden a infraestructuras destinadas al almacenamiento de agua en los embalses "Valle Hermoso" de la cuenca del Limarí y "Chironta" de la cuenca de Lluta. Ambos embalses suman una inversión aproximada de MMUS$ 220, con una inversión anual promedio cercana a MMUS$ 40. Cabe señalar que el embalse Chironta inició su construcción durante el año 2019 y, a la fecha, posee un 26% de avance. En su conjunto, ambos embalses disponibilizarán recursos hídricos suficientes para regar un total cercano a 4.200 hectáreas[13].

En cuanto al avance total de inversiones, el panorama general presenta una brecha significativa con respecto a la meta planteada en el ICD 2018: un total general de avance, en los últimos dos años, de tan solo 2,2% respecto a lo proyectado a nivel país. Sin embargo, las inversiones se han concentrado en la macrozona norte del país, donde alcanzan un 20,4% respecto a lo proyectado. Esta situación deriva en parte de los largos plazos requeridos para la concreción de un proyecto hídrico específico, desde su levantamiento hasta su puesta en funcionamiento.

Tabla 3. Avance de inversiones en obras de embalse y conducción

Macrozonas	2018-2027	Inversiones efectivamente realizadas	Avance
	US$ Millones	2018 - 2019	
XV-IV	560	114,1	20,4%
V - RM	1.008	No registra	0,0%
VI - IX	3.416	No registra	0,0%
Obras de conducción	1.000	18,3	1,8%
Total	**5.984**	**132,4**	**2,2%**

13 Fuente: Gobierno Regional de Arica y Parinacota y Diario la Región de Coquimbo (2019). Dispobibles en: https://www.gorearicayparinacota.cl/index.php/secciones/1075-inician-obras-de-camino-de-acceso-al-nuevo-embalse-chironta-en-arica http://www.diariolaregion.cl/obras-de-embalse-valle-hermoso-finalizarian-el-primer-semestre-de-este-ano/

3.1.2 NECESIDADES DE INVERSIONES PARA LA GESTIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES; ENTRE LA XV Y VIII REGIÓN

En ICD 2018, se estimaron montos de inversión de aproximadamente US$360 millones para infraestructura de monitoreo y control del uso de aguas superficiales y subterráneas, con el fin de mejorar la gestión del uso del agua, no afectar el equilibrio entre la explotación, la recarga de acuíferos y la disponibilidad en superficie. El desglose de las cifras se presenta a continuación. Para el caso de la agricultura, actividad que presenta el mayor consumo de agua, fueron consultadas diversas fuentes ligadas a empresas dedicadas a proyectos de telemetría para el monitoreo de recursos hídricos, quienes detallan que un porcentaje no mayor al 40% de los proyectos ligados a extracción o conducción de agua presenta algún tipo de instrumento de medición o registro y que, un porcentaje muy menor, cercano al 10%, emplea algún instrumento de monitoreo o control telemétrico.

En base a estos antecedentes se prevé que la brecha de inversión al final del período 2018-2027 sea de aproximadamente US$ 216 millones.

Tabla 4. Inversiones en elementos de medición y control de recursos hídricos superficiales y subterráneos.

	Requerimientos MUS$	Inversión acumulada MUS$	% avance ICD 2018 MUS$
Inv. en elementos de medición y control	360	28,8	8%

Necesidad de inversiones en obras de recarga artificial de acuíferos

La recarga "artificial" de acuíferos es una técnica de gestión hídrica que permite, mediante una serie de infraestructuras pasivas o activas, la introducción de agua a los acuíferos subterráneos proveniente de los excedentes de agua superficial de los meses de baja demanda del recurso, o bien de los excesos de caudal de los ríos en cualquier época del año, tomando siempre en consideración los caudales mínimos ecológicos de las áreas de influencia de los ríos.

En nuestro país, han existido algunas experiencias de recarga de acuíferos: cinco pilotos o áreas de recarga artificial de acuíferos en distintas cuencas, desarrolladas por la CNR, con el objetivo de generar metodologías para identificar posibles formas de recarga, con un costo de 672 millones de pesos. Los pilotos desarrollados lograron tasas de infiltración de entre 2,5 a 4 litros por segundo en el caso de los pozos, 8 a 16 litros por segundo mediante piscinas, y de 80 litros por segundo en intervención directa en esteros.

El último caso conocido a la fecha de este informe es la planta piloto de recarga artificial de la Sociedad del Canal de Maipo (SCM), ubicada en el Campus Antumapu de la U. de Chile, en La Pintana, y que cuenta con dos piscinas y dos pozos de infiltración diseñados para infiltrar e inyectar 50 lts/s y 30 lts/s respectivamente[14], a un costo de 600 millones de pesos. Según José Luis Fuentes[15], jefe del

Departamento de Estudios y Desarrollo de la SCM, durante el año 2016 se inyectaron cerca de 1,5 millones de metros cúbicos al acuífero, ubicado a unos 180 mts de profundidad.

14 Proyecto de Recarga de Acuíferos SCM (2013). Disponible en: https://www.scmaipo.cl/canalistas/wp-content/uploads/2015/03/PRA.pdf

15 Entrevista para Economía y Negocios (2018). Disponible en: http://www.economiaynegocios.cl/noticias/noticias.asp?id=477469

Una vez almacenado el recurso de forma subterránea, este quedaría a disposición de quien lo solicitara; sin embargo, la extracción y posterior uso del agua debiera realizarse en condiciones de alta eficiencia, ya que no tendría sentido invertir en este tipo de infraestructura si su posterior uso fuera para riego de tipo gravitacional u otro sistema de baja eficiencia.

3.1.3 INVERSIONES CON FONDOS DE CNR POR LEY DE FOMENTO A LA INVERSIÓN PRIVADA

La Comisión Nacional de Riego (CNR) es un organismo dependiente de varios ministerios, entre los que se cuentan Agricultura y Obras Públicas. La misión de la CNR es dirigir la acción pública en materia de riego, realizando estudios, programas y proyectos de fomento tendientes a asegurar el incremento y la mejora de la superficie regada del país. Esta institución cobra especial relevancia en el actual contexto de cambio climático.

Según las cifras del ICD 2018-2027, la inversión histórica entre el año 1986 y 2017 creció desde US$ 20 millones hasta US$ 120 millones, proyectándose una curva histórica de inversión anual de US$130 millones, es decir, US$1.300 millones en 10 años. En la actualidad, la tasa de inversión es más bien cercana a los US$ 110 millones anuales, lo que resulta una cifra no muy distante a lo reportado en el informe anterior[16].

Desde la fecha ancla del informe anterior, año 2016, los beneficiarios de la Ley de Riego en conjunto con la CNR han generado inversiones cercanas a los US$ 405 millones, lo que significa un avance de 31% según la meta fijada en el ICD 2018.

Tabla 5. Avance de inversiones Ley de Riego

Necesidades de inversión 2018 – 2027	Inversión acumulada a la fecha	% de avance ICD 2018
US$ 1.300 millones	US$ 405 millones	31%

3.1.4 NECESIDADES DE INVERSIÓN DEL SECTOR SANITARIO

A continuación, una breve descripción de la metodología utilizada para la determinación de la meta del ICD anterior para el sector sanitario:

"Las cifras de inversión propuesta en el Sector Sanitario en 2016 a 2026 fueron tomadas del "Informe de Gestión Sanitaria 2015 del SISS". La proyección de inversiones para el periodo 2018 – 2027 son las proyecciones del periodo 2016 – 2026, de la Super Intendencia de Servicios Sanitarios (SISS). Eso incluye inversiones en Agua Potable, Alcantarillado, Plantas de tratamiento de aguas servidas para todas las empresas concesionarias de Servicios Sanitarios. No incluye la población rural. La cifra de inversión de APR (Servicio Sanitarios Rurales) se ha extraído de datos históricos proporcionados por Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) del MOP".

16 Cifras obtenidas desde la base de datos histórica de la Comisión Nacional de Riego.

Tabla 6. Metas de inversión sector sanitario

Periodo	Zonas urbanas (SISS)		Zonas Rurales (DOH)	Total MMUS$
	Anual *	*Eventos climáticos	*	
2018-2027	326	2.130	1.870	7.260

Fuente: Elaboración propia

*informe anterior

En base a la información pública recopilada en diversas fuentes como el MOP y la SISS, se ha logrado constatar que las inversiones en obras sanitarias desde el 2018 a la fecha del presente informe, corresponden a cerca de US$ 770 millones, lo que correspondería a cerca de un 50% de lo que se debería invertir anualmente, según las metas fijadas en el informe anterior.

Tabla 7. Seguimiento de inversiones en obras sanitarias.

Año	Inv. Zonas urbanas	Inv. Zonas rurales **	TOTAL *	TOTAL ACUM	% Avance 2018-2027
2018	352	169	521	521	7%
2019 ***	132	117	249	770	11%

* SISS: Informe de gestión del sector sanitario 2018 (último disponible)
** inv. en agua potable rural DOH
*** estimación SISS

3.1.5 NECESIDADES DE INVERSIÓN EN AGUAS DRENAJE DE AGUAS LLUVIAS, OBRAS FLUVIALES Y CONTROL ALUVIONAL

Según el ICD anterior, las inversiones anuales calculadas para el período comprendido entre los años 2018 y 2027, y que corresponden a obras de drenaje de aguas lluvias, fluviales y de control aluvional, son del orden de US$ 335 millones, y una inversión para el total del período de US$ 3.350 millones.

Tabla 8. Inversiones en obras de drenaje, fluviales y control aluvional planteadas en el ICD 2018-2027

	Obras de drenaje urbano	Obras fluviales y de control aluvional	Total Anual
Inversión anual ICD 2018	190	145	335

En la actualidad, con los datos recopilados en los Balances de Gestión Integral del MOP, concernientes al rol de la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), muestran que desde el año 2017 los montos de inversión asociados a los ítems previamente mencionados no superan los US$ 100 millones anuales, lo que correspondería a menos de un tercio de los US$ 335 millones previstos.

Tabla 9. Inversiones realizadas en obras de drenaje, fluviales y de control aluvional.

AÑO	MUS$	MUS$	TOTAL
2017	57	38	95
2018	62	37	98
2019 *	42	55	97

(*) Desafío de inversión planteado para el 2019 según el Balance de Gestión Integral de la DOH, 2018.

Las cifras dan cuenta de una diferencia entre los requerimientos anuales y lo efectivamente invertido en este tipo de obras, con una tendencia de inversión cercana a los US 96 millones, lo que resultaría en una brecha de inversión al final del período comprendido entre 2018 y 2027, de US$ 2.390 millones. Hasta la fecha, el avance de las inversiones apenas alcanzaría un 10% de los requerimientos.

Con todo, el resumen de las necesidades de Inversión en Infraestructura hídrica y el avance evidenciado en el período 2018-19 se resume en la siguiente tabla.

Tabla 10. Resumen de avances y requerimientos futuros.

	Avance 2018-19	ICD 2018-2027	% de avance	Déficit futuro
Disponibilidad de Agua (Tabla 2; Tabla 3 y Tabla 4)	566	7.644	7,4%	4.815
Agua Potable y Saneamiento (Tabla 6)	770	7.260	10,6%	3.163
Protección contra inundaciones / aluviones (Tabla 8)	195	3.350	5,8%	2.381
Total	**1.531**	**18.254**	**8,4%**	**10.359**

4 RECOMENDACIONES DE ACCIÓN Y/O PROPUESTAS DE MEJORA

1. La única estrategia posible para lograr la adaptación de las actividades humanas a la creciente limitación en la disponibilidad hídrica, es la implementación de inversiones orientadas al uso eficiente del agua que precipita y se encuentra en cada cuenca hidrográfica, entendiendo que toda esta agua, tanto en forma de lluvia y de hielo, así como el agua subterránea que puede extraerse desde pozos profundos, es una sola, y su gestión necesariamente debe ser totalmente integrada y en la cual deben, por una obligación moral, social y política, participar activamente todos los usuarios del agua, con solidaridad y teniendo como objetivo fundamental, el bienestar del país y de sus habitantes.

2. Existe una necesidad imperiosa de contar con medios de medición y transmisión de información en tiempo real de los caudales de las fuentes de agua, y también de las extracciones efectivas por parte de los usuarios (oferta y demanda). Para esto, es necesario que se realicen todos los esfuerzos para lograr la mayor colaboración entre las organizaciones de usuarios de aguas (OUA's) y el sector público, y crear un centro u organismo que sea capaz de centralizar y procesar toda la información disponible de forma oportuna y eficiente, transformándola en conocimiento útil como herramienta fundamental para la toma de decisiones de gestión del recurso hídrico.

3. Es necesario invertir en herramientas que permitan un adecuado procesamiento de la información, basadas en inteligencia artificial, que sean capaces de modelar y/o detectar anomalías que pudieran afectar la correcta gestión del recurso hídrico, y que a la vez ayude a las autoridades y usuarios en la toma de decisiones con mejor información.

4. Se debería establecer un plan de inversiones basado en diversos escenarios futuros, derivados del cambio climático, ya que, como se ha mencionado previamente en este informe, los cambios en los regímenes pluviométricos han generado que algunas infraestructuras de almacenamiento parezcan, bajo la realidad actual, estar sobredimensionadas.

5. Hay que revisar los planes de inversión en obras de infraestructura para riego predial, ya que, si bien se ha mejorado en cuanto a la transformación de superficie de riego bajo sistemas de baja eficiencia hacia sistemas de alta eficiencia, existen aún problemas graves en la operación de los equipos de riego. Los proyectos de fomento al riego deberían contar con un presupuesto destinado a la preparación y certificación de los operadores de los equipos de riego, para así garantizar un buen uso de los recursos hídricos en huertos productivos.

6. El control de aluviones, mediante el mejoramiento de los cauces naturales, representa un foco de inversión indispensable, sin que exista a la fecha una política de priorización de proyectos sobre esta temática.

7. Infraestructura sanitaria. Mejoramiento de redes de agua potable que pierden hasta un 40% del agua potabilizada en plantas durante su conducción (aguas no facturadas). Se requiere también de inversiones en infraestructura de saneamiento a nivel terciario para usar el agua servida para el riego de los cultivos agrícolas sin exponer a la población a riesgos sanitarios.

8. Aguas grises, acelerando la creación y aprobación del reglamento que regule el uso de aguas grises y fomentando las inversiones en infraestructura que faciliten el posterior reúso de este recurso.

9. Drenaje urbano, como disposición de las aguas lluvias que escurren, tanto para evitar inundaciones como para su almacenamiento como fuentes de agua adicionales para el riego y los usos sanitarios.

ENERGÍA

1. RESUMEN EJECUTIVO

La actual legislación eléctrica, se ha diseñado con el objeto de organizar el mercado eléctrico nacional siguiendo un modelo de prestación de los servicios eléctricos a través de empresas privadas que operan tanto en mercados competitivos, como en segmentos no competitivos sometidos a regulación de precios y de calidad de suministro.

Dentro de los avances normativos, se encuentran el reconocimiento de la existencia de competencia en generación y monopolios en los sectores de transmisión y distribución. La normativa ha hecho uso de una metodología marginalista para fijar tarifas, definiendo la existencia de precios regulados y precios libres según el nivel de consumo. Estos avances se han realizado con el fin de asegurar la eficiencia económica, seguridad, calidad, suficiencia, y sustentabilidad social y medioambiental del suministro eléctrico.

Bajo esta visión, se han definido diferentes segmentos o ámbitos de actividad en algunos de los cuales se privilegia la libertad de emprendimiento y el establecimiento libre de los precios cuando las condiciones naturales de los mercados lo permiten, mientras en otros segmentos, en los cuales se verifica la existencia de monopolios naturales, se aplican regulaciones tendientes a simular condiciones de precios y calidad similares a los que se obtendrían en condiciones de competencia. De este modo, la legislación vigente reconoce tres segmentos en la cadena de valor de la energía eléctrica: la generación, la transmisión y la distribución de la electricidad, separados en temas tanto de regulación como de su propiedad.

Respecto al avance de estos tres tipos de inversiones respecto a lo estimado en el ICD 2018, se puede observar un ritmo de ejecución robusto y claro de cara a ir supliendo brechas futuras en el horizonte de estimación temporal definido. De esta manera, queda de manifiesto que, de continuar con las tasas de inversión exhibidas durante 2018-19, la meta de inversiones podría lograrse en un menor tiempo.

Tabla N°1: Resumen inversiones ICD 2018 y avance 2018-19

Tipología	Avance 2018-19	2018-2022	2018-2027
Generación	1.139	4.717	5.228
Transmisión	374	977	1.793
Distribución	358	925	1.938
Total	**1.871**	**6.619**	**8.959**

2. IDENTIFICACIÓN DE NORMATIVAS Y/O CAMBIOS QUE PUEDEN IMPACTAR LAS PROYECCIONES DEL ICD 2018-2027

2.1 COMPETITIVIDAD DEL MERCADO ELÉCTRICO EN CHILE

En relación a los niveles de competencia en el mercado eléctrico en Chile, en el estudio encargado por la Fiscalía Nacional Económica, "La Competencia en el Mercado Eléctrico Mayorista en Chile" de Fabra et al. (2014), se concluye que la competencia en las subastas de licitación no es perfecta en la medida que las ofertas de los generadores no son cercanas al costo de oportunidad de proveer energía. Como conclusión del mismo estudio, se han descartado conductas del tipo colusivas ya que las ofertas no son cercanas a los precios techo de la subasta. Por otro lado, los resultados del estudio demuestran que el comportamiento de la oferta es consistente con modelos de competencia oligopolística, que predicen que, en presencia de límites de capacidad, cuando las empresas tienen alta certidumbre de poseer capacidad o poder de mercado para condicionar el precio competitivo del mercado en alguna fracción de la energía que ofrecen, se situarán entre el costo de oportunidad y precio techo de la subasta. El hecho de que este tipo de competencia genere precios medios superiores al coste de oportunidad demuestra que las subastas no son capaces de transmitir al consumidor final los precios del mercado mayorista. Al analizar la competencia de las empresas en el mercado de los clientes libres es, ceteris paribus, incluso más débil que la competencia en las licitaciones. Las diferencias observadas entre los precios que se pagan en ambos contextos (licitaciones y mercado de clientes libres) son más marcadas para los clientes de menor tamaño, que pagan precios superiores a los pagados por los grandes clientes. Con estos resultados se puede apreciar que la falta de competencia impide que los precios reflejen los costos y que los impactos negativos sean asimétricos entre consumidores.

En esta línea, a continuación, se analizan tres temáticas que adquieren relevancia en cuánto a la búsqueda de mejoras en la competitividad del sector eléctrico nacional, como lo son el impuesto a las emisiones de CO2 en la generación eléctrica, la norma de gas inflexible y los servicios complementarios (SSCC).

2.2 IMPUESTO A LAS EMISIONES DE CO_2 EN LA GENERACIÓN ELÉCTRICA

El objetivo principal de las políticas de cambio climático basadas en el mercado es dar a las empresas y consumidores incentivos económicos para reducir las emisiones de carbono. Bajo una serie de supuestos, tales políticas pueden lograr los objetivos deseados de una manera rentable. Sin embargo, características como el poder de mercado, la congestión de la transmisión, la fuga de emisiones de carbono y las excepciones pueden reducir su efectividad.

Díaz et al. (2020) llevan a cabo un análisis de equilibrio a largo plazo de un impuesto al carbono con restricciones de transferencia y reglas de pago lateral, tal como la política impositiva actual para las emisiones utilizada en el mercado eléctrico chileno. Los efectos a corto plazo de la política son bastante evidentes porque no altera el despacho y el precio de la electricidad. Sin embargo, sus implicancias a largo plazo son mucho más difíciles de anticipar, incluso en un entorno perfectamente competitivo. Los resultados indican que los efectos de la política pueden ser ambiguos en términos de emisiones de carbono e ingresos fiscales, sin embargo, los precios promedio de electricidad a largo plazo son (en la mayoría de los casos) más altos bajo un impuesto al carbono con restricciones administrativas que bajo un impuesto a la oferta estándar. Este hallazgo va en línea opuesta del objetivo del regulador de imponer tales restricciones para limitar los aumentos de precios para los consumidores. En realidad, las restricciones de transferencia y las reglas de pagos secundarios proporcionan señales de precios distorsionadas a corto plazo que conducen a la entrada y operación ineficientes de la generación de energía. Permitir que el precio del carbono cambie el despacho y el precio de la electricidad es la alternativa más efectiva para lograr la eficiencia productiva a largo plazo.

Un hallazgo preocupante es que estas restricciones pueden ser particularmente dañinas para las inversiones en tecnologías de energía renovable. Por ejemplo, para un impuesto de US$ 15 / tCO2, las inversiones en capacidad renovable bajo un impuesto con restricciones son 79% más bajas que bajo un impuesto a la oferta estándar. Eliminar las reglas de pagos secundarios, pero mantener la restricción de transferencia produce más desarrollos en energías renovables, pero estos siguen siendo 40% más bajos que bajo un impuesto a la oferta estándar. Si bien es ineficiente, el impuesto aún conduce a una reducción de las emisiones de carbono a medida que se aumenta la tasa impositiva en el caso base. En conclusión, si las emisiones de carbono tienen un precio bajo, entonces la solución es ponerles un precio adecuado, en lugar de alterar el diseño del mercado, y posiblemente, alterar la eficiencia en la generación intensiva en carbono.

Finalmente, se encuentra que el regulador podría enfrentar un problema de incentivos para migrar la política actual a un programa estándar de impuesto al carbono o de mercado de carbono, si el impuesto actual se implementó únicamente con fines fiscales, ya que, con la política impositiva actual, los ingresos fiscales pueden ser mucho más altos que bajo un impuesto al carbono estándar. Un factor importante que podría estar explicando las falencias del diseño de la política impositiva a las emisiones de CO_2 es que el impuesto al carbono en Chile no tiene sus fundamentos en una política que apunte a reducir las emisiones de GEI, ni tuvo como foco central el desarrollar o potenciar una economía sustentable. Como su nacimiento se dio en un contexto marcado por exigencias sociales, principalmente de educación, el impuesto nace como otra forma de recaudación, que no estaría cumpliendo siquiera con la meta de reducir de forma importante las emisiones de GEI.

Proyecto de Ley de Modernización Tributaria

El Proyecto de Ley de Modernización Tributaria mantiene la regulación en materia de tarifas eléctricas, que restringe el efecto del impuesto a las emisiones contaminantes en el costo marginal instantáneo de energía, contemplando que finalmente este impuesto sea pagado por todas las empresas eléctricas que efectúen retiros de energía del sistema a prorrata de sus retiros, sea que emitan emisiones contaminantes o no.

Lo anterior produce que empresas de generación de energías renovables pagan de manera indirecta el impuesto a las emisiones contaminantes, por el uso del sistema eléctrico, siendo que no generan emisiones contaminantes, convirtiéndose el impuesto en un instrumento recaudatorio y no correctivo.

Como se concluye en la investigación analizada, el impuesto sería más efectivo en la disminución de emisiones de CO_2, si se incorporara el impuesto de las emisiones en el costo marginal instantáneo de energía y no se hicieran las compensaciones ya señaladas. Se sugiere así, que el impuesto se refleje en el costo de la energía y asimismo se elimine la regla de pagos compensatorios. Es decir, sería deseable y más eficiente que el impuesto se vea reflejado en los precios. Lo anterior, respetando un principio de gradualidad y la correspondencia necesaria con los equilibrios de los contratos vigentes, particularmente los regulados. Así, para el sector eléctrico esto implica que el valor del impuesto se traspase íntegramente al costo variable y por ende al costo marginal o instantáneo, en la medida que esto también se refleje en los contratos vigentes.

2.3 NORMA DEL GAS INFLEXIBLE

La norma vigente desde mediados de 2019 permite que el Coordinador Eléctrico Nacional (CEN)[17], organismo que coordina la operación del sistema, conozca el costo real del gas natural que usan las generadoras y planifiquen con antelación el despacho de ese tipo de unidades. La norma estipula que las empresas que tengan contratos de suministro de gas en modalidad *take or pay* deberán informar al CDEC la flexibilidad o inflexibilidad de su suministro[18], ya que las segundas serán despachadas en base, es decir, operarán a todo evento, mientras que los segundos seguirán bajo los criterios actuales de despacho a partir de criterio económico[19]. Esta forma de operar será factible porque los contratos inflexibles serán considerados a costo cero[20], con lo cual el gas terminará siendo más barato que el carbón y lo desplazará. Lo mismo sucederá con el diésel.

En otras palabras, la norma sostiene en su parte esencial que las empresas que tengan contratos de GNL de carácter inflexible y usen ese gas para la operación de sus centrales, tendrán privilegios de despacho en el sistema y el coordinador les asignará un valor cero, con lo que no afectarán el costo marginal.

La declaración de costos variables nulos por parte de ciertas generadoras a GNL responde básicamente a dos factores. Primero que todo un ingreso masivo de centrales con costos variables de operación más bajos al sistema (principalmente centrales a carbón) que han desplazado el despacho de las centrales a gas natural, y en segundo lugar, un exceso combustible almacenado que, conforme se acerca la fecha de llegada de barcos metaneros, y por tanto un nuevo suministro del recurso, debe de utilizarse obligatoriamente debido a que de lo contrario deberá ser venteado, es decir presenta un costo de oportunidad nulo.

Las señales que presenta dicho fenómeno son desfavorables para la inversión debido a que básicamente dejan entrever que los recursos utilizados en este tipo de generadoras no están siendo usados de forma eficiente. Así y todo, es necesaria la presencia de estas centrales ya que reúnen una serie de condiciones que las hacen más competitivas frente a otras tecnologías. Por un lado, tienen costos variables menores que las centrales diésel, por lo que podrían suministrar potencia en las horas punta, reduciendo los costos totales de operación para el sistema. Por otra parte, tienen holgadas restricciones de toma de carga, lo que las hace ser preferidas por sobre las centrales a carbón[21].

Respecto a la operación del sistema, y en base a lo presentado anteriormente surge la inquietud sobre si la forma en la que se están coordinando los recursos está siendo realmente eficiente. El hecho de tener una correcta operación del sistema no sólo es importante por la suficiencia de suministro, sino que además es fundamental para la correcta determinación de los costos marginales, los cuales tanto en la teoría como en la práctica debiesen ser indicadores o señales de confianza para el mercado, en base a los cuales se puedan tomar decisiones de inversión que ayuden al desarrollo del sector y del país. Es por ello que creemos que sí es cuestionable la aplicación de la teoría marginalista, por cuanto ante la ocurrencia de eventos furtivos, o "fallas de mercado", este indicador se ve alterado sin reflejar fielmente la situación del desarrollo del sector, como es el caso que se experimenta hoy en día en Chile.

17 Este organismo es el encargado de coordinar la operación del sistema eléctrico donde cohabitan cuatro tipos de usuarios: generadoras, transmisoras, distribuidoras y grandes consumidores industriales, como las mineras. Las direcciones de operación y peajes toman las decisiones a partir de criterios generales fijados por el directorio, pero priorizando el despacho desde las centrales de operación más baratas hasta las más caras.

18 Se entenderá que un volumen tiene condición de inflexibilidad si éste no puede ser destinado a un uso distinto al de generación del sistema eléctrico nacional en la Ventana de Información, sin causar un perjuicio económico relevante a la Empresa Generadora GNL calificado como tal por la misma. Para tales efectos, la Empresa Generadora GNL deberá indicar al Coordinador el perjuicio económico relevante que se podría causar, acompañando los antecedentes que demuestren dicha situación, considerando exclusivamente el volumen de insumo incluido en los Acuerdos de Suministro declarado como inflexible. El perjuicio debe ser determinado comparando la utilización del GNL en condición inflexible versus la mejor alternativa para el mismo. La utilización del volumen declarado como inflexible no debe corresponder al resultado de una optimización de la posición comercial de la empresa que lo declarara en el mercado de transferencia de energía y potencia. Asimismo, la Empresa GNL deberá demostrar ante el Coordinador que realizó sus mejores esfuerzos para evitar o minimizar el volumen declarado en condición inflexible ya sea modificando las condiciones contractuales, búsqueda de alternativas de ventas, capacidad almacenamiento o cualquier otra acción que permita este objetivo.

19 En el caso de los contratos con suministro flexible, este combustible será contabilizado a su costo variable, siguiendo el criterio actual, con lo cual las centrales que usen esa porción del hidrocarburo se despacharán después del carbón, en caso de que la demanda eléctrica lo requiera. Cada mes las generadoras tendrán que informar su disponibilidad de gas natural con un horizonte de seis meses en el cual no podrán realizar ajustes posteriores. Este plan está en línea con limitar el espacio para especular con los precios del gas natural, aprovechando el costo alternativo asociado al mercado secundario que abrió la exportación a Argentina.
De acuerdo con el juicio experto, en primera instancia, las eléctricas no estuvieron dispuestas a "abrir" sus contratos de abastecimiento de gas -dando a conocer precios, situación de abastecimiento y otras variables comercialmente sensibles-, condición que el gobierno impuso para llevar adelante el cambio regulatorio.

20 Las Unidades GNL que se encuentren operando con un volumen en condición de suministro inflexible, deberán ser consideradas para efectos del cálculo del costo marginal del sistema con un costo variable total igual a cero.

21 ¿Es cuestionable la aplicación de la teoría marginalista en Chile? Disponible en: http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno15/marg/IntegracionGNL.html

2.4 SERVICIOS COMPLEMENTARIOS (SSCC)

En un sistema eléctrico, el balance oferta-demanda debe realizarse continuamente en tiempo real. Así también, los clientes finales requieren un nivel de tensión dentro de la banda definida en la Norma Técnica. Por lo anterior, el sistema eléctrico debe ser capaz de responder ante contingencias, de manera de minimizar la ocurrencia de apagones totales o parciales. Así, luego de ocurrida la falla, se debe recuperar la condición normal usando coordinadamente el equipamiento eléctrico especializado.

Los Servicios Complementarios (SSCC) son aquellos productos necesarios para garantizar la seguridad, calidad y eficiencia económica del sistema, ya que permiten al operador del sistema tratar con las incertidumbres asociadas al suministro eléctrico (Rudnick, 2015). Dentro de ellos está la regulación de frecuencia, regulación de tensión, reserva del sistema y partida autónoma[22].

Asignación del Costo de los Servicios Complementarios

El cálculo de los desvíos entre la (re)programación vinculante y el despacho final en tiempo real permite asignar de manera eficiente los costos de las reservas (lo que a su vez constituye un incentivo clave para los agentes para minimizar sus desvíos).

Por el momento, la metodología vigente en el contexto chileno sólo considera potenciales contingencias causadas por la generación convencional para el caso del cálculo de la reserva primaria, y por el momento no considera un requerimiento de reserva relativo (e imputable) a las renovables. De momento, el método utilizado en Chile está enfocado a los posibles desvíos de la demanda eléctrica, que cubren una parte muy relevante del volumen total de reserva. No obstante, a medida que aumente la componente renovable en el mix de generación, esta metodología tendrá que evolucionar para incluir también los posibles fallos de las unidades generadoras y los posibles errores en los pronósticos de disponibilidad de las fuentes renovables. Y consecuentemente, cuando eso ocurra, se deberá asignar la parte correspondiente del costo a estas nuevas tecnologías.

En relación con los servicios complementarios, las experiencias internacionales apuntan hacia una reducción progresiva o eliminación de excepciones de las responsabilidades de balance para las tecnologías renovables, de manera de ser ellas expuestas a la señal eficiente transmitida por el precio de balancear el desequilibrio.

Análisis normativo

La Ley Nº 20.936 definió que son solo las empresas con retiros (empresas generadoras con contratos) las que deberán pagar por los SSCC, y en caso de nuevas inversiones serán los clientes finales libres y regulados quienes deberán pagarlas.

La asignación de los costos es un eje central de la discusión en torno a los Servicios Complementarios. En ese sentido, la asignación de costos debe incentivar a que todos los agentes del mercado utilicen las mejores herramientas y tengan la mejor información para pronosticar los recursos energéticos renovables y también los clientes logren la mejor forma para proyectar sus demandas. Esto se lograría asignando los costos de SSCC a las instalaciones cuyo comportamiento en la operación obliga a asumir mayores recursos técnicos, es decir, mayores costos de SSCC.

Así, en materia de asignación de pagos por los Servicios Complementarios, debería imperar un principio de causalidad, el que consiste en que quien causa el desvío paga, ya sea que el requerimiento de activación de SSCC provenga por parte de la oferta o la demanda. La implementación de tal propuesta conlleva también a establecer, a nivel de programación, reprogramación y despacho real, lo que se denomina el "despacho vinculante".

Bajo esta visión, la remuneración por los SSCC, debiese ser asumida por todos los actores que hacen uso del sistema, ya que sería poco intuitivo establecer que los SSCC deben ser pagados por las empresas de generación que realizan retiros del sistema, pues se podría llevar a que existan centrales de generación ERNC que aumenten las necesidades de SSCC (por ejemplo, en términos de montos reservas) y que no participen en los pagos de estos servicios.

Por otro lado, hay quienes sostienen que, si los costos son asignados a la demanda y a los desarrolladores de energías renovables variables, sería una medida que podría resultar contradictoria cuando se consideran las metas de ERNC existentes a nivel nacional. Por otra parte, un esquema en esa línea podría parecer "incompleto" pues solo sanciona el impacto negativo de la incertidumbre asociada a las ERNC sin reconocer sus beneficios socio-ambientales.

3. SEGUIMIENTO INVERSIONES 2018-19

Los ritmos de ejecución exhibidos los últimos años por el sector han sido especialmente altos, en particular en lo que respecta a generación. Lo anterior claramente se debe al ingreso de cuantiosas inversiones en materia de energías renovables no convencionales. De esta manera, de mantenerse esta situación en el tiempo, no se vislumbran futuros déficit en esta materia a nivel agregado para nuestro país, aunque es importante profundizar en mejoras estructurales del sistema, tanto en materias técnicas económicas como normativas, como se exhibió en el punto anterior.

Tabla 2: Estimaciones ICD 2018 y avance inversiones 2018-19

Tipología	Avance 2018-19	2018-2022	2018-2027	% Avance
Generación	1.139	4.717	5.228	22%
Transmisión	374	977	1.793	21%
Distribución	358	925	1.938	18%
Total	**1.871**	**6.619**	**8.959**	**21%**

4. RECOMENDACIONES TÉCNICAS Y NORMATIVAS

Respecto del impuesto al carbono en Chile, la evidencia indica que la implementación actual del impuesto al carbono en Chile es ineficiente en comparación con las políticas de emisiones sin pasar por restricciones y reglas de pago lateral. Además, se encuentra que aumentar el nivel de impuestos

22 Para una descripción detallada, ver: http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno17/pasada/sscc.html

bajo la implementación actual en Chile produce, en general, precios promedio de electricidad más altos y niveles de emisiones más altos que bajo un impuesto estándar al carbono. De hecho, según la política actual en Chile, las emisiones de carbono pueden incluso aumentar como resultado de un aumento del nivel impositivo. Esta implementación también es perjudicial para el desarrollo de tecnologías libres de carbono con bajos costos marginales, como la eólica y la solar, que también deben absorber algunos cargos de carbono para financiar los pagos secundarios para los generadores que emiten dióxido de carbono en períodos en que los precios no son suficiente para recuperar sus costos totales, lo cual se contradice con los objetivos actuales de energías renovables y ambientales del país.

Respecto a la norma del gas inflexible, surge la inquietud sobre si la forma en la que se están coordinando los recursos está siendo realmente eficiente. Según juicio experto[23], se deben analizar las posibles consecuencias que tendría para el sistema la apertura de un mercado "secundario" de gas natural con las exportaciones hacia Argentina. Si bien esta iniciativa está en línea con la intención de la autoridad energética de aumentar el uso de este hidrocarburo y disminuir el uso de carbón y diésel, el detalle de la información que las generadoras deben entregar al coordinador del sistema podría "no ser atractivo" para algunas de las empresas, ya que la norma está exigiendo información que puede quitar cierta flexibilidad a las generadoras respecto del manejo de sus contratos, y esto pudiera no ser tan atractivo para algunas de ellas. Finalmente, no es tan claro el uso que se le pueda dar al gas natural en hidrologías altas, si bien estos escenarios cada vez son menos probables.

Por lo demás, surgen interrogantes sobre cómo esta propuesta de norma de usos de GNL condicionará el desarrollo de nuevos proyectos de generación con este combustible y cuán competitivas serán las ofertas de precios de generación de GNL en las licitaciones futuras.

Finalmente, en materia de servicios complementarios, se tendría que modificar el Artículo 72°-7 de la LGSE, modificación que debe considerar los siguientes aspectos:

- Señalar que los recursos cuya activación como servicio complementario es necesaria de ejercer, y cuya infraestructura de soporte esté presente en el sistema, se programarán y valorizarán de acuerdo a un proceso de optimización que resuelva simultáneamente los despachos y la asignación de recursos para SSCC.
- Establecer que la remuneración de los servicios complementarios será cargada a los generadores o a la demanda en función de si su activación ha sido motivada por efectos originados respectivamente por estos agentes, por aplicación de un principio de causalidad.

En términos de las Modificaciones en el Reglamento de Servicios Complementarios, se tendría que:

- Establecer que el costo de mantención de las reservas durante la operación será remunerado por los generadores o por la demanda dependiendo de si las reservas respectivas se han dispuesto para absorber variaciones o errores de pronóstico producidos por estos agentes.
- Establecer que el costo de ejercicio de las reservas distingue los casos de aumento de generación y disminución de generación.

23 Hugh Rudnick, profesor de la Universidad Católica, director de Systep y experto en regulación del sector eléctrico.

TELECOMUNICACIONES

1. RESUMEN EJECUTIVO

El sector telecomunicaciones en Chile se ha transformado en uno de los rubros de la actividad económica cuyo dinamismo está marcado por el crecimiento constante, una alta competencia entre empresas concesionarias, innovaciones constantes en tecnología, y eficiencias que se reflejan en una reducción en la oferta de precios para los consumidores finales.

La importancia del sector lo ha llevado a transformarse en uno de los motores del crecimiento económico del país, contribuyendo en la conectividad de ciudades y de la infraestructura crítica para el desarrollo de la nación.

Dentro de los segmentos que componen a la industria de las telecomunicaciones, se observa que los servicios móviles han incrementado su número con respecto a la situación presentada en el informe anterior, mientras que el segmento fijo ha visto incrementada la brecha de servicios, con respecto a las metas fijadas en el informe ICD 2018-2027, a pesar de su creciente penetración en conexiones de fibra óptica. Por otra parte, en el contexto latinoamericano, Chile lidera junto a Argentina y Uruguay los rankings de penetración de internet fija.

En lo que se refiere a la inclusión de nuevas tecnologías como 5G, la industria ha sido cautelosa debido a los altos costos de inversión en infraestructura en los que se debe incurrir para su implementación en el país, y la baja penetración de terminales con la capacidad de utilizar las redes 5G.

Por el momento, y hasta que los argumentos a favor de la inversión en 5G sean convincentes y se tenga mayor claridad con respecto a su evolución, la industria y los responsables de la formulación de políticas públicas abordarán las inversiones con cautela y seguirán mejorando la disponibilidad y la calidad de servicio de las redes existentes.

Se estima que la inversión destinada al desarrollo de infraestructura para telecomunicaciones corresponde a aproximadamente un 0,56% del producto interno bruto nacional, es decir, a cerca de USD 1600 millones al año. Sin embargo, los requerimientos de inversión superan los 2.000 millones por año, por lo que, de mantenerse esta tendencia de inversión, se espera que la brecha existente en la actualidad, que corresponde a cerca de 2.300 millones de dólares, se incremente en el tiempo acumulando un déficit, al año 2027, que podría alcanzar los 10.000 millones de dólares, lo que representará una brecha de inversiones del 41%.

Tabla 1.Resumen de avances y requerimientos de inversiones 2018-2027

Tipo de requerimiento	Meta (2027)	Actual (2019)	% Avance conexiones	% Avance inversiones	Requerimiento MM US$
Accesos de banda ancha fija	7.876.015	3.399.939	43,17%	13,8%	9.239
Accesos de banda ancha móvil	28.250.475	18.623.813	65,92%	7,4%	14.954
Conexiones de FO	3.938.008	854.741	22%	13,9%	577
				Total	**24.770**

Dado que, en algunos mercados locales la demanda total por servicios de telecomunicaciones, y en especial de banda ancha, no tenga un volumen requerido para sustentar el despliegue de redes terrestres, es posible que los sistemas inalámbricos, en particular 5G, se conviertan en la solución de mínimo costo de inversión y operación, en un horizonte de largo plazo. Además, estas mismas razones de demanda limitada por la densidad de usuarios, podrían ser motivo para la búsqueda de una integración colaborativa de despliegue de activos.

2. IDENTIFICACIÓN DE NORMATIVAS Y/O CAMBIOS QUE PUEDAN IMPACTAR A LAS PROYECCIONES DEL ICD 2018-2027

En opinión de la industria reunida en base a información recopilada en entrevistas con las diferentes empresas concesionarias de telecomunicaciones, y respecto de las políticas públicas ya anunciadas por el gobierno, se aprecia cierta incertidumbre hacia la ley del Roaming Automático Nacional[24]. Por una parte, hay quienes creen que, siempre que se haga bien y cuidando que *"el roaming en localidades aisladas o donde exista un solo operador sea obligatorio"*, no debería afectar los niveles de inversión de la industria; sin embargo, hay otros que en base a la experiencia piensan que sí se afectarían las inversiones.

Otra de las políticas ya anunciadas por el gobierno es el *Reglamento para la Interoperación y Difusión de la Mensajería de Alerta, Declaración y Resguardo de la Infraestructura Crítica de Telecomunicaciones e Información sobre Fallas Significativas en los Sistemas de Telecomunicaciones.* Esta ley busca que las empresas incurran en inversiones para el resguardo de las redes en zonas expuestas, como por ejemplo planos inundables del borde costero. Sin embargo, en opinión de la industria, las inversiones necesarias para realizar la relocalización de estas infraestructuras, estaría fuera de lo razonable y podría generar un escenario desfavorable para el desarrollo del sector.

A continuación, se mencionan algunas propuestas que en opinión de los entrevistados debiesen ser consideradas por el regulador:

24 Iniciativa que obliga a las empresas a permitir el uso de sus redes, con el respectivo pago de las otras empresas que lo utilicen, pero sin cargo a los clientes. El cual permite que, al no contar con señal de tu compañía original, tu dispositivo se conecte automáticamente a la empresa que sí tiene.

- Promover iniciativas de infraestructura pública que vayan en dirección de que cada vez que se realice una intervención en la vía pública (excavaciones), inmediatamente se construyan ductos para el despliegue de Fibra Óptica.
- Facilitación de apoyos en edificios, ya que el housing[25] requiere de grandes costos. "En otros países se disponibiliza las azoteas y otros espacios públicos para la instalación de redes móviles."
- Otra iniciativa es que los nuevos proyectos inmobiliarios tengan la infraestructura de acceso a internet de forma obligatoria y de libre disposición para todas las compañías.

3. SEGUIMIENTO DE LAS INVERSIONES REALIZADAS EN TELECOMUNICACIONES EN EL PERIODO 2018-2019

Tal y como la evidencia económica lo demuestra, durante el año 2018 se logró un repunte en el crecimiento del producto interno bruto con respecto a los años anteriores. Sin embargo, a fines de 2019, producto de la crisis social y política de nuestro país, se ha producido un impacto negativo en la actividad económica, que podría afectar de forma aún incierta a las inversiones en el sector telecomunicaciones.

En opinión de los representantes de la industria entrevistados para el presente informe, y en base a la realidad de los últimos años, las inversiones realizadas por la industria han sido decrecientes en el tiempo, mencionándose a continuación algunas de esas razones:

- En la actualidad se invierte en mejorar la calidad de servicio, no en nuevos accesos.
- Ingresos menores en el tiempo.
- Obstáculos regulatorios, se necesita iniciativas que hagan reformas estructurales para el desarrollo de infraestructura.
- Se debiese fomentar la compartición y sinergia de infraestructura.
- Incertidumbre jurídica, ejemplo, el tema del espectro radioeléctrico en el país, consulta del CAP máximo por operador y la licitación anunciada para el año 2020 de las bandas para operar la red 5G.

3.1 NIVEL TENDENCIAL DE INVERSIONES

La industria de telecomunicaciones a nivel internacional ha observado una relación bastante estable en el tiempo entre sus ingresos y la inversión total. Como regla general, para mantenerse competitivas en el tiempo, las empresas deben invertir entre un 15% y 20% de sus ingresos anuales, y en fases de crecimiento de las redes o de cambios tecnológicos esta inversión usualmente es mayor.

25 El housing consiste básicamente en vender o alquilar un espacio físico de un centro de datos para que el cliente coloque ahí su propio ordenador.

Según información de fuentes en la industria, los niveles de inversión deberían disminuir en el tiempo, derivado de los menores niveles de ingresos, los que han sido decrecientes en el tiempo.

En la Tabla 4, es posible apreciar los niveles de inversión de la industria, que ascienden a cerca de USD 17.000 millones en los últimos 9 años. Resulta importante destacar la caída de la inversión que se produce en el año 2009, la que está asociada principalmente a la crisis económica *sub-prime* que afectó también a nuestro país. Del mismo modo, se aprecia que en los años 2015 y 2016 también se produjo una reducción de las inversiones como resultado de la desaceleración económica y un aumento en el precio del dólar.

Tabla 4.Resumen de inversiones en telecom y PIB

Año	Inversión total millones US$	Inv. Fija	Inv. Móvil	% Inv. fija	% Inv. Móvil	PIB millones US$	% Inv./PIB
2010	1.920	845	1.075	44%	56%	218.538	0,88%
2011	2.416	1.015	1.401	42%	58%	231.892	1,04%
2012	2.462	1.108	1.354	45%	55%	244.226	1,01%
2013	2.080	1.206	874	58%	42%	254.105	0,82%
2014	1.860	1.153	707	62%	38%	258.957	0,72%
2015	1.473	781	692	53%	47%	264.790	0,56%
2016	1.428	800	628	56%	44%	268.998	0,53%
2017	1.566	877	689	56%	44%	272.411	0,57%
2018	1.660	913	747	55%	45%	283.375	0,59%

Fuente: Banco Central de Chile y cifras de inversiones del sector telecomunicaciones de SUBTEL

Por otra parte, la composición de las inversiones entre infraestructura para servicios fijos y móviles ha sido variable en función de la etapa y la situación tecnológica en que se encuentra cada una, pero como se puede ver en la Tabla 4, la proporción en los últimos años ha sido más bien equilibrada.

También es importante resaltar el efecto que la competencia trae sobre las inversiones. En el periodo 2015-2019 se ha producido en nuestro país un fenómeno de competencia muy agresivo en el sector de telecomunicaciones móviles, logrando aumentar su número de abonados en más de 2 millones en menos de 24 meses (junio de 2019 - 4,2 millones), a través de una estrategia de precios bajos, publicidad agresiva y el uso intensivo de los mecanismos de la portabilidad numérica.

Tabla 5.Proyección de inversiones tendencial[26]

	2018-2022	2023-2027
Inversión industria tendencial	USD 7.574 millones	USD 6.758 millones

26 Para la proyección tendencial de las inversiones en telecomunicaciones, a diferencia de ediciones anteriores de este informe, se decidió realizar una proyección que consideró un conjunto de variables tanto de la industria de telecomunicaciones, como también, algunas de tipo macroeconómico (detalle en "Anexo estadístico.xlsx"), las que en su conjunto logran un mayor nivel de precisión.

3.1.1 DESCRIPCIÓN DE BRECHA EN BASE AL ESCENARIO PLANTEADO EN EL INFORME 2018

Con respecto al escenario de inversiones planteado en el informe anterior, en la Tabla 6 es posible apreciar que, de mantenerse la actual tendencia de inversiones, al final del período 2018-2027 la brecha del sector será superior a los US$ 10.000 millones, lo que corresponde a un déficit de un 41% según el escenario planteado como meta de inversiones.

Tabla 6. Brecha estimada según requerimientos y tendencia de inversiones.

MM US$	2018-2022	2023-2027	Total
Requerimiento	11.854	12.521	24.375
Tendencia	7.570	6.758	14.328
Brecha	4.284	5.763	10.047
%	36%	46%	41%

A continuación, en la Tabla 7, muestra el avance de las inversiones realizadas hasta la fecha de elaboración de este informe. Es posible apreciar que a 2019 existe un déficit de inversiones de aproximado de US$ 2.300 millones.

Tabla 7.Desagregación del avance de inversiones.

MM US$	Avance inversiones	Déficit 2019	Capex 2018-2027
Accesos BAF	1.275	945	9.239
Accesos BAM	1.108	1.381	14.954
Inversiones en Fibra óptica	80	83	577
TOTAL	**2.463**	**2.326**	**4.770**

4. RECOMENDACIONES DE ACCIÓN Y/O PROPUESTAS DE MEJORA

Una de las causas de los niveles decrecientes en inversiones de infraestructura, es la constante disminución los cobros por interconexión entre concesionarias, cuyos valores han sido decrecientes en el tiempo, y que en la actualidad se encuentran en niveles marginales lo que, junto a tráficos de voz por abonado decrecientes, han generado una menor recaudación por concepto de telefonía. Adicionalmente, la industria de las telecomunicaciones se caracteriza por ser altamente competitiva, que obliga a las concesionarias a disponibilizar planes con un mayor número de servicios, a precios cada vez más reducidos, lo que se traduce en menores ingresos para las compañías y una menor disponibilidad de recursos para realizar inversiones.

Desde esa perspectiva, las iniciativas del Estado en materia de financiamiento de redes, que ha anunciado el gobierno hace algún tiempo, apunta en la dirección correcta. Sin embargo, para que estas

iniciativas fructifiquen y sean reales creadores de valor, se requerirá una mirada al tipo de organización industrial, a la hora de poner en servicio estas redes, explotarlas y, en definitiva, mantener ofertas de conectividad en poblaciones de baja densidad poblacional, y/o relativamente lejanas de los centros poblados de mayor tamaño.

Profundizar el despliegue de redes de telecomunicaciones de FO sigue siendo el mayor desafío de mediano plazo para la industria. En efecto, a pesar de que se observan avances importantes en el crecimiento de este segmento de activos, aún persiste una brecha, a veces creciente, respecto de los requerimientos, así como se han proyectado en estos informes.

Por otra parte, si la tecnología inalámbrica que está empezando a ser desplegada en el mundo, 5G resulta efectivamente un sistema de adecuada relación costo beneficio, en el proceso de creación de valor, asociado a la conectividad de hogares y empresas, tanto en zonas densas, donde paulatinamente capturará el crecimiento del tráfico de datos, o como sustituto económico de redes de FO en zonas de menor demanda, será recomendable avanzar en su despliegue, para lo cual resulta clave contar con una hoja de ruta clara y vinculante, por parte de los organismos generadores de políticas públicas, sobre el manejo de espectro requerido para esta tecnología. Esta hoja de ruta debería definir tanto las bandas que se considerarán, como las condiciones de licitación, pero también los calendarios de liberación de las diversas bandas de frecuencias, de modo que los operadores puedan modelar el despliegue futuro de redes, a partir de su propia proyección de negocios.

Más aún, surge la pregunta acerca si el modelo de competencia por redes, que ha sido tan exitoso en Chile desde la entrada del sistema multiportador, en la década de los '90, es sostenible en estos nuevos escenarios, especialmente para las zonas de baja densidad y demanda.

RECUADRO: 5G

Las redes de telefonía móvil de quinta generación, denominadas comúnmente como 5G, traen consigo la promesa de mejorar la experiencia de los usuarios finales, ofreciéndoles nuevas aplicaciones y servicios capaces de alcanzar velocidades de varios gigabits, así como de incrementar significativamente la calidad de funcionamiento y la fiabilidad de la señal. Cabe destacar que si junto a una mejora de las redes por medio del 5G se desarrollan nuevas aplicaciones de la Inteligencia Artificial (IA), se dará un sentido práctico a los datos más allá del uso que actualmente le dan los usuarios Smartphone, gestionando y orquestando los recursos de red, y dotando de inteligencia a los sistemas conectados y autónomos.

Estas elevadas velocidades y la baja latencia que promete la tecnología 5G, serán factores que potenciarán el desarrollo de nuestra actual sociedad hacia una nueva era de ciudades inteligentes e Internet de las cosas (IoT).

El despliegue de esta tecnología 5G requiere, eso sí, una densidad de despliegue significativamente mayor, medida como número de antenas en una determinada superficie, que la actual red 4G, ya que el alcance del espectro de alta frecuencia asociado a tecnologías 5G, amén de otras características innovadoras que propone esta tecnología, será significativamente menor, lo que incrementa en cualquier caso el número de portadoras requeridas.

La industria considera que las primeras redes 5G comenzarían a funcionar en zonas urbanas con una elevada densidad de población y ofrecerán servicios tales como la banda ancha móvil mejorada (eMBB).

Para zonas rurales, donde la demanda tiende a ser menor, el desarrollo de redes 5G se convertirá, sin lugar a duda, en un desafío comercial relevante y se espera que su desarrollo sea más lento, lo que desafía la inclusión digital, imprescindible en el desarrollo futuro.

Otro aspecto importante para considerar al momento de plantear el desafío de explotar una red de tipo 5G, tiene relación con la infraestructura de transmisión más adecuada para transportar los grandes volúmenes de información hacía el núcleo de red.

Por capacidad de datos, y por cobertura de largo plazo, los sistemas de FO serán la tecnología obligada para conectar los sitios de radio con el núcleo del sistema, pero esto propone un desafío adicional, puesto que las redes 3G y 4G, solo en un porcentaje se enlazan con esta tecnología, utilizando enlaces de radio en muchas partes y zonas.

En cuanto a los costos asociados a redes 5G, la Unión Internacional de Telecomunicaciones[27] (ITU), estima que los costos por emplazamiento serían de entre 20.000 y 50.000 USD, mientras que los costos totales para la instalación en ciudades pequeñas de baja densidad y ciudades grande de alta densidad serían de 6,8 y 55,5 MMUSD respectivamente **Tabla 2**.

Tabla 2. Costos de red 5G.

Ciudad grande y densa (15 Km2 y 12.000 hab. Por Km2)	
Total, de gastos de capital (en millones USD)	55,5
Número de emplazamientos de células pequeñas	1.027
Coste por km2 (en millones USD)	3,7
Gastos de capital por emplazamiento (en miles de UDS)	54,1
Ciudad pequeña y menos densa (3 Km2 y 3298 ha. Por Km2)	
Total, de gastos de capital (en millones USD)	6,8
Número de emplazamientos de células pequeñas	116
Coste por km2 (en millones USD)	2,3
Gastos de capital por emplazamiento (en miles de USD)	58,6

Fuente: ITU.

27 Sentando las bases para 5G: Oportunidades y desafíos, ITU, 2018.

Considerando la experiencia internacional, más específicamente en aspectos de implementación, se constata que aún son escasos los países donde se han desarrollado redes comerciales 5G de gran escala, y la percepción de valor por parte de los usuarios es muy variable. Por otra parte, en países como China o EE. UU., ambos competidores en ciencia y tecnología, el desarrollo de redes 5G se ha transformado en una política de estado y seguridad nacional.

Otro aspecto relevante para considerar al momento de plantear la implementación de una red comercial 5G, es la disponibilidad y costo de los terminales que cumplan con el estándar para utilizar dicha tecnología. En la actualidad existe una gama limitada de terminales compatibles, restringiéndose principalmente a algunos móviles de gama alta, con valores de adquisición que no permiten su masificación. Sin embargo, se espera que en el mediano plazo se logre una reducción en los costos de producción de terminales, lo que facilitaría la masificación de esta tecnología, tal como ocurrió con 3G y 4G.

Por el momento, y hasta que los argumentos a favor de la inversión en 5G sean convincentes y se tenga mayor claridad con respecto a su evolución, la industria y los responsables de la formulación de políticas públicas abordarán las inversiones con cautela y seguirán mejorando la disponibilidad y la calidad de servicio de las redes existentes.

INFRAESTRUCTURA PRODUCTIVA

CAMARA CHILENA DE LA CONSTRUCCION

VIALIDAD URBANA

1. RESUMEN EJECUTIVO

En el ICD 2018, se menciona la importancia de la movilidad urbana para dar continuidad a la red vial estructural del país, al pasar por áreas urbanas. Esto implica, diseñar y construir vías que armonicen con temáticas de transporte y urbanismo. Se define como vía urbana, aquellos "caminos públicos las vías de comunicación terrestres destinadas al libre tránsito, situadas fuera de los límites urbanos de una población y cuyas fajas son bienes nacionales de uso público. Se considerarán también caminos públicos, para los efectos de esta ley, las calles o avenidas que unan caminos públicos, declaradas como tales por decreto supremo" (El DFL N°850 del 12/09/97, Ley de Caminos, Artículo 24°, Título III).

En este sentido, el ICD 2018 identificó necesidades de inversión reflejadas en tres tipos de requerimientos; renovación de infraestructura existente (calles y veredas), revisión y seguimiento de la cartera de proyectos impulsada por la Secretaría de Planificación de Tránsito (SECTRA), y estimaciones asociadas a infraestructura faltante fuera de lo considerado en el punto anterior.

Tabla Nº1: Resumen avance de inversiones 2018-19

	Tarea 2018-2022 MMUS$	Tarea 2023-2027 MMUS$	Avance 2018-19 MMUS$
Vialidad urbana	39.348	60.776	1.251

2. IDENTIFICACIÓN DE NORMATIVAS Y/O CAMBIOS QUE PUEDAN IMPACTAR A LAS PROYECCIONES DEL ICD 2018-2027

En relación a los proyectos de inversión en vialidad urbana en las capitales regionales, para el ICD 2018 se utilizó los Planes Maestros de Transporte urbano (PMTU) -herramientas vigentes a la fecha- para estimar la necesidad de inversión en vialidad urbana a nivel de capitales regionales. La cartera de proyectos generada, tiene un horizonte deseable de ejecución de 10 años, por lo que, de acuerdo al ciclo de vida de los proyectos definido por el Sistema Nacional de Inversiones, para que un proyecto del PMTU se encuentre operativo, se debe desarrollar el estudio de pre factibilidad, luego desarrollar los diseños de ingeniería y, por último, ejecutar las obras. Lo anterior supone resueltas las restricciones de disponibilidad presupuestaria, factibilidad técnica, rentabilidad social, lineamientos políticos, entre otros, los cuales dependen del MINVU o MOP. Como tendencia, se puede decir que generalmente un proyecto comienza en forma posterior al quinto año de definido un PMTU, debido a los plazos técnicos asociados a etapas previas (pre factibilidad y diseño).

La Información actualizada acerca de los PMTU se presentan en la siguiente tabla:

Tabla Nº2: Últimos PMTU desarrollados

N°	Región	Ciudad/Conurbación	Año PMTU
1	Arica y Parinacota	Arica	2014
2	Tarapacá	Iquique-Alto Hospicio	2014
3	Antofagasta	Calama	2014
4	Antofagasta	Antofagasta	2014
5	Atacama	Copiapó	2014
6	Coquimbo	Coquimbo-La Serena	2014
7	Valparaíso	Gran Valparaíso	2003
8	Del Libertador Bernardo O´Higgins	Rancagua-Machalí	2011
9	Maule	Curicó	1998
10	Maule	Talca	2012
11	Maule	Linares	2006
12	Ñuble	Chillán	2012
13	Biobío	Los Ángeles	2012
14	Biobío	Gran Concepción	2002
15	Araucanía	Angol	2006
16	Araucanía	Temuco-Padre Las Casas	2016
17	Los Ríos	Valdivia	2016
18	Los Lagos	Osorno	2016
19	Los Lagos	Puerto Montt	2017
20	Los Lagos	Quellón	2010
21	Los Lagos	Ancud	2010
22	Los Lagos	Castro	2010
23	Aysén	Coyhaique	2006
24	Magallanes	Punta Arenas	2012

Fuente: Secretaría de Planificación de Transporte.

En el caso del Gran Valparaíso se actualizó el Plan a fines del año 2018, por lo que este no tiene avances aún. A la fecha, SECTRA se encuentra actualizando los PMTU en diferentes ciudades, tales como: Rancagua-Machalí, Curicó, Talca-Maule, Linares, Chillán, Los Ángeles, Gran Concepción, Coyhaique y Punta Arenas. Junto a esto, se están realizando los estudios para que, por primera vez, San Antonio cuente con un PMTU. Todos estos Planes debieran estar definidos entre 2020 y 2022.

Por otro lado, hay que considerar el efecto por concepto de la Crisis Social por la cual experimenta el país, lo cual podría impactar las estimaciones de brecha futura al alza. De hecho, este valor aumentaría en al menos US$ 1.950 millones producto de los eventos desarrollados durante el último trimestre de 2019.

3. SEGUIMIENTO INVERSIONES 2018-2019

Para llevar a cabo la estimación de requerimientos y cuantificación de la brecha 2018-2027, el ICD 2018 tomó en cuentas tres ítems:

3.1 NECESIDADES DE RENOVACIÓN INFRAESTRUCTURA VIAL EXISTENTE

La estimación se realizó en base al levantamiento del Pre-Censo 2011, el cual clasificaba el estado de las calles y veredas. Luego, se amplió el análisis a las 15 capitales regionales del país en ese entonces. Por último, se valorizó el costo de reparación y reposición de las calles y veredas en mal estado, según su ancho de vía (estipulado en la OGUC) y su precio UF/m2, arrojando un costo total de MMUS$ 23.355 para el decenio 2018-2027. A la fecha no se cuenta con información actualizada al respecto, por lo que se mantiene la información utilizada en el ICD 2018 acerca de la necesidad de renovación de infraestructura existente. Vale la pena mencionar que, dada la Crisis Social que experimenta el país, este valor aumentará en al menos MMUS$ 1.949 (estimación realizada con datos al 25 de octubre de 2019, por la gerencia de estudios de la CChC). Según la información que arroja el Banco Integrado de Proyectos, durante 2018 y 2019 se ha avanzado en la necesidad de renovación de infraestructura en MMUS$ 202.

3.2 PROYECTOS DE INVERSIÓN EN VIALIDAD URBANA

En relación a los proyectos de inversión en vialidad urbana en las capitales regionales, para el ICD 2018 se utilizó los Planes Maestros de Transporte urbano (PMTU), para estimar la necesidad de inversión en vialidad urbana para cada región. A la fecha, hay 414 proyectos en la cartera de vialidad urbana, los cuales representan una inversión de al menos MMUS$ 5.956 (hay inversiones que no tiene información de costos aún). De estos, 32 han presentado avances durante el año 2019 por un monto total de US$ 253 millones.

Tabla Nº3: Resumen de Proyectos en SECTRA

Avances al 2019	Proyectos	MMUS$
Antofagasta	1	4,4
Arica	6	37,9
Calama	4	20,7
Chillán	1	37,3
Coquimbo - La Serena	2	66,7
Iquique- Alto hospicio	1	13,9
Linares	1	15,3
Los Ángeles	2	4,9
Osorno	6	8,8
Puerto Montt	2	20,5
Rancagua Machalí	1	8
Temuco / Padre Las Casas	5	14,7
Total	**32**	**253,1**

Fuente: Elaboración Propia, Información Sectra.

3.3 INFRAESTRUCTURA FALTANTE

Según lo estipulado en el ICD 2018, La cartera de proyectos que el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones no cubre en totalidad las necesidades de movilidad urbana. Bajo este supuesto, se estima la infraestructura faltante para las otras 15 capitales[28] regionales. Utilizando levantamiento de la ubicación geográfica de los proyectos en carpeta (su accesibilidad y su entorno), junto con la información de Google Traffic, se caracterizaron las vías de la ciudad que presentan congestión severa un día laboral representativo de la semana típica en horario punta mañana y punta tarde y sobre esto se llevó a cabo un análisis de superposición. Luego, se analizaron las soluciones más adecuadas para las áreas urbanas en estudio, con el objetivo de dimensionar los requerimientos de inversión. Tomando en cuenta la capacidad de diferentes modos de transporte para para mover pasajeros, incluyendo su capacidad típica y las variaciones que se han observado en la práctica, y el costo por kilómetro de cada solución en millones de dólares por kilómetro construido, se estimó el costo de las soluciones de infraestructura para estas vías de las distintas ciudades, con un costo total de US$ 18.134 millones. A la fecha no hay información acerca de avances en este ítem, por lo tanto, la brecha se mantiene.

3.4 INFRAESTRUCTURA VIAL URBANA CONCESIONADA

En este informe se considera incorporar a la estimación de infraestructura 6 proyectos concesionados, los cuales se presentan en la siguiente tabla.

Tabla Nº4: Infraestructura vial urbana concesionada en MMUS$

Concesión	Extensión (km)	MMUS$	Inicio Concesión	Fin Concesión
Concesión Variante Vespucio El Salto-Kennedy (Túnel San Cristóbal)	4,1	167,9	26-11-04	ago-37
Concesión Acceso Nororiente a Santiago	22	358,9	07-01-04	ene-44
Concesión Sistema Américo Vespucio Norponiente, Av.El Salto-Ruta 78	29	891,9	23-04-03	abr-33
Concesión Sistema Américo Vespucio Sur, Ruta 78-Av.Grecia	24	866,6	06-12-02	dic-32
Concesión Sistema Norte - Sur (Autopista Central)	60	1244,2	03-07-01	jul-32
Concesión Sistema Oriente - Poniente (Costanera Norte)	43	1200,5	01-07-03	jun-36
Total	**182,1**	**4.730**		

Fuente: Elaboración Propia

Según la metodología de estimación utilizada en el ICD 2018 en vialidad interurbana concesionada, para mantener la infraestructura vial urbana concesionada sería necesario una inversión de US$18,2 millones anual.

3.5 INICIATIVAS DE INVERSIÓN SERVIU

Adicionalmente se incorporan las iniciativas de inversión[29] de los Servicios Regionales de Vivienda y Urbanismo, en adelante SERVIU, de las distintas regiones del país, ejecutadas en los años 2018 y 2019 (noviembre). El monto total es de MMUS$ 796 para ambos años.

Tabla Nº5: Iniciativas de Inversión SERVIU en MMUS$

Ejecución	2018 MMUS$	2019 MMUS$
Inversión	445	351

Fuente: Elaboración Propia, Información SERVIU.

3.6 RESUMEN DE INVERSIONES

Por lo tanto, el avance en inversiones asociadas a estos 4 Ítems en los últimos dos años, es de un 3,2% para el quinquenio, y de 2,1% por el decenio. El detalle es el siguiente:

Tabla Nº6: Resumen de Inversiones MMUS$

Ítem	Inversión MMUS$ 2018 - 2022	Inversión MMUS$ 2018 - 2027	Avance MMUS$ 2018 -2019
Renovación de infraestructura vial existente	13.369	23.355	202
Proyectos viales por ciudad	7.845	19.286	253
Infraestructura faltante	18.134	18.134	0
Mantención Infraestructura vial urbana concesionada	91	180	36,4
Iniciativas de Inversión SERVIU	-	-	796
Total	**39.348**	**60.775**	**1.287**

Fuente: Elaboración propia.

4. RECOMENDACIONES DE ACCIÓN Y/O PROPUESTAS DE MEJORA

Al revisar el ICD 2018, se presenta una estimación de infraestructura vial urbana calculada en base a las necesidades de renovación de infraestructura existente, proyectos de inversión en vialidad urbana y estimación de infraestructura faltante.

Este escenario se agudiza al considerar que al menos, la brecha de renovación de infraestructura vial ha aumentado en aproximadamente US$2.000 millones durante el mes de octubre, y probablemente seguirá creciendo mientras sigan los desórdenes sociales.

Es importante relevar el hecho de que en el ICD 2018 toma como supuesto que la cartera de proyectos del MTT no es suficiente para cubrir las necesidades, pero no se presentan antecedentes suficientes que sostengan esta hipótesis, ni se explicita la manera en que se podría materializar esta brecha de infraestructura. El ítem de Infraestructura faltante es una estimación de lo que falta, pero no incluye voluntades ni propuestas sobre cómo resolverlo o implementarlo. Por lo tanto, no es posible llevar a cabo el seguimiento de estas inversiones ni evaluar cuanto han avanzado en los años 2018-2019.

Por último, tal como se explicitó en las recomendaciones del ICD 2018, es necesario seguir trabajando en mejorar la gestión de los procedimientos de ejecución de los proyectos en vialidad, de manera de disminuir los tiempos de ejecución y explorar nuevos mecanismos para llevarlos a cabo.

VIALIDAD INTERURBANA

1. RESUMEN EJECUTIVO

El ICD 2018 se presentó la vialidad interurbana como uno de los componentes mas importantes de la infraestructura nacional, dada la configuración geográfica de Chile y la escasez de alternativas de transporte para algunos tramos del país. Asimismo, se hizo presente la consideración de la alta tasa de utilización de las vías y su consecuente deterioro.

Para estimar las necesidades de infraestructura vial para el decenio 2018-2027, el ICD 2018 consideró las iniciativas de inversión vial concesionadas en operación, construcción, licitación y aquellas que estaban en agenda. También contabilizó los proyectos de inversión de vialidad interurbana no concesionadas. Lo anterior permitió determinar los requerimientos de inversión para el período 2018-2027, en conjunto con los avances evidenciados en el siguiente informe.

En resumen, los montos de inversión totales ejecutados durante 2018 y 2019 es de MMUS$ 4.449, requeridos para el sistema vial interurbano, tanto concesionado como no concesionado. Esto representa un avance del 41,3% para el quinquenio y de 21,9% para el decenio.

Lo avanzado en este período confirma que el modelo de concesiones en la modalidad de inversión de vías interurbanas, es lo más adecuado y permite avanzar hacia las metas con un ritmo adecuado. En lo que se refiere a vías interurbanas de ejecución vía la Dirección de Vialidad, el desempeño supera lo planificado y es una herramienta muy versátil para proyectos de naturaleza distintos a los de concesiones interurbanas.

Tabla Nº1: Resumen de requerimientos de inversión por tipo, período 2018–2027

Detalle	MMUS$ 2018–2022	MMUS$ 2018–2027	Avance MMUS$ 2018-2019
Concesiones en operación: Inversión ya definida en contratos	566	566	536
Concesiones en operación: Necesidades de aumentos de capacidad	458	692	
Mantención vías concesionadas	1.615	3.230	725
Concesiones en construcción	110	110	0
Concesiones en agenda o en licitación	1.700	3.099	
Vialidad interurbana no concesionada	6.323	12.646	3.188
Total	**10.772**	**20.343**	**4.449**

Fuente: Elaboración Propia.

2. SEGUIMIENTO INVERSIONES 2018-2019

Para estimar las principales brechas entre las necesidades determinadas en el ICD 2018 y la ejecución efectiva al año 2019, así como los efectos de estas sobre lo estimado en términos de inversiones y plazos se analizará por capítulos cada una de las líneas de inversión descritas anteriormente.

2.1 CONCESIONES EN OPERACIÓN

Del total de iniciativas seleccionadas en el ICD 2018, hay dos que se encuentran finalizadas; Túnel el Melón y Camino Nogales-Puchuncaví. Las concesiones en operación son las siguientes:

Tabla Nº2. Resumen general inversiones estimadas concesiones en operación

Nombre	Extensión (Km)	MMU$	Inicio Concesión	Fin Concesión	Inversión Por ejecutar (MM US$)	
					2018–2022	2018–2027
Alternativas de acceso a Iquique	78,4	182,5	sep-11	32 años o VPI (Sep 2043)	0	0
Autopistas de la Región de Antofagasta	201	312,2	abr-10	20 años y 5 meses (245 meses)	0	0
R5 Tramo, Vallenar – Caldera	227	264,6	mar-09	35 años o VPI (Mar 2044)	0	0
Ruta 5, Tramo La Serena – Vallenar	186,5	367,4	abr-12	35 años o VPI (Abr 2047)	0	0
R5, Tramo Los Vilos – La Serena	229	362,7	dic-97	44896	0	3
R5 Tramo Santiago – Los Vilos	218	840	mar-97	mar-23	101	101
Concesión Mejoramiento y Conservación de la Ruta 43, de la Región de Coquimbo	86	242,7	may-13	30 años o VPI (May 2043)	19,6	19,6
Camino Internacional Ruta 60 CH	90	514,5	jul-04	jul-36	20	20
Camino Santiago – Colina – Los Andes (R57)	116	223,2	oct-97	mar-26	23	46
Interconexión Vial Santiago – Valparaíso – Viña del Mar	141	631,3	ago-99	25 años o VPI (2023)	121	221
Red Vial Litoral Central	77	152	nov-01	nov-31	0	54
Autopista Santiago – San Antonio, (R78)	132	258,2	sep-95	mar-21	116,9	116,9
Variante Melipilla	8	37,1	abr-03	abr-33	0	0
R5, Tramo Santiago–Talca y Acceso Sur a Santiago.	266	1346,7	sep-99	(MDI >= ITC) (Sep 2030)	122,8	122,8
R5, Tramo Talca – Chillán	193	352,8	mar-96	Variable (MDI). (2020)	41,8	41,8

R5, Tramo Chillán – Collipulli	161	391,4	jun-98	Variable (MDI) (2020 o 2021)	59,1	59,1
Acceso Norte a Concepción	89	281,3	abr-95	abr-23	9,1	9,1
Ruta Interportuaria Talcahuano–Penco	14,6	38,7	abr-02	oct-33	0	0
R160, Tramo Tres Pinos – Coronel	89	337	sep-08	40 años o VPI (Sep 2048)	35,3	35,3
Autopista Concepción – Cabrero	103	360,3	sep-11	35 años o VPI (Estimado 2032)	0	0
R5, Tramo Collipulli–Temuco	144	484,3	mar-99	Variable (MDI) (2024)	57,5	57,5
R5, Tramo Temuco – Río Bueno	172	325,7	jun-98	jun-23	55,6	55,6
R5, Tramo Río Bueno – Puerto Montt	136	374,6	sep-98	sep-23	28,5	28,5
R5, Tramo Puerto Montt – Pargua	55	214,8	may-10	40 años o VPI (May 2050)	17,8	17,8
Segunda Concesión Túnel El Melón	5	123,8	jun-16	jun-31	123,6	123,6
Segunda Concesión Camino Nogales – Puchuncaví	43	214,8	ago-16	38 años o VPI>ITC	192,3	192,3
Total	**3.260,5**	**9.019,8**		**Total**	**1.144,9**	**1.324,9**

Fuente: Elaboración Propia.

Para los años 2018 y 2019, se ha llevado a cabo un gasto en vialidad interurbana concesionada de MMUS$ 278 y MMUS$ 258, respectivamente.

2.2 INVERSIONES PARA MANTENCIÓN OBRAS CONCESIONADAS

Según lo estimado en el ICD 2018, para mantener condiciones de seguridad, buen estado del pavimento y nivel de servicio, todas las concesiones deben incluir, en sus presupuestos, obras de mantención y conservación. La longitud total correspondientes a las concesiones identificadas (en operación y en construcción), da un total de 3.624,90 kilómetros de vías licitadas, para los años 2018 y 2019. Asumiendo un valor promedio de inversión inicial de 2 millones de dólares por kilómetro y un 5% anual de ese monto para mantención, se obtiene un valor de 362,49 millones de dólares por año que se debería invertir en mantener las actuales autopistas interurbanas. Para el caso de las estimaciones incluidas en este informe, se supuso un valor promedio anual. En este caso, para los años 2018 y 2019, el gasto en mantenciones de concesiones sería de MMUS$ 724,98.

2.3 INVERSIONES PARA CONCESIONES EN AGENDA O EN LICITACIÓN

A la fecha, se encuentran 4 proyectos en construcción (los cuales a la fecha no presentan avances en obras), 1 en proceso de adjudicación, y 2 en llamada a licitación, según lo programado a principios de 2019. Estos 7 proyectos representan un monto total de inversión de MMUS$ 2.849. El detalle de todas las inversiones en agenda, licitación o construcción se presenta a continuación:

Tabla Nº3: Resumen general inversiones estimadas. Concesiones en agenda o en licitación

Concesiones en agenda o en licitación	Inversión total MMUS$	Estado
R25: Rutas del Loa	300	Proyectos en construcción
Ruta 5 tramo Tarapacá – Antofagasta	476	Llamada en 2021
Ruta 5, Tramo Caldera – Antofagasta	605	Llamada en 2021
2ª Concesión R5 Los Vilos–La Serena	509	en adjudicación
Ruta G21, Acceso a Centros de Esquí	94	Proyectos en construcción
R66: Camino de la Fruta	575	Proyectos en construcción
Ruta Nahuelbuta	251	Proyectos en construcción
Concesión Vial Autopista Metropolitana de Puerto Montt (incluye tramo urbano)	379	Llamada en 2023
Concesión Vial Ruta Longitudinal Chiloé (R5)	358	Llamada en 2019
Segunda Concesión Ruta 5 Tramo Talca - Chillán	761	Llamada en 2019
Concesión Ruta del Villarrica	347	Llamada en 2020
Segunda Concesión Ruta 5 Tramo Temuco – Río Bueno y Acceso a Valdivia	519	Llamada en 2020
Segunda Concesión Autopista Santiago – San Antonio, Ruta 78	513	Llamada en 2020
Segunda Concesión Interconexión Vial Santiago-Valparaíso-Viña del Mar, Ruta 68	546	Llamada en 2021
Segunda Concesión Ruta 5: Chillan - Collipulli	262	Llamada en 2021
Concesión Ruta 5: Tramo Iquique - Antofagasta	486	Llamada en 2021
Segunda Concesión Ruta 5: Vallenar -Caldera	339	Llamada en 2021
Concesión Ruta Pie de Monte	160	Llamada en 2022
Segunda Concesión Acceso Norte a Concepción	401	Llamada en 2022
Concesión Interconexión Vial Copiulemu - Hualqui - Puerto Coronel	96	Llamada en 2022
Concesión Vial Ruta Fronteriza Entrelagos	143	Llamada en 2022
Segunda Concesión Ruta 5 Santiago – Los Vilos	493	Llamada en 2022
Segunda Concesión Ruta 57 Santiago - Colina - Los Andes	358	Llamada en 2023
Segunda Concesión Ruta 5 Tramo Collipulli - Temuco	239	Llamada en 2023

Fuente: Elaboración Propia.

2.4 INVERSIONES EN VIALIDAD INTERURBANA NO CONCESIONADA

A partir del programa de inversiones de la Dirección de Vialidad del MOP se identificaron los montos que anualmente se proyectan para inversión en vialidad no concesionada. El resumen por región considerado en el plan de inversiones en vialidad 2018 y 2019 del MOP, es el que se presenta en la siguiente Tabla.

Tabla Nº4: Resumen general plan de inversiones 2018 y 2019 MOP

Regiones	2018	2019	2020	2021	2022
Arica y Parinacota	75,3	73,5	45,5	22,3	14,1
Tarapacá	53,5	81,2	41,2	4,3	1,8
Antofagasta	61,1	71,9	28,0	18,8	6,9
Atacama	117,4	97,1	39,0	17,3	0,0
Coquimbo	87,8	124,2	85,5	59,0	14,0
Valparaíso	67,5	128,7	47,4	24,6	13,6
Metropolitana	73,2	93,5	43,8	45,8	5,7
O'Higgins	65,3	72,8	37,5	26,0	24,2
Maule	107,3	134,7	74,4	36,0	9,1
Ñuble	0,0	5,5	4,3	1,0	0,0
Biobío	120,3	150,0	60,7	31,6	4,4
La Araucanía	139,8	153,4	97,2	69,1	22,4
Los Ríos	110,7	137,4	71,6	50,4	8,5
Los Lagos	162,4	295,1	270,3	283,6	206,8
Aysén	70,5	82,4	67,8	21,9	19,5
Magallanes	69,1	75,0	68,4	14,0	9,5
Interregional	16,3	14,0	18,0	2,6	0,5
Total	**1397,5**	**1790,4**	**1100,7**	**728,2**	**361,1**

Fuente: Elaboración Propia.

La siguiente tabla presenta el avance 2018-2019, según lo estimado en el ICD 2017.

Tabla Nº5. Resumen general inversiones vialidad interurbana no concesionada

Período 2018–2022	Período 2018–2027	Avance 2018-2019	
MMUS$	MMUS$	MMUS$	%
6.323	12.646	3.188	50,4%

Fuente: Elaboración Propia.

2.5 RESUMEN TOTAL DE INVERSIONES

En resumen, los montos de inversión totales ejecutados durante 2018 y 2019 es de MMUS$ 4.449, requeridos para el sistema vial interurbano, tanto concesionado como no concesionado. Esto representa un avance del 41,3% para el quinquenio y de 21,9% para el decenio. El resumen se presenta a continuación.

Tabla Nº6: Resumen total inversiones vialidad interurbana concesionada y no concesionada

Detalle	MMUS$ 2018–2022	MMUS$ 2018–2027	Avance MMUS$ 2018-2019
Concesiones en operación: Inversión ya definida en contratos	566	566	536
Concesiones en operación: Necesidades de aumentos de capacidad	458	692	
Mantención vías concesionadas	1.615	3.230	725
Concesiones en construcción	110	110	0
Concesiones en agenda o en licitación	1.700	3.099	
Vialidad interurbana no concesionada	6.323	12.646	3.188
Total	**10.772**	**20.343**	**4.449**

Fuente: Elaboración Propia.

3. RECOMENDACIONES DE ACCIÓN Y/O PROPUESTAS DE MEJORA

Al analizar los resultados sobre lo avanzado a fines de 2019 en las cuatro aperturas de gastos de inversión se puede observar que, en materias de vías interurbanas concesionadas, el programa mantiene su inercia con la renovación de dos contratos (Túnel Melón y Nogales Puchuncaví), y una concesión adicional a la información del ICD 2018. El foco para el período 2018-2027, según se indica, debería estar en inversiones para incrementar capacidad de las vías R5 Santiago-Los Vilos, Santiago-Colina-Los Andes, Interconexión vial Santiago-Valparaíso-Viña y Santiago-San Antonio, condición que no está incluida en los contratos vigentes. Estas obras, deberán formar parte del análisis de la Dirección General de Concesiones.

Con respecto a los gastos de mantención de las rutas concesionadas, estos están incluidos en los respectivos contratos y son monitoreados por la Inspección Fiscal del MOP. Es obligación de las concesionarias asegurar el buen estado de las carpetas de rodado, bermas, obras de arte, entre otros. De esta manera, en la medida que los nuevos contratos incorporen mayores exigencias de estándares a las vías concesionadas, este gasto se incrementará en los próximos años.

A la fecha de medición del avance de las metas señaladas en el ICD 2018, se puede señalar que hay un universo de 24 proyectos de concesiones en agenda o licitación. De estos 24, hay 1 en adjudicación, 4 en etapa de construcción, 2 que serán licitados en 2019, 3 el 2020, 6 el 2021, 5 el 2022 y 3 el año 2023. La estimación global es de MMUS$9.210 de los cuales para el período sólo hay compromiso por MMUS$2.849. La tarea para el resto del período se observa factible y dependerá más de los recursos fiscales disponibles que de la capacidad de gestión del MOP. En escenarios de gasto de inversiones reducido, en buen juicio se indicaría que seguirá en desarrollo de esta modalidad de inversión.

En lo que respecta al programa de inversiones de vías interurbanas de la Dirección de Vialidad del MOP, se observa una muy buena capacidad de gestión de materialización de proyectos de inversión vial. El desempeño mostrado para el período 2018-2019 es superior a lo proyectado en el ICD 2018. Por el nivel de desempeño, es muy probable que vía esta modalidad se efectúe gran parte de la reparación y reposición de la vialidad urbana deteriorada durante el periodo octubre-diciembre 2019.

Finalmente, lo avanzado en este período confirma que el modelo de concesiones en la modalidad de inversión de vías interurbanas, es lo mas adecuado y permite avanzar hacia las metas con un ritmo adecuado. En lo que se refiere a vías interurbanas de ejecución vía la Dirección de Vialidad, el desempeño supera lo planificado y es una herramienta muy versátil para proyectos de naturaleza distintos a los de concesiones interurbanas. Este sistema mixto de desarrollo de la vialidad interurbana facilita el desarrollo regional y maximiza el uso de los recursos.

AEROPUERTOS

1. RESUMEN EJECUTIVO

La red aeroportuaria en Chile está compuesta por un total de 344 Aeródromos, 102 Helipuertos y 7 Aeropuertos. De los 344 Aeródromos, 16 pertenecen a la Red Primaria, 14 a la Red Secundaria, 303 pertenecen a la Red de Pequeños Aeródromos y 11 pertenecen a la Red de Aeródromos Militares. Las redes están reguladas por los siguientes organismos públicos, Dirección de Aeropuertos, en adelante DAP (Ministerio de Obras Públicas, en adelante MOP), Dirección General de Aeronáutica Civil, en adelante DGAC (Ministerio de Defensa) y la Junta de Aeronáutica Civil, en adelante JAC (Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, en adelante MTT).

Respecto a las inversiones identificadas en el informe anterior, el avance 2018-2019 es de un 46%, por lo que se puede esperar que la brecha se cierre dentro del plazo estipulado por el ICD 2018, escenario idóneo dado el potencial de crecimiento que ha mostrado el transporte aéreo en el país, evidenciado por el hecho que este se ha duplicado entre los años 2010 a 2017.

En resumen, los montos de inversión totales ejecutados durante 2018 y 2019 son de MMUS$ 545,4. Esto representa un avance de 46% para el quinquenio y 33% para el decenio, como se ve en la tabla a continuación:

Tabla Nº1: Presupuesto inversiones totales, Avance 2018-2019

Áreas Geográfica de Inversión	MMUS$ 2018-2022	MMUS$ 2018-2027	MMUS$ 2018-2019
Regiones, en agenda MOP	156	156	28
Santiago	620	620	379
Inversión DAP	320	640	138,4
Regiones, sin proyecto	81	243	0
Total inversiones	**1.177**	**1.659**	**545,4**

Fuente: Elaboración Propia en base a ICD 2018.

2. IDENTIFICACIÓN DE NORMATIVAS Y/O CAMBIOS QUE PUEDAN IMPACTAR A LAS PROYECCIONES DEL ICD 2018-2027

En el ICD 2018-2027, se estimó el potencial de crecimiento de la cantidad de viajes en el país, en función del crecimiento del PIB. A la fecha hay evidencia que, durante 2018, los viajes aumentaron más de 4 veces de lo que creció el PIB. Dado este escenario de rápido crecimiento de la demanda por viajes, es necesario revisar los m2 de infraestructura aeroportuaria del país, para que sea capaz de responder a este desarrollo y permita mejorar del uso de los m2 disponibles, es decir, aumentar la eficiencia en su uso.

En esta línea, el presidente Piñera anunció en junio 2019 el proyecto de modernización de la red de aeropuertos que, con una inversión de más de MMUSD$1.442, mejoraría el estándar de servicio para los usuarios en 17 terminales del país, y duplicaría la capacidad (214.000 m2 a 537.000 m2) para responder a la demanda de los próximos 20 años. El plan contempla la licitación de cinco aeropuertos actualmente administrados por la DGAC (Pucón, Valdivia, Osorno, Castro y Balmaceda) y uno administrado por la Armada (Viña del Mar).

Además de los aeropuertos existentes, se sumarían Calama, Copiapó, La Serena, Concón, Concepción, Temuco, Pucón, Osorno y Castro, llegando a un total de 15 aeropuertos con capacidad para ofrecer servicios de operación internacional.

Posteriormente, en septiembre de 2019, el presidente anunció durante la inauguración de una nueva sala de embarque del Aeropuerto de Santiago, que se agregaba con este proyecto 26.700 m2 en tres niveles con 12 nuevos puentes de embarque al terminal existente, duplicando la capacidad actual de atención de llegadas y salidas de vuelos internacionales, al pasar de 14 a 26 posiciones.

Finalmente, es importante mencionar que los nuevos contratos de concesiones aeroportuarias presentan un mecanismo explícito para gatillar inversiones, el cual requiere que el concesionario realice una ampliación de obras, una vez que se cumplan las siguientes condiciones: 1) "que el número total de pasajeros internacional embarcados en el Aeropuerto en la hora punta número 30 o 40 (H30 o H40 dependiendo del contrato) haya superado los 2.200 en un año calendario cualquiera, o bien que el número total de pasajeros domésticos embarcados en el Aeropuerto en la hora punta H30 o H40, haya superado los 3.200 en un año calendario cualquiera, lo que primero que ocurra; 2) Que la obra a licitar y su presupuesto oficial cuenten con las aprobaciones respectivas del MOP, DGAC, Ministerio de Desarrollo Social y Ministerio de Hacienda; y 3) Que la modalidad de pago de compensación económica adicional del Estado al Concesionario, para el reembolso de los costos señalados en el párrafo precedente, cuente con las aprobaciones respectivas del MOP, de la DGAC y del Ministerio de Hacienda." Se sugiere por lo tanto para próximas ediciones del ICD el estimar la necesidad de infraestructura en función de esta estructura de gatillo de inversión, de manera que represente de manera más realista las necesidades de crecimiento en infraestructura.

3. SEGUIMIENTO INVERSIONES 2018-2019

Para llevar a cabo la estimación de infraestructura aeroportuaria y cuantificación de la brecha 2018-2027, se tomaron en cuenta los siguientes ítems:

3.1 PROYECTOS DE INVERSIÓN EN AGENDA MOP-CONCESIONES

La estimación se hizo en función de la información oficial del MOP, tanto para regiones como para Santiago. A continuación, se presenta el avance de los 5 proyectos analizados, a la fecha.

Tabla Nº2: Presupuesto inversiones comprometidas, MOP Concesiones, avance 2019

Aeropuerto	Etapa ICD 2018	Etapa actual 2019	Presupuesto por Ejecutar (MM US$)	Presupuesto Ejecutado 2019 (MM US$)
Iquique	Licitación	Proyecto de Ingenieria	64	0
Concepción	Construcción	80% de avances en Obras	35	28[30]
Puerto Montt	Licitación	90% de instalación de faena	30	0
Balmaceda	Agenda	En Licitación	27	0
Subtotal Regiones			156	28
Santiago	Construcción	61,23% de avances de obra	620	379[31]
Total comprometido			**776**	**407**

Fuente: Elaboración Propia

3.2 PROYECTOS DE CONSERVACIÓN EN AGENDA MOP- DAP

A partir del programa de inversiones del MOP y la DAP se identificó los montos que anualmente se proyectan para la inversión en aeropuertos. El resumen considerado en el plan de inversiones en aeropuertos 2018 y 2019 del MOP, es el que se presenta en la siguiente Tabla.

Tabla Nº3: Presupuestos 2017 al 2019 en ejecución por la Dirección de Aeropuertos del MOP

MMUS$ 2017	MMUS$ 2018	MMUS$ 2019	Promedio MMUS$
68,3	62,6	75,8	68,9

Fuente: Elaboración Propia

Siguiendo la metodología del ICD 2018-2027, se puede suponer una inversión promedio de MMUS$ 68,9 anuales a ejecutar por DAP durante los próximos años.

30 Se asume como avance el flujo de inversión real de la construcción y habilitación.

31 Ídem 1.

3.3 INVERSIONES REQUERIDAS, SIN PROYECTO OFICIAL

En el ICD 2018 se estima esta necesidad de infraestructura, considerando un presupuesto de UF 130/m2 para la superficie necesaria estimada para 2030. A la fecha no se cuenta con nueva información disponible, por lo tanto, se considera que el avance 2018-2019 ha sido nulo.

3.4 ESTIMACIÓN DE SUPERFICIE ADICIONAL POR TERMINAL

En el ICD 2018, se estimó la demanda de 15 aeropuertos y aeródromos regionales y el aeropuerto internacional Arturo Merino Benítez. De estos, 3 no están concesionados, y son operados por el sector público (Castro, Balmaceda e Isla de Pascua)[32].

Al actualizar la información mencionada por los nuevos tamaños de los proyectos (Iquique, Calama, Antofagasta y AMB de Santiago) cambian las estimaciones de las brechas estimadas en el ICD 2018. Este cambio se debe a una actualización de las superficies a construir en cada terminal.

Los cambios en las concesiones aeroportuarias han sido recogidos en la siguiente Tabla. En el caso de La Serena, hay un nuevo proyecto en licitación que ampliará el terminal a 8.440 m2. En el caso del Aeropuerto Arturo Merino Benítez, ya se materializó la inversión, por lo que en este momento la brecha de m2 es negativa.

Utilizando la misma metodología del ICD 2018 para determinar el flujo máximo (pasajeros en hora punta típica), se obtienen las demandas de pasajeros. Aplicando al número de pasajeros determinado, el coeficiente de 10 m2/pasajero en terminales que solo tienen movimiento nacional (en hora punta típica) y 17 m2/pasajero en el caso del aeropuerto internacional AMB de Santiago, se obtiene la siguiente demanda de superficie por terminal:

32 Para mayor información, ver ICD 2018-2027, pág. 275.

Tabla Nº5: Avances 2018-2019 de requerimientos de superficie adicional por terminal

Aeropuerto	Superficie Actual (m2)	Superficie con Proyecto (m2)	Superficie total requerida (m2)			Superficie adicional requerida (m2)		
	2019		2022	2027	2030	2022	2027	2030
Arica	5.200		5.810	7.799	8.572	610	2.599	3.372
Iquique	7.926	11.337*	6.743	8.298	9.121		372	1.195
Calama	9.349*		11.094	17.209	18.915	1.745	7.860	9.566
Antofagasta	7.982*		9.202	11.459	12.595		3.477	4.613
Copiapó	3.000		3.819	5.183	5.697	819	2.183	2.697
La Serena	4.500	8.440	6.091	8.529	9.374	1.591	4.029	4.874
Isla de Pascua	1.250		4.286	5.664	6.226	3.036	4.414	4.976
Concepción	8.209	11.209	5.346	6.399	7.034			
Temuco	5.307		5.707	7.814	8.588	400	2.507	3.281
Valdivia	2.200		4.494	5.573	6.125	2.294	3.373	3.925
Osorno	2.150		2.658	3.297	3.623	508	1.147	1.473
Puerto Montt	9.900		8.556	10.758	11.824		858	1.924
Castro	1.000		3.156	4.261	4.684	2.156	3.261	3.684
Balmaceda	2.400	10.351	3.823	4.831	5.310	1.423	2.431	2.910
Punta Arenas	7.000		5.886	7.400	8.133		400	1.133
Subtotal Regiones			**88.693**	**116.501**	**127.851**	**16.604**	**40.938**	**51.653**
Santiago	**379.700**	**406.400**	**116.761**	**155.526**	**202.172**			

Fuente: Elaboración propia, ICD 2018.

Se observa que la brecha para regiones aumentó desde el último ICD en un 4,9%, 5,9% y 4,7 %, respectivamente para los años 2022, 2027 y 2030. En el caso de Santiago, la brecha ha sido cubierta completamente.

Según las proyecciones de demanda realizadas en el ICD 2018, los siguientes terminales ya deberían estar copados en capacidad:

- La Serena
- Isla de Pascua
- Valdivia
- Osorno
- Castro
- Balmaceda
- Santiago

A la fecha, La Serena llamó a licitación, Santiago ya inauguró una nueva sección del aeropuerto, y Osorno ya ha presentado un diseño para la ampliación de su aeródromo y por lo tanto, han salido de esta lista. Según lo anunciado por el presidente Piñera, se llevarían a cabo licitaciones para los aeropuertos de Balmaceda, Valdivia y Castro en los años 2019 y 2021 los dos últimos. Por último, dadas las características del aeropuerto de Isla de Pascua, no se considera necesario agregar mayor metraje al aeropuerto por el momento.

4. RECOMENDACIONES DE ACCIÓN Y/O PROPUESTAS DE MEJORA

A la fecha, el avance de inversión 2018-2019 es de un 46%, por lo que se puede esperar que la brecha se cierre dentro del plazo estipulado por el ICD 2018, escenario idóneo dado el potencial de crecimiento que ha mostrado el transporte aéreo en el país, evidenciado por el hecho que este se ha duplicado entre los años 2010 a 2017. Hay que tener en cuenta que el crecimiento de la industria aérea no implica sólo mejoras en metrajes de los terminales, sino que también se deben incorporar criterios de eficiencia en el uso de los espacios, siguiendo las tendencias mundiales en este aspecto, arista no abordada en la estimación realizada por el ICD 2018.

En esta dirección, sería interesante analizar el papel que han tenido y tendrán las aerolíneas low cost en el futuro del tráfico aéreo y cómo éstas impactarán las necesidades de infraestructura, tomando en cuenta que durante el año 2019 (enero a noviembre), Jetsmart y Sky Airlines concentraron un 15% y 25%[33] respectivamente, de los pasajeros en vuelos nacionales. Ambas compañías estiman crecimientos en sus demandas, por lo que ya han hecho pedidos de flotas (Jetsmart y Sky Airlines de 76 y 22 aeronaves Airbus 320 neo en 2018, respectivamente). A priori, se puede inferir que el metraje de terminal no guarda relación directa con la cantidad ni frecuencia de vuelos low cost, ya que lo que estas líneas aéreas priorizan son los bajos costos de operación. Por lo tanto, a pesar de presentar crecimiento de tráfico aéreo y de cantidad de pasajero transportados, no necesitarían un aumento en infraestructura para su operación.

Finalmente, se mantienen las recomendaciones del ICD 2018, acerca de disponer de planes maestros de largo plazo para modelar de mejor manera la demanda futura y las dimensiones requeridas, y la necesidad de planificar el transporte aéreo alrededor del transporte urbano, con criterios de conectividad de los terminales con las ciudades a través de modalidades de transporte masivo.

33 Estadísticas de JAC.

PUERTOS

1. RESUMEN EJECUTIVO

El ICD 2018-2027 identificó una cartera de 23 proyectos a ejecutar por alrededor de MMUS$5.242, relacionada con proyectos en ejecución, en etapas de preparación, y otras iniciativas de inversión de carácter más estratégico sin estudios terminados.

Esta cartera se clasificó por macrozonas geográficas. Las características de los proyectos permitían distinguir iniciativas de inversión en espacios de atención directa a embarcaciones (construcción, ampliación, mejoramiento y reparación de muelles de atraque) y espacios de apoyo para la gestión de operaciones portuarias como edificios para pasajeros, edificios de oficinas de administración, zonas de concentración de cargas, vías de acceso al puerto, zonas de expansión de actividades portuarias e inversiones en estaciones modales para carga. Esta mirada integral a las necesidades de inversiones responde naturalmente al análisis del modelo de gestión integral de la actividad portuaria.

Desde ediciones anteriores al ICD 2018, se había hecho seguimiento a los conjuntos de intervenciones en carpeta de cada puerto, los que fueron decantando en los que hoy se revisan en su avance efectivo. En este caso, sólo se consideran en ejecución aquellas actividades que están en construcción o con obras terminadas a la fecha de seguimiento de este informe. No se incluye, aquellas que tienen diseños terminados y están en etapas de evaluación ambiental. Se fundamenta este análisis porque finalmente, el proyecto es sólo viable cuando ha superado esta etapa, la que en la gran mayoría de los casos resulta ser el escollo más duro para iniciar la materialización del proyecto.

En total, el avance de inversiones del capítulo puertos a 2019 es de un 8,8% al considerar la cartera de MMUS$5.241,7. El mantener este ritmo de ejecución promedio anual de 7,2% implica materializar esta cartera de proyectos en 14 años, vale decir el 2031, siempre y cuando se mantenga el ritmo de gasto observado.

Tabla N°1: Avance de Inversiones en Puertos 2018-19

Tipo de requerimiento	Inversiones Estimadas 2018-2027 MMUS$	Avance Inversiones 2018-2019 MMUS$	Avance (%) 2019
Zona Norte	751	12	1,66%
Zona Centro	4.418	440	9,96%
Zona Sur	73	10	13,7%
Total	**5.242**	**462**	**8,82%**

Fuente: Elaboración propia en base a información proyectos portuarios.

2. SEGUIMIENTO DE INVERSIONES 2018-2019

La cartera de proyectos identificadas en el ICD 2018 se construyó a partir de los Planes estratégicos de mediano plazo, elaborados por las empresas portuarias para el período 2014-2018. En base a estos planes, estas generaron Calendarios Referenciales de Inversiones, en adelante CRI, en los cuales se identificaron las iniciativas a ejecutar para cumplir con el Plan estratégico. La mayoría de los CRI revisados han cerrado el 2018 o cierran en el año 2019, situación que no permite tener una evaluación de cumplimiento del CRI desde la óptica institucional, como tampoco vislumbrar una nueva mirada de mediano plazo en el tema de inversiones.

Metodológicamente, lo que se ha realizado en el presente informe es observar el avance de las iniciativas identificadas en el ICD 2018 durante los pasados 2 años, para posteriormente explicar las razones por las cuales no han logrado el ritmo de ejecución planificado.

En una mirada más global, la industria portuaria chilena se enfrenta a desafíos importantes. Uno de ellos es mejorar las ZEAP de los puertos con el fin de optimizar la gestión de transporte de productos a las zonas de carga y descarga. Además, se debe definir los tipos de movilidad más eficientes para arribar con los productos a las zonas de carga. Simultáneamente, se debe mejorar las capacidades instaladas para el transporte marítimo, no sólo en lo que se refiere a las longitudes de los muelles de atraque, sino también, el equipamiento mecánico que permite la gestión de carga y descarga de embarcaciones en forma eficiente, minimizando los tiempos técnicos, para mejorar la gestión portuaria. La información disponible indica que el transporte marítimo seguirá creciendo por lo que el mejoramiento de todos los servicios conexos con la actividad es clave para llegar oportunamente con los productos que exporta el país a los mercados de consumo.

Al hacer el seguimiento de los proyectos del ICD 2018, con respecto a la información analizada el año 2019, emergen discrepancias menores y no significativas sobre los montos del total del Programa de Inversiones. Los resultados de la revisión se pueden apreciar en la siguiente tabla:

Tabla N°2: Variaciones Estimación de Inversiones Puertos al 2019

Institución	Nombre del Proyecto	Inversión Total Estimada MMUS$ 2018	Inversión en curso MMUS$ ICD 2018	Inversión 2018-2022 MMUS$ ICD 2018	Inversión 2023-2027 MMUS$ ICD 2018	Inversión Zona Norte MMUS$	Inversión Zona Centro MMUS$	Inversión Zona Sur MMUS$
Empresa Portuaria Arica (EPA)	Construcción Zona de Extensión Actividad Portuaria (ZEAP), Etapa II	7,8	7,8			7,8[34]		
	Mejoramiento Complementario Accesos Puerto Arica	1,0		1,0		1,0		
	Nuevo edificio Corporativo	2,9		2,9		2,9		
	Habilitación de 11ha para operaciones	100,0			100,0	100,0		
	Ampliación frente de atraque para un nuevo sitio	52,0			52,0	52,0		
Empresa Portuaria Iquique (EPI)	Segunda etapa de construcción de nuevo frente de atraque	370,0		370,0		370,0		
Empresa Portuaria Antofagasta	Construcción sitio especializado para graneles	47,0		47,0		47,0		
	Construcción Zona de Desarrollo Logístico La Negra	50,0			50,0	50,0		
Empresa Portuaria Coquimbo	Construcción de nuevo sitio de atraque, explanada y sala de revisión. Modernización Puerto de Coquimbo.	120,0		120,0		120,0		
Empresa portuaria Valparaíso	Nuevo viaducto de acceso a puerto	36,0		36,0			36,0	
	Nueva estación intermodal	30,0		30,0			30,0	
	Ampliación terminal 2	507,0		507,0			507,0	
	Fase 1 frente de atraque sector Yolanda	1.200,0			1.200,0		1.200,0	
	Construcción espacio urbano en borde costero	150,0		150,0			150,0	
	Inversiones Zona de Apoyo Logístico	8,0		8,0			8,0	
	Acceso Cabritería	120,0			120,0		120,0	

34 Se ha considerado el monto programado. El gasto efectivo fue MMUS$6,2.

Institución	Nombre del Proyecto	Inversión Total Estimada MMUS$ 2018	Inversión en curso MMUS$ ICD 2018	Inversión 2018-2022 MMUS$ ICD 2018	Inversión 2023-2027 MMUS$ ICD 2018	Inversión Zona Norte MMUS$	Inversión Zona Centro MMUS$	Inversión Zona Sur MMUS$
Empresa portuaria San Antonio	Dragado de sitio 2 y 3	50,0		50,0			50,0	
	Construcción nuevo Puerto de Gran Escala al sur del puerto actual	1.200,0			1.200,0		1.200,0	
	Habilitación 70ha para actividades logísticas y gestión de tráfico	87,0[35]		87,0			87,0	
	Fase 2 nuevo frente de atraque	870,0		870,0			870,0	
Empresa Portuaria Talcahuano San Vicente	Terminal Marítimo GNL	160,0		160,0			160,0	
Empresa Portuaria Puerto Montt	Construcción de nuevo terminal	60,0		60,0				60,0
Empresa Portuaria Austral	Recuperación capacidad Muelle Prat	13,0	13,0					13,0
Inversión MMUS$		5.241,7	20,8	2.498,9	2.722,0	750,7	4.418,0	73,0

Fuente: Elaboración propia

La tabla N° 2, indicaba una inversión de cartera de MMUS$2.841,7 y consideraba una reserva para los puertos de gran escala de MMUS$2.400 como primera estimación.

Sobre los avances en la ejecución de los proyectos identificados en el ICD 2018, se constata un avance de 1,7% en la zona norte donde la inversión se está localizada en la ZEAP del puerto de Arica y la inversión en la zona de gestión de carga de Portezuelo en Antofagasta.

En relación al avance de inversiones en la zona centro, las inversiones materializadas al 2018 corresponden a la etapa 2 del muelle de atraque costanera del puerto de San Antonio (MMUS$400) y las faenas de dragado de los sitios 2 y 3 (MMUS$40) que fueron realizadas vía concesiones. Estas inversiones representan un avance de 10% con respecto a lo estimado para esta zona en el ICD 2018.

Finalmente, los avances de inversiones en la zona sur corresponden a actividades de inversión en Punta Arenas, en el mejoramiento de la capacidad del muelle Prat, proyecto de MMUS$13, de los cuales se ejecutó la primera fase (MMUS$10), lo que implica un avance de 13,7% de la cartera ICD 2018 para la zona sur.

35 Se ha cargado a esta actividad los MMUS$17, para encuadrar la estimación del ICD 2017

En total, el avance de inversiones del capítulo puertos a 2019 es de un 8,8% al considerar la cartera de MMUS$5.241,7.

Si se analiza la composición de la cartera de inversiones por zonas, la zona relevante es la zona central, donde se concentra el 84,3% de las inversiones para el desarrollo portuario. De hecho, este es el eje estratégico de las inversiones está en lo que suceda en el puerto de Valparaíso y San Antonio. Le sigue la zona norte con un 14,4%.

En términos de cuellos de botella a la inversión, los principales problemas que ha experimentado el flujo de inversiones están relacionados con los largos procesos de evaluación previa de las distintas iniciativas estratégicas en materia de puertos (Resolución de Calificación Ambiental, en adelante RCA, concesiones marítimas, etc.), temas claves que debe ser analizados por las instancias coordinadoras de la actividad portuaria nacional con el objeto de hacer un frente institucional común para avanzar en la materialización de los proyectos. La primera sensación que queda, al revisar el avance de proyectos por empresa portuaria, es la percepción de litigio individual de los procesos de evaluación, sin una mirada estratégica del ente que coordina a nivel nacional el desarrollo portuario. Tal vez una mirada estratégica nacional permitiría anticipar las dificultades y priorizar la inversión portuaria por objetivo estratégico.

Los tiempos técnicos de los procesos de revisión y evaluación parecen excesivos y no acotados, situación que agota las iniciativas de inversión en puertos (i.e: Terminal 2 Valparaíso).

3. RECOMENDACIONES DE ACCIÓN

Al revisar los ICD anteriores al 2018, se aprecia la permanencia de un set de proyectos que representan las iniciativas más relevantes para el desarrollo de este sector. Las más importantes están asociadas a los puertos de Valparaíso y San Antonio. Coincidentemente por el tamaño de la inversión y la complejidad técnica de ejecución en algunos de ellos, los tiempos de ejecución traspasan los horizontes de 10 años que tienen los ICD.

Dentro de los procesos técnicos, para la mayoría de los grandes proyectos, los tiempos de ejecución de los estudios ambientales y la obtención de la RCA son extremadamente largos, incluso mayores que los tiempos de ejecución de las obras.

En este escenario, hacer coherentes las necesidades de contar con puertos que respondan a las necesidades de exportación e importación de bienes y productos del país, se vislumbra en un escenario bastante pesimista, sino se hace algo para resolver los cuellos de botella.

Por otro lado, el Informe de "Plan Nacional de Puertos y Accesos" 2019, identifica una cantidad importante de proyectos de caminos y de ferrocarriles que tienen por objetivo la provisión de servicios de transporte oportuna y eficaz para carga y descarga en instalaciones portuarias, proyectos complementarios a los sectores de atención directa a embarcaciones, que deben ser analizados en el contexto global del desarrollo de los puertos y que deben ser concurrentes con los proyectos de atención directa de embarcaciones.

Una de las principales falencias en la planificación portuaria parece ser el nivel de desarrollo de los estudios ambientales. Siendo una materia extremadamente compleja y sensible, existe la percepción de no responder adecuadamente a las demandas de los entes revisores.

Fortalecer la capacidad de preparación de proyectos portuarios (atención directa y áreas de apoyo) debería ser uno de los objetivos de las empresas portuarias. Esto significa revisar las metodologías, técnicas de evaluación económicas, contenidos de proyectos y requerimientos ambientales.

FERROCARRILES

1. RESUMEN EJECUTIVO

El ICD 2018 identificó una cartera de proyectos a ejecutar por MMUS$5.500, relacionada con los objetivos estratégicos institucionales que se había planteado Ferrocarriles del Estado, en adelante EFE, para el período 2018-2027 e incluso posterior al año 2027.

Básicamente, en la línea de proyectos EFE por financiar, la cartera contemplaba 6 proyectos para aumentar la cobertura de transporte de pasajeros y carga. En la ejecución del "Plan Trienal 2017-2019" se llevarían a cabo actividades de inversión para aumentar la seguridad y continuidad operacional crítica, mejorar la productividad operacional, aumentar el transporte de carga y el transporte de pasajeros. Asimismo, el ICD 2018 identificó iniciativas de inversión para desarrollo de largo plazo donde se esbozó grandes proyectos como el refuerzo del sistema ferroviario a San Antonio, el Bypass a Santiago y el ferrocarril Santiago-Valparaíso.

En resumen, el plan de inversiones tenía por objetivo mejorar la seguridad, confiabilidad, cobertura y capacidad de la red de EFE.

En términos de calendarización de iniciativas de inversión, el ICD 2018 identificó para el período 2018-2023, tres desarrollos importantes (Alameda-Melipilla; Mapocho-Batuco y Puente Bío-Bío). Adicionalmente, EFE ha continuado ejecutando los proyectos correspondientes a "Rancagua Express", proyectos aún no terminados.

En lo que respecta al "Plan Trianual 2017-2019", el informe 2018 identificó las actividades y demandas de recursos de este plan. No obstante, las memorias anuales de EFE muestran que aún hay actividades en ejecución de los planes trianuales 2011-2013 y 2014-2016, los cuales tienen ejecuciones efectivas hasta los años 2018-2019. Proyectos como la "Reparación Puente Toltén", "Reparación Puente Bío-Bío", "Programa de Cruces", "Reposición de Desviadores de Vía", "Reposición de Transformadores", "Reconstrucción Puente Cautín" y un proyecto general de reparación de puentes, son financiados por programas como éstos.

El avance al 2019 de los proyectos identificados en el ICD 2018, para el período 2018-2027 y post 2027 son los siguientes:

Tabla N°1: Avance inversiones cartera proyectos ICD 2017 MMUS$

Plan de Inversiones EFE	Inversión 2018-2023 MMUS$	Inversión 2023 - 2027 MMUS$	Inversión Post 2027 MMUS$	Avance 2019 MMUS$	Avance 2019 (%) sobre Inversión ICD 2018
1. Proyectos EFE por financiar (pasajeros y carga)					
Alameda - Melipilla	367,4	223,6	450,0	31,2	3,0%
Temuco - Gorbea		127,0			
Alerce - Puerto Montt		250,0			
Extensión Merval a Reñaca - Concón - La Calera		212,0	190,0		
Mapocho-Batuco	287,0	250,0		12,5	2,3%
Puente Bio Bio	120,0			4,4	3,6%
Subtotal 1	774,4	1.062,6	640,0	48,0	
2. Proyectos EFE Plan Trienal					
Subtotal 2	**414,4**	**141,3**	**0,0**	**86,8**	**15,6%**
3. Desarrollo de largo plazo					
Refuerzo sistema ferroviario a San Antonio			550,0		
Bypass a Santiago			350,0		
Ferrocarril Santiago - Valparaíso			1.600,0		
Subtotal 3			2.500,0		
Inversión prevista Carteras de Proyectos 1, 2 y 3	**1.188,8**	**1.203,9**	**3.140,0**	**134,8**	**2,4%**

Fuente: ICD 2018.

Al considerar el monto promedio anual de inversión para el período 2018-2019 de MMUS$67,4, permite estimar la duración teórica de ejecución de la cartera 2018-2027. En el caso de la cartera inicial de MMUS$2.392,7 (3.032,7 - 640) implicaría un período de ejecución de 35,5 años. Si se estima el guarismo con el valor de cartera de proyectos actualizada, el monto de la cartera sería de MMUS$2.861 (3.717 - 856) y el período de ejecución de 42,5 años.

2. SEGUIMIENTO DE INVERSIONES 2018-2019

Para el periodo 2018-2023, estaba programado el desarrollo de 2 nuevas líneas para transporte de pasajeros y el puente del río Bío-Bío[36].

Con respecto al tren Alameda-Melipilla, este proyecto iniciará su ejecución el año 2020, contemplando como fecha de término el año 2025. La inversión asociada a esta iniciativa es de MMUS$1.560. Desde el punto de vista del cronograma del ICD 2018, se mantiene en lo programado en términos de plazo, no así en términos de los costos del proyecto (sube desde MMUS$1.100 a MMUS$1.560).

Con respecto al tren de pasajeros que conectará Batuco con Mapocho, durante el presente año se iniciará la etapa de diseño de detalle, actividad que delineará en forma más precisa el costo del proyecto. En términos de cronograma esta obra está programada para el periodo 2018-2023. La inversión preliminar estimada es de MMUS$623 (MMUS$93 adicionales a los estimados en el ICD 2018). Dado los avances en la preparación del proyecto, este podría entrar en operación durante el período 2024-2025.

Sobre la conectividad entre Concepción y San Pedro, EFE tenía en ejecución un proyecto de reparación del puente Bío-Bío, cuyo costo total es de MMUS$6,3. Obviamente, esta actividad es paliativa hasta que se logre materializar el proyecto del nuevo puente ferroviario sobre el río Bío-Bío. Este proyecto fue presentado por EFE a mediados del presente año y corresponde a una moderna solución de conectividad (nuevo puente con dos vías), el cual tendrá un costo de inversión de MMUS$220 (incrementa el costo desde MMUS$120 a MMUS$220), que terminó la etapa de ingeniería de detalle y en junio de 2019 ingresó al sistema de evaluación ambiental. Un cronograma tentativo presentado en el Plan Nacional de Accesos y Puertos 2019, señala como duración del proceso de evaluación ambiental el año 2020, la licitación de obras en año 2021 y la ejecución para los años 2021-2022. Igual que las iniciativas anteriores, este desarrollo se enmarca dentro de periodo 2018-2027. Las actividades iniciales del proyecto serán financiadas por el "Plan Trienal 2017-2019". Con respecto a este plan, el 27 de septiembre de 2017, EFE recibió un aporte fiscal por MMUS$55,3 para dar inicio a las actividades planificadas para el año 2017. En diciembre de 2018, EFE recibió un segundo aporte fiscal por MMUS$12,3. En el acumulado para fines del año 2018, el aporte fiscal alcanzaba al 16% de lo programado para los años 2017-2018 en el Plan Trienal 2017-2019. Lo anterior hace evidente que el plan será ejecutado en un plazo mayor que el trienio 2017-2019, fenómeno que ya ocurrió en los planes trienales 2011-2013 (ejecución 99,4% a diciembre 2018) y 2014-2016 (ejecución 35,9% a diciembre 2018).

Por otro lado, la ley de presupuesto de los años 2017, 2018 y 2019 contempló gastos de inversión para EFE en el presupuesto del Ministerio de Transporte por MMUS$104,3, MMUS$118,5 y MMUS$115,8 respectivamente. Estos recursos estaban distribuidos en 4 partidas de inversión. Como aporte fiscal para el "Plan Trienal 2017-2019", los gastos efectivos para los años 2017, 2018 y 2019 fueron de 99,4%, 23% y 47% de la asignación respectiva (el guarismo del año 2019 considera el gasto hasta agosto 2019).

El saldo de los recursos no asignados al "Plan Trienal 2017-2019" fueron utilizados para realizar actividades de inversión y mantenimientos en los ítems "Ferrocarril Arica-La Paz", "Aporte Mantención Infraestructura" e "Inversiones en Infraestructura Existente".

La información de inversiones de MIDESO indica una cartera de proyectos en ejecución y diseño de MMUS$282,5 y MMUS$288,3 para los años 2018 y 2019 respectivamente. Los costos totales de inversión de la cartera de proyectos son de MMUS$602 y MMUS$606 para los años 2018 y 2019. Lo anterior muestra una cartera que permanece sin variaciones sustantivas para hacer frente a las necesidades operacionales de inversión.

Con respecto al proyecto "Rancagua Express", EFE está ejecutando la última etapa del proyecto, que corresponde básicamente a los mejoramientos del tramo Nos-Rancagua. El proyecto tiene un costo total de MMUS$645,2, y a inicios del año 2019 tenía un avance de 93,6%. La fecha de término del proyecto está prevista para el año 2020.

Para tener un cuadro completo de las inversiones del período se ha agregado una cuarta categoría relacionada con los gastos de inversión de las ejecuciones presupuestarias 2017 al 2019, del Programa 190102, Ferrocarriles del Estado de DIPRES.

Si actualizamos tanto los montos de inversión como los cronogramas obtenemos la siguiente cartera de proyectos:

Tabla N°2: Avance inversiones a 2019 Ferrocarriles ICD 2018-2027

Plan de Inversiones (MMUS)	2018-2019	2020-2027	Post 2027	TOTAL
1. Proyectos EFE por financiar (pasajeros y carga)				
Alameda - Melipilla	31[37]	843	686	1.560
Temuco - Gorbea		127		127
Alerce - Puerto Montt		250		250
Extensión Merval a Reñaca - Concón - La Calera		212	190	402
Mapocho-Batuco	12,5[38]	610,5		623
Puente Bío-Bío	4,4[39]	215,6		220
Subtotal 1	48	2.260,9	856	3.161
2. Proyectos EFE Plan Trienal (Aporte Fiscal)				
Continuidad Operacional Crítica				
Seguridad y Continuidad Operacional				
Productividad Operacional				
Aumento Transporte de Carga				
Aumento Transporte de Pasajeros				
Subtotal 2	86,8	469	0	556
3. Desarrollo de largo plazo				
Refuerzo sistema ferroviario a San Antonio			550	550
Bypass a Santiago			350	350
Ferrocarril Santiago - Valparaíso			1.600	1.600
Subtotal 3			2.500	2.500
4. Otros proyectos (2017-2019)				
Rancagua Express	41[40]			41
Ferrocarril Arica-La Paz	6[41]			6
Aporte Mantención Infraestructura	108[42]			108
Inversión Infraestructura Existente	35[43]			35
Subtotal 4	190			190
Inversión prevista Carteras de Proyectos 1, 2, 3 y 4	321	2.730	3.356	6.407

Fuente: Elaboración propia en base a Datos Dipres y EFE (paridad $700 por 1US$)

Al comparar la tabla de inversiones del ICD 2018 con respecto a los avances efectivos y montos actualizados de la inversión estimada el año 2017 se puede desprender lo siguiente:

37 Gasto estimado para actividades de preparación hasta la fecha.

38 Idem Nota 1.

39 Estimación de gastos en etapas de preparación.

40 Se estima que el remanente de inversión se gasta durante el año presupuestario 2019.

41 Fuente ejecución presupuestaria años 2017-2018-2019.

42 Fuente ejecución presupuestaria años 2017-2018-2019.

43 Fuente ejecución presupuestaria años 2017-2018-2019.

- La cartera de proyecto EFE de pasajero y carga ha aumentado el costo de inversión en MMUS$684, que se explican por el incremento de costo de los proyectos Alameda-Melipilla (MMUS$460), Mapocho-Batuco (MMUS$93) y Nuevo Puente Bío-Bío (MMUS$100). Estos aumentos son usuales, cuando las estimaciones no se realizan con proyectos con ingeniería de detalle terminados. Aun es usual que haya incrementos adicionales producto de los procesos de adquisiciones y actividades a realizar durante los próximos años.
- El plan trienal ha contado con aportes tardíos en los años 2017 y 2018, lo que implica un desempeño que se alejará en su calendario de ejecución programado, tal como ha sucedido con los planes trienales anteriores.
- Se ha agregado una cuarta categoría de proyecto donde se ha incorporado las líneas de inversión adicionales para el proyecto "Rancagua Express" y las asignaciones de la ley de presupuesto para EFE de los años 2017-2019.

3. RECOMENDACIONES DE ACCIÓN

Al analizar el desempeño de los proyectos de inversión de EFE, se evidencian los rasgos usuales de comportamiento asociados a la ejecución de grandes proyectos. A excepción de los proyectos financiados vía ley de presupuesto de cada año para resolver necesidades específicas, actividades de mantenimiento y otras necesidades puntuales para la operación del servicio, las grandes líneas de inversión tienden a rigidizar el presupuesto, cuando los proyectos cambian de alcance por mejoras del mismo, incorporación de actividades no previstas en la etapa de preparación, requerimientos de las evaluaciones ambientales, entre otros.

Si se observa la tabla N° 2, de los MMUS$6.407 de inversión total, 10 proyectos involucran MMUS$5.661, el 88% de la cartera. En esta situación, los esfuerzos de coordinación de cartera, y coordinación técnica de las inversiones son claves. Si bien la priorización de las iniciativas, en las distintas etapas de un proyecto, originan una secuencia de ejecución, las dimensiones de los tiempos técnicos de cada etapa deben tener un seguimiento cercano, para optimizar el uso de los recursos de inversión. Esta labor encargada normalmente a una Gerencia de Inversiones, debe ser monitoreada regularmente por el Comité de Inversiones del Directorio.

En la revisión del avance se aprecia alza en el valor de las iniciativas de inversión, que son mayores a las usuales. El origen de esta anomalía, normalmente se debe a una errada definición preliminar del proyecto (alcance y déficit de diagnóstico en el total de actividades necesarias para materializar el proyecto), estudios de ingeniería básica incompletos e insuficientes; evaluación del mercado de proveedores superficial, subestimación de los requerimientos ambientales de los proyectos, etc.

Otro aspecto importante dice relación con los plazos. Existe un comportamiento casi patológico por ejecutar los proyectos en los menores tiempos posibles, muchas veces no respetando los tiempos técnicos para la elaboración de diseños acabados, que son los que finalmente permiten controlar los incrementos de los costos de inversión. A menores tiempos técnicos, diseños menos acabados, mayores incertidumbres, mayores costos. En proyectos de inversión como los de EFE, las realidades geográficas, pluviometría, ruralidad, dependencia de mercados externos para insumos y productos, los tiempos de técnicos de preparación del proyecto así como para ejecución deben ser materia de análisis detallado para evitar los incrementos de costos.

Finalmente, no existe información detallada disponible de cómo concurren las distintas fuentes institucionales al financiamiento de los proyectos, pero es probable que la oportunidad de disponibilidad de los recursos, también sea un factor que afecta los cumplimientos de plazo de las iniciativas programadas.

SALUD

INFRAESTRUCTURA DE USO SOCIAL

CAMARA CHILENA DE LA CONSTRUCCION

1. RESUMEN EJECUTIVO

El ICD 2018 identificó una cartera de proyectos para el sector de US$10.448 millones, cuyo principal desafío era la ejecución efectiva dado la alta concentración de inversiones en un corto período de tiempo. De hecho, la inversión promedio estimada para el decenio 2018-2027 era de US$1.045. Ningún periodo presupuestario anterior había logrado una ejecución cercana a esa meta de gasto[44].

En término de número de iniciativas, la tarea determinada en el ICD 2018 implicaba un programa de ejecución de 72 proyectos distribuidos en 10 años. El alto grado de compromiso presupuestario para el primer quinquenio desplazaba automáticamente un gran número de iniciativas para el período 2023-2027.

El mismo informe indicó como mecanismo de solución del problema de alta concentración de inversión pública, la opción de recomenzar con la modalidad de APP (Asociación Público-Privada), que había sido desechada por la administración del Gobierno anterior. De hecho, sólo estaba en cartera dar término a 3 proyectos en ejecución para completar un total de 5 establecimientos construidos vía esta modalidad.

La nueva administración de gobierno reactivó el mecanismo y es así como adicional a los 2 proyectos que están en ejecución (Félix Bulnes y Salvador Geriátrico) vía la modalidad APP, se abordará la ejecución de 18 proyectos que forman parte de la cartera de 98 del MINSAL (Ver anexo).

En síntesis, el avance del sector salud a 2020 en base a la proyección asociada al ICD 2018 es el siguiente:

Tabla N°1: Avance inversiones sector Salud 2019 en MMUS$

Tipo de Requerimiento	Tarea 2018-2022 MMUS$	Tarea 2023-2027 MMUS$	Avance Tarea 2019 MMUS$	%Avance 2019/2027
Cartera Proyectos	4.759	2.138	1.802	26%
Torre Valech HUAP y P.Pinel	29	0	9	31%
Proyectos Cartera BIP	0	3.207	0	0%
Hospitales Mediana Estadía	0	315	0	0%
Inversión total	**4.788**	**5.660**	**1.811**	**17%**

Fuente: CChC.

44 El presupuesto de inversión vigente del año 2017 fue de US$561 millones y se ejecutó US$478 millones. El año 2018 el presupuesto vigente fue de US$485 millones y se ejecutó US$387 millones. Finalmente, durante el año 2019, el presupuesto vigente fue de US$802 millones y la ejecución informada hacia fines de año es de US$766 millones.

2. IDENTIFICACIÓN DE NORMATIVAS Y/O CAMBIOS QUE PUEDAN IMPACTAR A LAS PROYECCIONES DEL ICD 2018

En lo que respecta a documentos normativos, el MINSAL ha continuado generando pautas técnicas para el diseño de establecimientos de distintos niveles de complejidad. Estos documentos corresponden a recomendaciones sobre variedades de espacios, dimensiones y contenidos mínimos de los desarrollos técnicos de cada proyecto. En su alcance, estos sobrepasan las normas de autorización sanitaria, cuerpos legales que son requisitos a cumplir para otorgar prestaciones de salud. Esta situación provoca un doble estándar para la inversión pública, la cual muestra en sus proyectos, coeficientes de dimensionamiento mayores a los exigidos legalmente (Norma Técnica Básica) producto de aplicar las recomendaciones del MINSAL a la cartera vigente. El efecto de esta situación se ha traducido en un crecimiento sostenido del tamaño de los proyectos y consecuentemente del precio. Adicionalmente hay un efecto de incremento de superficies unitaria de algunos espacios de infraestructura sanitaria que también han contribuido al incremento del tamaño del establecimiento. Dado este efecto económico, las decisiones sobre parámetros y requisitos mínimos de los espacios asistenciales deberían ser materia de estudios con participación multiprofesional y multisectorial de forma de acordar criterios mínimos de diseño que sean acordes al desarrollo y necesidades del país.

3. SEGUIMIENTO DE INVERSIONES 2018-2019

3.1 CARTERA DE PROYECTOS ICD 2018

El cronograma de ejecución de la cartera indicaba una inversión de US$4.788 millones para el período 2018-2022 y el saldo de US$5.828 millones para el quinquenio 2023-2027. La cartera estaba compuesta por 53 proyectos identificados en el plan de inversiones MINSAL 2015-2018, que estaban en fase de estudios, diseños y ejecución. Adicionalmente, al plan, MINSAL estaba ejecutando otros proyectos[45] extra cartera más otras iniciativas de inversión priorizadas (14 proyectos) en el informe ICD 2018 que estaban en etapas más embrionarias. También el informe identificó la necesidad de camas de menor complejidad para la provisión de servicios de salud menos complejos en las regiones más pobladas del país (3 proyectos).

45 Corresponde a la primera etapa de intervención del HUAP (Torre Valech) y la normalización del Hospital Siquiátrico Philippe Pinel de Putaendo.

Tabla N°2: Cartera en N° de proyectos por Región (2018-2027)

Región	Proyectos de arrastre cartera y extra cartera 2018 (53)	Proyectos Ejecución Extra Cartera 2018 (2)	Proyectos en Preparación 2018 en BIP (14)	Proyectos de Hospitales Larga Estadía 2018 (3)	Cartera Total Proyectos 2018
XV					0
I	1		1		2
II	1				1
III	2				2
IV	2		1		3
V	6	1	2	1	10
XIII	10	1	5	1	17
VI			1		1
VII	5				5
XVI	1				1
VIII	7		3	1	11
IX	9				9
XIV	2				2
X	5				5
XI	2		1		3
XII					0
Total	**53**	**2**	**14**	**3**	**72**

Fuente: Elaboración en base ICD 2018.

Tabla N°3: Estimación de Inversión en MMUS$ de la Cartera (2018-2027)

Región	Proyectos de arrastre cartera y extra cartera 2018 (53) MMUS$	Proyectos Ejecución Extra Cartera 2018 (2) MMUS$	Proyectos en Preparación 2018 en BIP (14) MMUS$	Proyectos de Hospitales Larga Estadía 2018 (3) MMUS$	Cartera Total Proyectos 2018 MMUS$
XV					0
I	122		393		515
II	15				15
III	49				49
IV	160		261		421
V	863	19	683	60	1.625
XIII	2.833	10	948	174	3.965
VI			51		51
VII	897				897
XVI	290				290
VIII	557		760	81	1.398
IX	410				410
XIV	151				151
X	486				486
XI	63		112		175
XII					0
Total	**6.896**	**29**	**3.208**	**315**	**10.448**

Fuente: Elaboración en base ICD 2018.

3.2 CARTERA ACTUALIZADA 2020

Con el cambio de administración, el MINSAL reestructuró la cartera de proyectos y fijó para el período 2018-2022 una cartera de proyectos que recogía la cartera de arrastre del año 2018, una parte de los proyectos priorizados el mismo año y agregó un set de proyectos adicionales, quedando una cartera de inversión modificada.

Tabla N°4: Cartera actualizada de proyectos MINSAL (2018-2022)

Región	Proyectos de arrastre cartera y extra cartera 2018 (1)	Proyectos priorizados 2018 del BIP (2)	Proyectos adicionales para cartera 2018-2022 (3)	Cartera Total Proyectos 2020
XV			1	1
I	1			1
II	1		3	4
III	2			2
IV	2	1	3	6
V	7	2	2	11
XIII	11[46]	4	2	17
VI		1	3	4
VII	5			5
XVI	1			1
VIII	7	1	5	13
IX	9		2	11
XIV	2		5	7
X	4		7	11
XI	2	1		3
XII			1	1
Total	**54**	**10**	**34**	**98**

Fuente: MINSAL

De los 53 proyectos marcados como arrastre en el ICD 2018, que estaban en alguna de las etapas del ciclo de inversiones para ese mismo año, el MINSAL dejó de considerar el Hospital de Frutillar, quedando un total de 52 proyectos de la cartera correspondiente. No hubo modificación en los proyectos de la extra cartera (Torre Valech y Phillipe Pinel), por lo que la nueva cartera de arrastre, incluye a 54 proyectos (Grupo 1, ver Anexo) como obras de continuidad para el período presupuestario 2018-2022.

Del grupo de los 14 proyectos priorizados por el ICD 2018 para financiamiento para el período 2018-2027, el MINSAL solo ha considerado un total de 10 para la cartera 2018-2022 (Grupo 2, ver Anexo).

Por otro lado, agregó a la cartera un total de 34 nuevos proyectos (Grupo 3, ver Anexo) en procesos de EPH/Diseño y algunos en ejecución, quedando el MINSAL con una cartera agregada de 98 proyectos de inversión.

El ICD 2018 indicaba la necesidad de incluir proyectos de hospitales de mediana complejidad en las tres regiones más importantes del país. En virtud que la nueva tarea propuesta por el MINSAL involucra inversiones en Hospitales de mediana y alta complejidad en las regiones V, VIII y XIII se asumirá que la demanda sugerida del ICD 2018 de este tipo de establecimientos está incluida en la cartera del nuevo plan 2018-2022. De este modo, el valor total de la cartera 2018-2022 actualizada, es el siguiente:

46 Se ha considerado como un solo proyecto a los establecimientos El Salvador y Geriátrico.

Tabla N°5: Estimación inversión cartera de proyectos MINSAL (2018-2022)

Región	Proyectos de arrastre cartera y extra cartera 2018 (54) MMUS$	Proyectos priorizados 2018 del BIP (10) MMUS$	Proyectos adicionales para cartera 2018-2022 (34) MMUS$	Cartera Total Proyectos 2020 (98) MMUS$
XV		0	52	52
I	138	0	0	138
II	207	0	65	271
III	46	0	0	46
IV	236	387	499	1.121
V	1.152	899	79	2.129
XIII	3.006	1.084	283	4.374
VI	0	67	184	251
VII	1.078	0	0	1.078
XVI	292	0	0	292
VIII	673	1.062	769	2.505
IX	514	0	88	602
XIV	168	0	900	1.068
X	432	0	363	796
XI	70	65	0	135
XII	0	0	52	52
Total	**8.011**	**3.565**	**3.334**	**14.910**

Fuente: CChC en base Fichas IDI y paridad US$700.

De la comparación entre las tablas de número de proyectos y valor de la cartera se desprende que la tarea definida por el MINSAL ha crecido y consecuentemente la estimación total de inversión. Si aplicamos los avances informados por el MINSAL a los proyectos podemos dimensionar el saldo de la inversión a realizar para el período octubre 2019 -2027. Se aplicará el porcentaje de avance que informa el MINSAL al valor de la infraestructura. Se considerará que los gastos previos a la construcción ya están ejecutados. Asimismo, para todos aquellos proyectos que tienen avance sobre el 90%, se considerará ejecutado las partidas equipo y equipamiento. Al hacer este ajuste, los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla N°6: Saldo por invertir cartera de proyectos MINSAL (2018-2022)

Región	Proyectos de arrastre cartera y extra cartera 2018 (54) MMUS$	Proyectos priorizados 2018 del BIP (10) MMUS$	Proyectos adicionales para cartera 2018-2022 (34) MMUS$	Cartera Total Proyectos 2020 (98) MMUS$
XV		0	52	52
I	106	0	0	106
II	0	0	65	65
III	45	0	0	45
IV	74	387	484	945
V	666	899	79	1.644
XIII	2.708	1.084	283	4.075
VI	0	67	184	251
VII	892	0	0	892
XVI	292	0	0	292
VIII	641	1.062	767	2.470
IX	189	0	31	220
XIV	168	0	900	1.068
X	378	0	361	739
XI	42	65	0	107
XII	0	0	52	52
Total	**6.199**	**3.565**	**3.258**	**13.023**

Fuente: CChC en base información MINSAL, Fichas IDI y paridad US$700.

La última tabla nos muestra que los avances más significativos están en la cartera de arrastre del ICD 2018, donde el avance para los períodos 2017-2018 y parte de 2019 es de US$1.811 millones, cifra mayor a la ejecución presupuestaria para el mismo período (US$1.221 millones), brecha que se explica por los supuestos de gastos de los proyectos en ejecución vía APP, otros de proyectos en modalidad Diseño Construcción (D-C) que aún no registran gastos efectivos y también porque la ficha IDI registra la historia de gastos del proyecto e incluyen gastos en etapas previas al 2018.

En el ICD 2018, se estimó una ejecución para los años 2018-2019 de MMUS$2.062 para el período en análisis, cifra lejana al gasto para los años anteriores a 2017 y el periodo 2018-2019 (septiembre) de MMUS$1.811. Se estimó un total de 30 proyectos en ejecución para el año 2019. Hay 29 en ejecución, de los cuales 27 estaban en la programación primitiva, más el Philippe Pinel (que está atrasado) y el Hospital de Alto Hospicio, que esta adelantado un año con respecto a la programación 2018. Los Proyectos de Lonquimay, Queilén y Diego de Almagro aún están en Licitación. Hay 2 proyectos adicionales que formaban parte de este grupo que están con "Termino anticipado de contrato", obras que deben relicitarse.

En la mirada global, en términos de inicios de proyectos no hay una desviación significativa con respecto al número de proyectos (27 de 30, logro de 90%), pero si hay una brecha en la estimación de gasto, la cual debería ajustarse una vez inicien los flujos efectivos de los proyectos licitados en la modalidad D-C.

El MINSAL se ha propuesto en su Plan Inversiones 2018-2022, la meta de tener para el año 2022; 25 proyectos terminados, 25 proyectos en ejecución y otros 25 en las etapas de Diseño/EPH. A la fecha ya hay 2 proyectos terminados, hay 9 con avances significativos mayores al 50%, estando 5 de ellos en el rango 91 a 99%. Alcanzar otros 14 establecimientos terminados para cumplir la meta, se ve desafiante, dado que muchos de los proyectos en ejecución son de gran envergadura, ergo, largo plazo de ejecución, más allá del plazo para la meta propuesta.

3.3 PROYECTOS CON FINANCIAMIENTO PARCIAL O TOTAL DEL FNDR

En la cartera descrita en la tabla N° 5, existen 15 proyectos que están recibiendo financiamiento total o parcial del FNDR. Estos son los que muestra la tabla siguiente.

Tabla N°7: Proyectos con Financiamiento FNDR (2018-2022)

Nombre del Proyecto	Fuente Financiamiento	Financiamiento FNDR MUS$	Financiamiento MINSAL/APP MUS$	Total MUS$
Normalización Hospital San Vicente de Tagua Tagua	FNDR-APP	0,397	67	67
Reposición Hospital de Cochrane	FNDR	28	0	28
Normalización Hospital de Illapel	FNDR	125	0	125
Reposición Hospital de Huasco	FNDR	24	0	24
Normalización Hospital de Cunco	FNDR-MINSAL	15	12	27
Normalización Hospital de Vilcún	FNDR	28	0	28
Reposición Hospital de Diego de Almagro	FNDR-MINSAL	16	6	21
Normalización Hospital de Taltal	FNDR-MINSAL	33	0	33
Normalización Hospital de Mejillones	FNDR	21	0	21
Normalización Hospital de Ancud	FNDR	6	122	128
Normalización Hospital de Quellón	FNDR-MINSAL	3	73	75
Normalización Hospital de Castro	FNDR-MINSAL	0,309	206	206
Normalización Hospital de Pichilemu	FNDR-APP	2	29	31
Reposición Hospital de La Unión	FNDR-APP	0,945	90	91
Reposición Hospital de Río Bueno	FNDR-APP	1	76	77
		303	680	983

Fuente: Elaboración propia, BIP

La tabla muestra que hay proyectos con financiamiento para etapas de pre-inversión que han sido asignados a la modalidad de financiamiento APP (San Vicente, Pichilemu, La Unión y Río Bueno) para la etapa de ejecución (obras y equipamiento). Solo para el caso de los proyectos cofinanciados parcial

o totalmente por FNDR, la participación de los fondos de asignación regional sólo alcanza al 31% de la cartera de 15 proyectos. Lo anterior permite colegir que gran parte del financiamiento de la cartera de salud se ejecuta con fondos sectoriales y con APP.

3.4 CARTERA DE PROYECTOS A EJECUTAR VÍA MODALIDAD APP

La cartera de proyectos a financiar vía la modalidad APP en esta segunda etapa de la modalidad son 18. Adicionalmente a los anteriores ya hay 3 en operación (Antofagasta, La Florida y Maipú), 2 en construcción (Salvador Geriátrico, Félix Bulnes). El detalle es el siguiente.

Tabla N°8: Proyectos con Financiamiento APP (2018-2022)

Región	Proyecto	Etapa 2019	Avance Proyecto MMUS$ (a septiembre 2019)	Saldo Inversión MMUS$ (a septiembre 2019)	Superficie (m2)
IV	La Serena II	EPH/Diseño	0	387	110.887
IV	San Pablo Coquimbo II	EPH/Diseño	0	358	102.839
XIII	Félix Bulnes	E	200	12	129.788
XIII	HZN	EPH/Diseño	0	258	74.000
XIII	INC	EPH/Diseño	0	254	73.000
XIII	INCA	EPH/Diseño	0	122	35.000
XIII	Salvador-Geriátrico	E	22	247	172.000
XIII	San Luis de Buin - Paine	EPH/Diseño	0	152	43.727
VI	Pichilemu	EPH/Diseño	0	31	8.798
VI	Rengo	EPH/Diseño	0	125	35.896
VII	Cauquenes	EPH/Diseño	0	153	44.000
VII	Constitución	EPH/Diseño	0	157	45.000
VII	Parral	EPH/Diseño	0	153	44.000
VIII	Nacimiento	EPH/Diseño	0	31	8.903
VIII	Santa Bárbara	EPH/Diseño	0	30	8.526
VIII	Coronel	EPH/Diseño	0	191	54.716
VIII	Lota	EPH/Diseño	0	115	33.012
XIV	La Unión	EPH/Diseño	0	91	26.000
XIV	Los Lagos	EPH/Diseño	0	45	13.021
XIV	Rio Bueno	EPH/Diseño	0	77	22.171
			222	**2.989**	**1.085.284**

Fuente: Elaboración propia

La tabla muestra que el proyecto del Hospital Félix Bulnes está avanzando hacia su terminación. Por otro lado, el proyecto Salvador Geriátrico tiene aún un largo camino por recorrer. Por otro lado, la cartera de APP se convocará por grupos siendo el primero el correspondiente a los hospitales de la red Maule (Parral, Constitución y Cauquenes). El calendario real de ejecución estará dado definitivamente por los marcos de financiamiento que el Ministerio de Hacienda fije para los próximos años.

4. RECOMENDACIONES DE ACCIÓN Y/O PROPUESTAS DE MEJORA

Cuando se realizó la determinación de las actividades de inversión para el período 2018-2027, se identificó riesgos para cumplir con la gran tarea. El MINSAL ha iniciado la tarea de renovación y modernización de una infraestructura asistencial pública agotada. Para cumplir con éxito este plan ambicioso, es necesario contar con equipos técnicos adecuados y suficientes, tanto en el nivel MINSAL, Servicios de Salud, MOP por el lado del financiador y, con empresas de diseños, inspección técnica y construcción en el sector privado que estén a la altura de los desafíos. Cuando estas capacidades no están disponibles, tanto las labores de pre inversión, diseños, supervisión de obras y construcción no se desarrollan en un estándar apropiado, emergiendo estudios insuficientes, diseños incompletos, supervisiones de obras superadas por los problemas de proyectos y finalmente obras más onerosas y contratos con plazos extendidos. Existe una percepción que aún es necesario un fortalecimiento de los equipos técnicos de del MINSAL, Servicios de Salud y MOP para realizar adecuadamente las actividades normativas, de contraparte técnica y de asistencia a los proyectos en ejecución. Se debe tener presente que los proyectos de hospitales traspasan largamente las administraciones de gobierno, por lo que los equipos técnicos deberían ser permanentes. Esta situación no siempre sucede y agrega riesgo a la ejecución de la cartera.

Con la agregación como modalidad de ejecución el esquema APP, se podrá adelantar la ejecución de proyectos que estaban desplazados en el cronograma de ejecución esperando disponibilidades de marco presupuestario para el periodo 2023-2027. De acuerdo al Plan del MINSAL, una parte importante de los proyectos programados para ese período, podrían iniciar sus convocatorias antes del fin del presente año y durante el año 2020.

No es fácil hacer un cronograma exacto de los tiempos administrativos y técnicos que conlleva la materialización de un proyecto. Son muchas las entidades envueltas en el proceso, los respectivos Ministerios sectoriales, Ministerio de Hacienda, Contraloría General de la República, MIDESO, Servicios de Salud, Municipalidades, etc. La experiencia muestra que una estructura de unidades de coordinación de proyectos de dedicación exclusiva logra optimizar los tiempos administrativos. Sobre los tiempos técnicos asociados a la preparación de los expedientes de licitaciones y la ejecución de obras, estos son directamente proporcionales a la calidad de preparación del proyecto. Mientras no estén disponibles universalmente herramientas de elaboración y gestión digitales de proyectos, la optimización de los tiempos técnicos será un campo de trabajo abierto.

EDUCACIÓN

1. RESUMEN EJECUTIVO

El ICD 2018-2027 identificó una brecha de necesidades de inversión para el período 2018-2027. Estas necesidades de inversión se estimaron en función del mejoramiento de estándares de infraestructura escolar de espacios educativos, ingreso a la Jornada Escolar Completa, en adelante JEC y espacios para actividad física.

La estimación se hizo sobre una muestra de 6.929 establecimientos educacionales (59% del total) que prestaban servicios educativos a 2.865.021 alumnos (81% de la matricula) para el 2017. Las necesidades de inversión total fueron US$2.249 millones para el período 2018-2022 y US$13.445 millones para el período 2023-2027.

Los avances mostrados durante el período 2015-2016 de las intervenciones de inversión en locales escolares no fueron significativos, como lo indico el ICD 2018.

Adicionalmente al tema inversiones, el sector educación experimentó durante el período 2015-2016, cambios institucionales que afectaron el funcionamiento habitual desde su período gestacional (1988). Mediante la aplicación de la Ley N°20.845 (Inclusión Escolar), se puso fin a la discriminación arbitraria de alumnos, se implementó un sistema de gratuidad progresiva y una educación integral. Se puso fin al lucro con una fecha tope del 31 de diciembre de 2017 y se implementó un sistema de admisión no arbitrario, mecanismo de alta controversia sectorial que ya está instalado. Hasta el año 2018, se aplicó en todas las regiones con excepción de la región metropolitana. A partir del año 2019, ha comenzado la aplicación en esta última.

En lo que respecta a la Ley N°21.040, esta creo un nuevo sistema de educación pública (conocido como des-municipalización), con el objetivo de hacer migrar a los colegios administrados por Municipios y Corporaciones Municipales hacia "Sistemas Locales de Educación" (en adelante SLE). Estas 70 entidades públicas asumirían el rol de sostenedor, lo que implica ser responsable de la administración y gestión de los establecimientos escolares de su dependencia geográfica. Por el ministerio de la ley, se ordenó el proceso y se fijó un cronograma de implementación entre los años 2018-2025, con holgura de plazo máximo para el año 2030.

La primera etapa de instalación correspondió a 4 SLE, durante el año 2018; Barrancas (comunas de Pudahuel, Lo Prado y Cerro Navia), Puerto Cordillera (comunas de Coquimbo y Andacollo), Huasco (comunas de Alto del Carmen, Freirina, Huasco y Vallenar) y Costa Araucanía (comunas de Carahue, Nueva Imperial, Saavedra, Teodoro Schmidt y Toltén). Durante el año 2019 se inició la instalación de otros 3 SLE; Chinchorro (comunas de Arica, Camarones, Putre y General Lagos), Gabriela Mistral (Macul, San Joaquín, La Granja) y Andalién Sur (comunas de Concepción, Chiguayante, Hualqui y Florida). Esta nueva institucionalidad especializada, descentralizada y con identidad territorial ha hecho concurrir en una sola entidad aspectos pedagógicos y administrativos del sistema escolar, esquema que debería dar mayor eficacia al proceso educacional.

Respecto a las metas fijadas en el ICD 2018-2027, se exhibe un 9,6% de la tarea estimada para el quinquenio 2018-2022, y un 1,4% de la tarea estimada para el decenio 2018-2027. Los avances valorizados por año muestran cifras lejanas a las estimaciones de inversión del ICD 2018 para el período 2018-2019 en materia de infraestructura educativa. Sin embargo, pareciera oportuno no acelerar innecesariamente la construcción y reposición de establecimientos educativos, hasta que los SLE estén instalados y con sus estudios diagnósticos terminados. Lo anterior no quiere decir que no se siga invirtiendo en actividades de mejoramiento, rehabilitación y saneamiento de establecimientos educativos hasta que el proceso de implementación de la NEP haya terminado.

Tabla Nº1: Resumen de requerimientos ICD 2018-2027 y avances 2018-19

Tipo de Requerimiento	Tarea 2018-2022 MMUS$	Tarea 2023-2027 MMUS$	Avance 2018-19 MMUS$	%Avance 2019/2027
Aulas	697	6.671	180	2,4%
Espacios Comunes	1.553	6.774	36,8	0,4%
Inversión total	2.249	13.445	217	1,4%

2. IDENTIFICACIÓN DE NORMATIVAS Y/O CAMBIOS QUE PUEDAN IMPACTAR A LAS PROYECCIONES DEL ICD 2018

En relación a los cambios institucionales, en el ICD 2018, se mencionó la implementación de dos iniciativas de ley que impactarían la estructura del sistema educacional chileno, cuerpos legales que están en proceso de implementación parcial (Nueva Educación Pública) y total (Inclusión Escolar).

2.1 SISTEMA DE EDUCACIÓN PÚBLICA (LEY N° 21.040)

El nuevo Sistema de Educación Pública, transfiere los establecimientos educacionales desde 345 municipios, a 70 nuevos SLE, a través de un proceso gradual que durará hasta el año 2025/2030. La ley establece un cronograma de implementación donde, en el periodo 2018-2020 se instalan y entran en funcionamiento 11 SLE, durante el año 2021 se realiza una evaluación intermedia del proceso de instalación y posteriormente entre los años 2022-2025/2030 se realizará la segunda etapa de instalación de 59 SLE. Durante el año 2018, comenzaron a funcionar cuatro SLE: **Puerto Cordillera**, **Barrancas**, **Huasco** y **Costa Araucanía**, los cuales abarcan un total 14 comunas, 294 establecimientos y 57.533[47] matrículas[48]. Durante el año 2019, se inició la implementación de tres nuevos SLE; Chinchorro (4 comunas en la XV región), Andalién Sur (4 comunas en la VIII región) y Gabriela Mistral (3 comunas en RM).

47 El anexo 2 muestra un valor distinto de matrícula 61.086 alumnos. Esto puede deberse a tiempos a distinta data de la estadística.

48 Para mayor información, ver Anexo 1.

Las estimaciones del MINEDUC sobre matrícula incorporada a los SLE indica, 49.281 alumnos para 2019 y 71.076 alumnos para el año 2020, como se observa en la siguiente tabla, extraída del Informe de Implementación de la Ley Nº21.040 en el Senado.

Tabla Nº2: Resumen de Implementación de la Ley Nº21.040

	2018	2019	2020	2021	
				Acumulado	
N° Servicios Locales	4	3	4	11	Evaluación intermedia Consejo de Evaluación
N° de comunas	14	11	16	41	
Matrícula escolar Servicios Locales	57.533	49.281	71.076	177.890	
Establecimientos	237	175	246	658	
Matrícula Jardines	4.127	2.643	3.295	10.065	
Jardines VTF	58	38	55	151	
Docentes	4.783	4.639	6.231	15.653	
Asistentes de la Educación	4.441	3.686	5.198	13.325	
Funcionarios SLEP	346	287	391	1.024	
Población Escolar Comunas	171.804	164.634	143.939	480.377	
Porcentaje Matrícula Servicios Locales del Total	**33%**	**30%**	**49%**	**37%**	

Fuente: PPT Implementación de la Ley Nº21.040 Sistema Nueva Educación Pública, marzo 2019.

Esta nueva estructura busca mejorar la gestión financiera y poner lo pedagógico en el centro de atención de cada SLE. Por otro lado, el traspaso de los establecimientos al nuevo sostenedor no ha afectado la continuidad del servicio educativo.

En la puesta en marcha de la Ley, se ha identificado desafíos debido a la implementación y gestión de los SLE, dados los plazos y la alta complejidad del traspaso, falta de claridad y conocimiento de los roles de los actores del sistema, y, por último, dada a la priorización en los SLE de la gestión administrativa, financiera y de personas, quedando en segundo plano la gestión pedagógica. No obstante lo anterior, el proceso de aprendizaje de los SLE precursores será de gran ayuda para los que vienen en el cronograma.

En relación a la implementación de la Dirección de Educación Pública, a la fecha se cuenta una dotación de 131 personas, y se ha administrado un presupuesto total de MM$ 419.804, cuya ejecución presupuestaria de 2018 fue de 96,4%.

2.2 INCLUSIÓN ESCOLAR (LEY Nº 20.845)

El objetivo de este cuerpo legal era poner fin al lucro en la educación, fin al copago o financiamiento compartido e instalar un sistema único y centralizado de admisión al sistema escolar. Implementó, por lo tanto, la entrega de mayores recursos para fortalecer la educación pública, incrementando la subvención escolar preferencial (SEP) en un 20% para todos los establecimientos que cuentan con esta. Además, estableció la categoría de alumnos preferentes para los alumnos del 3º y 4º quintil de establecimientos gratuitos que cuenten con SEP, y creó el aporte de gratuidad para alumnos de establecimientos gratuitos, con convenio SEP vigente y cuyo sostenedor sea una persona jurídica sin fines de lucro. Adicionalmente, ha permitido el arrendamiento del inmueble donde funciona el establecimiento educacional, así como la compraventa, el uso en comodato y contrato de uso de infraestructura.

La implementación del sistema de Admisión Escolar (SAE) ha sido gradual. El año 2016 se implementó en la región de Magallanes; en el 2017 fueron las regiones de Tarapacá, Coquimbo, O´Higgins y Los Lagos; en el 2018 fueron Arica y Parinacota, Antofagasta, Atacama, Valparaíso, Maule, Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Aysén; y por último el 2019 se incorporó la RM. La puesta en marcha del sistema, también considera una implementación progresiva según los niveles de ingreso, es decir, el primer año de implementación en una región se ingresan a los niveles de pre-Kínder, Kínder, 1º básico, 7º básico y 1º medio y al segundo año se incorporarán el resto de los niveles.

Durante el proceso 2018, El 93,3% de los estudiantes que postularon mediante el Sistema de Admisión Escolar obtuvo un cupo en algún establecimiento de su elección, en las cinco regiones del país que participaron de este proceso. Además, el 69,8% de los postulantes quedó seleccionado en su primera preferencia. Durante el proceso 2019, el 82% de los estudiantes obtuvo cupo en algún establecimiento de su elección, pero sólo un 51,0% quedó en su primera preferencia. Adicionalmente, se han reportado problemas en la plataforma, conocimiento efectico de los plazos a manejar y de los procedimientos relevantes,

En este contexto, el MINEDUC ingreso a inicios del año 2019 a trámite legislativo el proyecto de Ley denominado “Admisión Justa”, el cual busca incorporar la selección por mérito en liceos de excelencia, permitir procesos propios de admisión a establecimientos de especialización temprana y la inclusión de nuevos criterios de justicia al SAE. El avance de esta iniciativa no ha prosperado en las velocidades que esperaba el ejecutivo.

Como otros desafíos en la implementación de la Ley de Inclusión, esta lo relacionado con la compra de los inmuebles por parte de los sostenedores bajo la institucionalidad de fundaciones sin fines de lucro a los propietarios de los inmuebles donde presta servicios educacionales el sostenedor (FSFL). Tan sólo 27 sostenedores han recurrido a Corfo como aval por créditos bancarios para la compra de los inmuebles, de los 5.800 establecimientos particulares subvencionados del país. Esto se ha debido a registros incompletos o inexistentes, casos de infraestructura no regularizada (producto de mejoras paulatinas que han ido realizando los colegios), avalúos fiscales poco exactos y altos costos que conlleva para un sostenedor pequeño el conseguir la documentación necesaria para solicitar un préstamo. A esto se añade las nuevas exigencias de la Ley Nº20.422, la cual “establece normas sobre igualdad de oportunidades e inclusión social de personas con discapacidad”, en el título IV, su párrafo 2º, donde expone sobre educación y exclusión escolar, los cuales complejizan aún más el acceso a créditos para que los sostenedores, dado que los establecimientos educativos deberán cumplir con todos los aspectos normativos para ser elegibles para recibir recursos de préstamos bancarios. Esta situación ha contribuido a enlentecer el proceso de cumplimiento expedito del ministerio de la ley.

3. SEGUIMIENTO DE INVERSIONES 2018-2019

El ICD 2018 identificó una cartera de proyectos de US$15.694 millones a ejecutar durante los años 2018-2027. La inversión promedio estimada para el decenio 2018-2027 fue de MMUS$1.569. Esta demanda de inversión permitiría dotar a la infraestructura escolar de mejores espacios educativos, mayor variedad de estos, terminar con JEC y dotar a algunos locales escolares de espacios deportivos. Los dimensionamientos de las necesidades de inversión por establecimiento implicaban aumento en el tamaño del aula, bibliotecas, centros de recursos de aprendizaje, comedores, cocinas, gimnasio, multideportivos, etc., a través de coeficientes técnicos utilizados en el ICD 2018. Estos correspondían a las recomendaciones deseadas para la infraestructura escolar. De 72 proyectos que se encontraban en cartera de inversión en el ICD 2018, a la fecha están terminados 48. La tabla siguiente nos permite visualizar la tarea determinada el año 2018 y los avances al último trimestre de 2019:

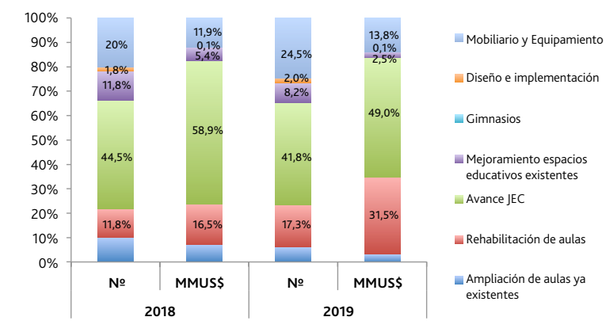
Tabla Nº3: Avances y requerimientos Inversión 2018-2027 (MMUS$) y proyectos ejecutados en 2018-2019

Tipo De Requerimiento	2018-2027 (MMUS$)		2018		2019		2018	2019
	Tarea 2018-2022	Tarea 2023-2027	Nº	MM US$	Nº	MMUS$	%	%
Aulas								
Ampliación de aulas ya existentes	313	3.390	11	9,1	6	2,9	26,1%	32,5%
Rehabilitación de aulas	384	2.623	13	20,6	17	28,9	33,9%	56,7%
Avance JEC	0	658	49	73,8	41	44,9	20,9%	14,9%
Espacios Comunes								
Mejoramiento espacios educativos existentes	522	3.574	13	6,7	8	2,3	16,7%	7,4%
Cocina Comedores	122	827						
Gimnasios	615	619	2	0,1	2	0,1	66,4%	3,3%
Diseño e implementación	196	1.169	22	15,0	24	12,6	28,7%	22,4%
Mobiliario y Equipamiento	98	585						
Inversión total	**2.249**	**13.445**	**110**	**125,3**	**98**	**91,7**	**23,1%**	**20,3%**

Fuente: Elaboración en base ICD 2018, e información de Banco Integrado de Proyectos.

Los avances logrados en términos de inversiones por apertura de intervención son los que muestra la Tabla Nº3. El 2018 se ejecutaron un total de 108 proyectos (de los cuales 2 proyectos están contabilizados en la etapa de diseño y de ejecución), los cuales representan una inversión total de US$542,1 millones y 95 proyectos (de los cuales 3 proyectos están contabilizados en la etapa de diseño y de ejecución) en 2019, con una inversión total de US$451 millones. Por otro lado, hay 73 proyectos que han continuado su ejecución desde el 2018 al 2019. Como resultado, se han llevado a cabo un total de 130 distintos proyectos en ambos años, con una inversión total de US$993 millones. Las últimas dos columnas de la Tabla Nº3, reflejan el porcentaje de lo solicitado por año en relación al costo total de todos los 130 proyectos, según tipo de requerimiento. Esta indica los porcentajes de avance con respecto a las metas fijadas en el ICD 2018 de un 9,6% de la tarea estimada para el quinquenio 2018-2022, y un 1,4% de la tarea estimada para el decenio 2018-2027.

Gráfico Nº1: Participación porcentual por avance en Inversión BIP 2018-2019



Fuente: Elaboración Propia

El Gráfico Nº1, presenta la participación de cada uno de los requerimientos (en cantidad y MMUS$) para los años 2018 y 2019. Se observa que en el área de cocina y comedores no ha habido avance en los últimos dos años, y la Inversión JEC, en promedio representa un 43,2% del número de proyectos y un 53,9% del monto invertido.

En el ICD 2018, se determinó la inversión según el costo por m2 de proyectos incorporados al Banco de Integrado de Proyectos, la cual da cuenta de los costos y metrajes de los proyectos educativos que se están ejecutando durante el periodo estudiado (en ICD 2018 era de 47,5 UF/m2 y con los datos 2018-2019 es de 46,42 UF[49]/m2). Esto muestra que no hay una diferencia significativa por unidad de superficie. Para el dimensionamiento de las necesidades de infraestructura para JEC, se estimó el número de aulas disponibles por modalidad de enseñanza y tipo de sostenedor. La estimación indica que hay al menos 90.507 aulas para la submuestra considerada en el estudio[50].

Al realizar la estimación de cantidad de aulas para ingreso al régimen de JEC para todos los alumnos entre 3° básico y 4° medio de la muestra en análisis se obtiene una necesidad de 94.007 aulas.

49 A la UF a Octubre 2019 (CLP 28.065).

50 Ver anexo.

4. RECOMENDACIONES DE ACCIÓN Y/O PROPUESTAS DE MEJORA

RESPECTO A LOS RITMOS DE EJECUCIÓN

Los proyectos ejecutados durante los años 2018-2019, muestran que, en educación básica y media (en cualquier modalidad de enseñanza), el foco está en reposiciones totales o parciales de centros educativos, financiados mayoritariamente por el FNDR. Los avances valorizados por año muestran cifras lejanas a las estimaciones de inversión del ICD 2018 para el período 2018-2019 en materia de infraestructura educativa.

La implementación de la NEP debería reordenar la oferta de establecimientos dependientes de los SLE, en el sentido de optimizar su uso y tender a la concentración de alumnos en establecimientos de tamaño medio. La misma Ley faculta a los servicios locales para "determinar la apertura, fusión o cierre de establecimientos públicos dentro del territorio de su competencia"; y fomentar el trabajo colaborativo en red de los establecimientos educacionales de su dependencia; entre otras. Lo anterior, implica que podrá optimizar el uso de los espacios entre los establecimientos que compondrán el Sistema Local, tema que ocurrirá solo después de estar en posesión de la red local y tener los respectivos estudios diagnósticos, al menos un par de años desde el inicio de operación de cada SLE.

En este sentido, pareciera oportuno no acelerar innecesariamente la construcción y reposición de establecimientos educativos, hasta que los SLE estén instalados y con sus estudios diagnósticos terminados. Lo anterior no quiere decir que no se siga invirtiendo en actividades de mejoramiento, rehabilitación y saneamiento de establecimientos educativos hasta que el proceso de implementación de la NEP haya terminado.

RESPECTO A LOS CAMBIOS LEGALES

Ley N° 20.845 "Inclusión Escolar": Si bien la implementación de la Ley ha dado cumplimiento al fin al lucro, fin al proceso de selección de alumnos y fin al copago en todos los establecimientos que reciben subvención escolar, aún no ha resultado del todo expedito el proceso de adquisición de los inmuebles donde se presta el servicio educativo por parte de los sostenedores en el formato de fundaciones sin fines de lucro. Los números objetivos dan testimonio de esto. Este tema, debe ser abordado para poner término a lo impuesto por el cuerpo legal.

Una evaluación del proceso debería realizarse con frecuencia bianual para conocer los efectos que provoca la Ley y examinar si estos son coherentes con los objetivos buscados por el legislador.

Ley N° 21.040 "Nueva Educación Pública": Uno de los principales desafíos de esta ley en los aspectos relacionados con la inversión en infraestructura es lograr la adecuada coordinación entre la inversión en reposición y construcción de nuevos establecimientos educativos y los estudios de optimización de oferta que tengan que realizar los SLE para "determinar la apertura, fusión o cierre de establecimientos públicos dentro del territorio de su competencia". Esto requiere de una coordinación estrecha entre los Gobiernos Regionales y el MINEDUC. Mientras se transite por esta senda de transición desde un financiamiento de la inversión en establecimientos de niveles prebásica, básica y media desde el FNDR a un ítem de inversión sectorial, deberá potenciarse la coordinación, para no invertir en sectores donde no sea rentable desde el punto de vista social. Tal vez, pudiera ser oportuno que durante este período de transición solo se resuelvan las necesidades más emergentes para la continuidad de la prestación del servicio educativo.

Si bien es difícil predecir los efectos que tendrá la NEP sobre la infraestructura de los Sistemas Locales, lo evidente es que, al agregar comunas urbanas principalmente, debería haber una optimización del uso de los establecimientos existentes, al desaparecer las competencias territoriales de los sostenedores municipales.

En el tema de recursos de inversión, los SLE por Ley dispondrán cada año de MM$80.000 como piso presupuestario (Artículo 27 Ley 21.040) para inversiones del sector público para cada año presupuestario en infraestructura de liceos tradicionales, mejoramiento de infraestructura escolar, equipamiento de liceos técnico profesionales y fondos de infraestructura adicional (35%) para aportar al FNDR, proporción que se reducirá una vez haya terminado el cronograma de la NEP.

CÁRCELES

1. RESUMEN EJECUTIVO

Al año 2017, el país contaba con 84 establecimientos penitenciarios cerrados en modalidad mixta (8 Establecimientos concesionados y 76 institucionales). En término de plazas, el subsector concesionado contaba con 17.209 plazas y el subsector institucional disponía de 23.159 plazas, 40.368 plazas en el agregado para el mismo año. Al actualizar al año 2019, las plazas por establecimientos concesionados e institucionales, de acuerdo a los documentos del MOP de capacidades máximas de establecimientos carcelarios, tenemos que las plazas de establecimientos concesionados son un poco menores a las del 2017, por lo que el agregado alcanza las 39.731 plazas.

El diagnóstico realizado por el ICD 2018, estimó necesidades de inversión para cubrir la sobredemanda de los establecimientos carcelarios con déficits de plazas (la tasa de ocupación promedio era 106,6% para el año 2017), la brecha por incremento de población penal y la brecha de reposición de infraestructura obsoleta.

En lo que respecta a las regiones con déficit de cobertura, los proyectos de Calama (Región de Antofagasta), El Arenal (Región de Atacama) y La Laguna (Región del Maule), aportarán a la solución parcial y total de las brechas regionales para el horizonte 2027.

Al revisar la cartera de proyectos del sector para los años 2016-2017, había 12 proyectos de infraestructura en diversos estados de maduración (Ejecución, Elaboración de Diseños, Habilitación y Compra de terrenos). Hacia octubre de 2019, el ritmo de avance de los proyectos no muestra una aceleración sustantiva en relación al año 2017.

Tampoco ha habido avances en la elaboración de un plan de inversiones que se haga cargo de la reposición de los edificios penitenciarios de larga data (> 50 años de antigüedad) de tal forma de asegurar mejores estándares de habitabilidad y seguridad que fomenten la reinserción social y laboral de los internos.

En lo que respecta a la búsqueda de terrenos para la construcción de nuevos centros carcelarios, se mantiene la dificultad para encontrar terrenos adecuados (que no generen externalidades negativas en las comunidades cercanas), para iniciar los procesos de inversión de nuevos centros penitenciarios.

Cuando se realizaron las estimaciones de inversiones el año 2017, para el período 2018-2027 la tarea indicaba una inversión promedio anual de US$98 millones adicional a los recursos ya comprometidos para las actividades de mejoramiento, ampliación, normalización y equipamiento de las unidades carcelarias existentes del presupuesto ordinario de cada año. Por otro lado, en promedio para los últimos siete períodos, el presupuesto inicial de inversiones ha sido US$67 millones, el vigente MMUS$51 y la ejecución de un 51% del presupuesto vigente. Con estas ratios, es difícil pensar de avanzar significativamente en un proyecto de infraestructura relevante en la modalidad tradicional. Tal vez sea conveniente, explorar nuevamente la modalidad de concesiones para avanzar en las necesidades más icónicas vía esta modalidad.

Tabla Nº1: Avance brecha 2018-2019 y requerimientos 2020-2027

Ítem Brecha	Inversión (MMUS$)		
	Brecha 2018-2027	Avance 2018-19	Avance %
Brecha de plazas por sobreuso	307	0	0,0%
Brecha de plazas por incremento de población	160	42,8	26,8%
Brecha de plazas por obsolescencia	508	0	0,0%
Totales	**975**	**42,8**	**4,4%**

2. SEGUIMIENTO DE INVERSIONES 2018-2019

El ICD 2018 identificó una cartera de proyectos de US$975 millones a ejecutar durante los años 2018-2027. Esta inversión fue calendarizada en US$877 millones para el período 2018-2022 y MMUS$98 para el período 2023-2027, acorde con los siguientes requerimientos.

2.1 RESUMEN ESTIMACIONES ICD 2018-2027

2.1.1 BRECHAS DE PLAZAS POR SOBRE USO

En base a los índices ocupacionales de los recintos carcelarios, se estimó las necesidades de infraestructura para dar solución a la demanda de plazas que excedían la capacidad del establecimiento. El dimensionamiento realizado el 2017 como incrementos de plazas fue el siguiente: Región de Arica-Parinacota (142 plazas), Antofagasta (401 plazas), Atacama (348 plazas), Valparaíso (1.575 plazas), Maule (546 plazas), Bío-Bío (163 plazas) y la Región Metropolitana (2.877 plazas). En el agregado, se estimó que había un déficit de 6.052 plazas, lo que implicaba una superficie a construir de 178.534 m2.

2.1.2 BRECHA DE PLAZAS POR INCREMENTO DE POBLACIÓN

En esta dimensión, se realizó una modelación de la demanda de infraestructura carcelaria, simulación que estimó la demanda sobre dos opciones: tasa de encarcelamiento variable y tasa de encarcelamiento constante. La primera opción arroja como resultado una estimación de necesidad de infraestructura mayor que la segunda. Por otro lado, dado que hay proyectos en ejecución de establecimientos carcelarios y estos serán entregados a explotación durante el período 2018-2027, se ajustó la demanda de infraestructura en función de los proyectos en proceso de construcción. Los resultados del ICD 2018, para el modelo de tasa de encarcelamiento variable indicó la necesidad de construir 5.065 nuevas plazas, con una dimensión de superficie de 149.418 m2 a construir. Este resultado fue ajustado en función de la contribución que aportarían los proyectos: La Laguna (construcción), El Arenal (diseño) y Calama (pre diseño), dejando finalmente una demanda de 3.160

plazas, esto es 93.060 m2.

2.1.3 BRECHA DE REPOSICIÓN POR OBSOLESCENCIA

A agosto de 2017, había 39 recintos penitenciarios con una data de construcción mayor o igual a 50 años sobre el universo de 84 establecimientos. Estos establecimientos tenían una capacidad de 9.397 plazas. Al estimar las necesidades de reposición acumulada de plazas por agotamiento u obsolescencia para los años 2022 y 2027, se llegó a una necesidad de 9.939 y 388 plazas respectivamente, lo que da un total de 10.027 plazas para el año 2027. En términos de superficie a reponer era 295.300 m2.

La brecha de superficie a construir valorizada en US millones de octubre de 2017 para los tres tipos de brecha fue el siguiente:

Tabla Nº2: Resumen requerimientos de inversión 2018-2027

Ítem Brecha		
	2018-2022	**2018-2027**
Brecha de plazas por sobreuso	307	307
Brecha de plazas por incremento de población	81	160
Brecha de plazas por obsolescencia	489	508
Totales	**877**	**975**

Fuente: ICD 2018.

Por otro lado, el ICD 2018 presento una cartera de 12 proyectos que estaban en distintos estados. Al revisar la cartera de proyecto en MIDESO para el año 2019, se observa los siguientes avances en la cartera de proyectos carcelarios presentados el año 2017:

Tabla Nº3: Avance cartera de proyectos octubre 2019

N°	Proyecto	Montos en MMUS$			Situación Octubre 2017	Situación Oct. 2019	Inicio Explotación
		Total	Gasto Oct. 2019	Saldo p/ pagar			
1	"Construcción Recinto Modelo de Educación y Trabajo La Laguna" Talca, región del Maule, establecimiento para 2.320 nuevas plazas. Código BIP 30112254	167,8	40,6	127,2	En etapa de construcción de obras (resolución de adjudicación totalmente tramitada en agosto del año 2017)	Avance Financiero 24,2%.	2024
2	"Construcción Recinto Modelo de Educación y Trabajo El Arenal" Copiapó, región de Atacama, establecimiento para 1.636 nuevas plazas. Código BIP 30118818	162,2	2,1	160,1	Hubo que realizar ajustes presupuestarios para ejecutar los diseños	En ejecución de diseños. Avance 1,3% costo estimado proyecto	2026
3	"Construcción Complejo Penitenciario Femenino Arica" CPF en la Región de Arica que entregará 384 nuevas plazas femeninas. Código BIP 30082252	42	41,5	0,5	En proceso de ejecución de obras.	Avance Financiero 98,8%.	2020
4	"Reposición del CCP de Concepción (instalaciones y estructura)" La capacidad total del CCP es 1.608 plazas. El proyecto intervino 544. Código BIP 30100041	44,1	40,5	3,6	En proceso de ejecución de obras.	Avance Financiero 93,2%.	2020
5	"Construcción Complejo Penitenciario de Calama" Región de Antofagasta, establecimiento para 980 internos. Código BIP 30421513	110,2	0,1	110,1	En proceso de ejecución de diseños	Obtuvo el RS de MIDESO en agosto de 2017 para el desarrollo de la etapa de diseño.	2024
	Total (MMUS$)	**525,8**	**124,8**	**401,5**			

Fuente: Elaboración en base a datos MIDESO.

2.2 AVANCES 2018-19

En términos de recursos, la cartera tiene un costo de US$526 millones, a diferencia de los US$558 millones que registraba el ICD 2018. La diferencia estriba en el ajuste de los montos de cada proyecto de acuerdo a un mejor estudio de este. Por otro lado, De los US$526 millones se ha ejecutado US$124,8 millones.

Al comparar el estado de avance entre el presente informe y el ICD 2018, se observa que sólo hay 5 proyectos de continuidad a octubre de 2019, 3 en ejecución y 2 en elaboración de diseños.

De los otros 7 proyectos analizados en el informe 2018, había 2 proyectos de compra de terrenos para los penales de (Chillán-Los Ángeles) y (Valparaíso-Coyhaique), en los cuales aun no hay resultados. Había otros 2 proyectos concesionados (Rancagua y Alto Hospicio) que estaban explorando al tiempo del ICD 2018 la posibilidad de ampliación de plazas (800 y 300 plazas respectivamente).

Ambas ampliaciones se realizaron y fueron pagadas en la modalidad de concesiones. Finalmente había otros 3 proyectos, de los cuales el CDP Quillota y el CCP Parral, ya estaban terminados y el CDP Mulchén no presenta registro de avance de etapas previas a la ejecución.

En lo que respecta a los plazos de ejecución y entrega de los edificios a explotación, en particular aquellos que contribuyen a cerrar las brechas en algunas regiones, "Calama" en Antofagasta, "El Arenal" en Atacama y "La Laguna" en el Maule, se desprende atrasos de diseños y obras que implicarán una contribución posterior a cerrar parcial o totalmente la brecha regional estimada en el ICD 2018.

El proyecto de "Calama" en Antofagasta, tiene alrededor de un 1% del presupuesto de la actividad de diseño aprobado para el año 2019, lo que significa que los diseños tomarán los años 2020 e inicios del 2021. Lo anterior implica, un inicio de ejecución el año 2022 y una entrega del edificio no antes de fines del 2025. En esta simulación estaría un año atrasado en el ingreso a explotación.

El proyecto de "El Arenal" de Atacama, ha ejecutado gastos en la etapa de diseño desde el año 2018 y tiene gasto programado hasta el año 2020. Si se licita el año 2021, su ejecución se iniciará en 2022, por lo que el inicio de explotación será para el año 2026. El proyecto estaría cuatro años atrasado en el ingreso a explotación.

Finalmente, el proyecto de "La Laguna" del Maule, tiene un avance financiero de obra aproximado de 35% para alrededor de 24 meses de ejecución. Mejorando el avance promedio mensual y coordinando adecuadamente las partidas de equipos y equipamiento podrían terminar el proyecto en para fines del 2023, lo que implica un atraso de tres años con respecto a lo programado (2021 año inicio explotación según ICD 2018).

Si contabilizamos los avances financieros de estos tres proyectos como contribución a la tarea determinada para los años 2018-2027 tenemos lo siguiente:

Tabla Nº4: Avance brecha 2018-2019 y requerimiento 2020-2027

Ítem Brecha	Inversión (MMUS$)		
	Brecha 2018-2027	Avance 2018-2019	Saldo 2020-2027
Brecha de plazas por sobreuso	307	0,0	264
Brecha de plazas por incremento de población	160	42,8	117
Brecha de plazas por obsolescencia	508	0,0	508
Totales	**975**	**42,8**[51]	**889**

Fuente: ICD 2018.

Los avances logrados en términos de inversiones para los años 2018-2019 representan un 4,4% de avance en la tarea determinada en el ICD 2018. Si realmente se desea abordar en forma significativa la solución a los proyectos de cárceles, la tarea implica inversiones anuales superiores a 100 millones de dólares por período presupuestario.

La ejecución del proyecto de Calama una vez materializado, aún dejará una brecha de 961 plazas para el año 2027. Por su parte el proyecto "El Arenal" dejará a la región con un superávit de 123 plazas. Finalmente, el proyecto de "La Laguna", dejará un déficit de 677 plazas en la región del Maule.

2.3 EVOLUCIÓN PRESUPUESTO DE INVERSIÓN

Si revisamos las asignaciones presupuestarias de inversiones para el período 2013-2019 se observa lo siguiente:

Tabla Nº5: Presupuesto de Inversiones, Subsecretaría de Justicia, Subtítulo 31 (MM US$)

Ítem	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Oct. 2019
Presupuesto de Inversiones Inicial	96	55	46	41	72	67	91
Presupuesto Vigente	38	51	34	24	62	62	89
Ejecución Presupuestaria	9	21	17	23	59	45	19
Ejecución Presupuestaria (%)							
- Presupuesto Inicial	9,2%	37,8%	37,6%	56,0%	82,1%	67,7%	20,89%
- Presupuesto Vigente	22,9%	41,4%	50,4%	95,8%	95,6%	73,7%	21,32%
Tasa de Cambio	495	570	654	677	650	641	689

Fuente: Elaboración propia en base a información DIPRES. Cifras en millones de dólares de cada año.

Cuando se realizaron las estimaciones de inversiones el año 2017, para el período 2018-2027 la tarea indicaba una inversión promedio anual de MMUS$98 adicional a los recursos ya comprometidos para las actividades de mejoramiento, ampliación, normalización y equipamiento de las unidades carcelarias existentes del presupuesto ordinario de cada año.

La tabla muestra que, en promedio para los últimos siete períodos, el presupuesto inicial de inversiones ha sido MMUS$67, el vigente MMUS$51 y la ejecución de un 51% del presupuesto vigente.

Con estos ratios, es difícil pensar de avanzar significativamente en un proyecto de infraestructura relevante en la modalidad tradicional. Tal vez sea conveniente, explorar nuevamente la modalidad de concesiones para avanzar en las necesidades más icónicas vía esta modalidad. Los 8 recintos carcelarios que trabajan en esta modalidad, concentran un poco más del 40% de las plazas y no hay ninguna restricción técnica que nos impida en aumentar la participación de esta solución de infraestructura para las necesidades vigentes.

51 Se ha imputado el avance solo a la actividad de incremento de plazas por aumento de población penal. No hay al momento definiciones para distribuir estos avances en las otras 2 categorías.

3. RECOMENDACIONES DE ACCIÓN Y/O PROPUESTAS DE MEJORA

Se detallan a continuación los principales hallazgos de la revisión de los avances 2018-2019 y las propuestas de mejoras para los años que siguen:

3.1 DESAFÍOS PRINCIPALES

Solucionar brechas de obsolescencia: Más allá de la estimación más o menos exacta del número de plazas a disponer para enfrentar la demanda de encarcelación en Chile para él 2027, hay necesidades emergentes relacionadas con el estado de los edificios institucionales, los cuales presentan brechas de antigüedad importante que afectan la seguridad de los internos y el personal, la calidad de vida de los internos y que hacen más compleja la convivencia interna y las posibilidades de reinserción social de estos a la sociedad vía educación, enseñanza de algún oficio, etc.

Solucionar hacinamiento: La sobredemanda de internos genera condiciones de hacinamiento y aumenta el deterioro de la infraestructura carcelaria, por estrés de las instalaciones y redes servicios. Además, congestiona los distintos espacios carcelarios, afectando también la convivencia de los internos.

Ejecución presupuestaria: El desempeño de las actividades de inversión no muestra un aprovechamiento óptimo de los recursos que provee la administración cada año calendario para ejecutar proyectos de inversión. Un análisis de los principales problemas que impiden una ejecución efectiva y eficaz en relación al presupuesto debería realizarse a la brevedad.

Gestión de los proyectos: Se aprecia al mirar la cartera de proyectos que hay demoras mas que usuales tanto en la elaboración de los diseños como en la ejecución de obras y posterior habilitación de los recintos carcelarios. Tal vez hay un espacio ahí para mejorar y llegar con mejor oportunidad a la solución de las necesidades de inversión.

Búsqueda de terrenos: Esta es una labor estratégica que debe realizarse con anticipación en función del plan estratégico de inversiones. La cantidad de recintos carcelarios con antigüedad mayor a 50 años, es demasiado grande y obliga a buscar los espacios de terrenos para reponer recintos o construir nuevos establecimientos carcelarios.

3.2 REVISIÓN PLAN ESTRATÉGICO DE INVERSIONES

El Ministerio de Justicia debería considerar en su plan anual las prioridades de infraestructura con una mirada de equidad que priorice las necesidades de acciones emergentes. Los énfasis deben colocarse en disponer de suficiente cantidad y calidad de espacios para que se pueda facilitar la reinserción de los internos. En esta dirección se debería tener una cartera priorizada de proyectos a ejecutar vía modalidad institucional y concesiones. En la misma dirección debe fortalecerse las acciones de mantenimiento de los recintos carcelarios para mejorar la seguridad de los internos y evitar el desgaste acelerado de los edificios.

En abril del presente año, desde el Ministerio de Justicia presentó una nueva iniciativa llamada "Plan nacional de Infraestructura 2019 -2029", cuyo objetivo es el de realizar mejoras a las instalaciones carcelarias, con prioridad en los penales con mayor hacinamiento, logrando un sistema penitenciario más eficaz y capaz de otorgar garantías de seguridad públicas a la población. A la fecha no hay información acerca del avance efectivo de esta propuesta.

Recuadro:
Ocupación Carcelaria: Algunas cifras comparativas

A nivel sudamericano, Chile se encuentra ubicado en el sexto lugar en cuanto a número de personas encarceladas según las cifras disponibles del World Prision Brief a diciembre de 2019, mientras que, respecto a la tasa de encarcelamiento por cada 100.000 habitantes, nuestro país ha descendido tres escalones respecto del informe anterior, ocupando el octavo lugar. Según la información más reciente, la mayoría de los sistemas penitenciarios de América Latina presentan sobrepoblación, promediando un 156%. Respecto al nivel de ocupación, Chile se encuentra en la posición número 12, lo que habla de un nivel de hacinamiento menor los demás países de la región, a excepción de Surinam. A nivel global, de los casi 190 países que componen el ranking, Chile alcanza los lugares, 45, 59, y 124, respectivamente, en las estadísticas mencionadas.

Tabla N° 1: Ocupación Carcelaria en Sudamérica

País	Población Carcelaria		Tasa de encarcelación p/ 100.000 habitantes		Nivel de ocupación (%)		Prisioneras mujeres (%)	
		Ranking		Ranking		Ranking		Ranking
Brasil[52]	773.151	1	366	1	167,7	3	4,9	10
Colombia	123.005	2	246	5	153,5	5	7,1	5
Argentina	103.209	3	230	9	122,1	9	4,8	11
Perú	90.934	4	278	4	232,2	2	5,6	7
Venezuela	57.096	5	178	12	153,9	4	5,3	8
Chile	42.921	6	232	8	100,4	12	8,5	2
Ecuador	40.006	7	233	7	140,1	8	7,4	4
Bolivia	18.195	8	158	13	363,9	1	8,2	3
Paraguay	13.607	9	199	10	143,1	7	6,5	6
Uruguay	10.243	10	295	2	112,1	11	5,3	8
Guyana	2.216	11	284	3	147,2	6	3,5	12
Surinam	1.000	12	183	11	75,2	13	2,8	13
Guayana Francesa	726	13	243	6	117,9	10	10,3	1

Fuente: World Prison Brief, disponible en: https://www.prisonstudies.org/highest-to-lowest/prison-population-total

52 Solo superado por EE.UU. (2.121.600) y China (1.700.000) en el ranking analizado.

Recuadro:
Diagnóstico sobre necesidades de infraestructura judicial

Información catastral de infraestructura Judicial

El poder judicial en Chile está constituido por tribunales que están regulados por un estatuto jurídico que indica el capítulo IV de la Constitución y el código orgánico de tribunales.

Como tribunales ordinarios del Poder Judicial se considera a: la "Corte Suprema", Las "Cortes de Apelaciones", los "Juzgados de Letras", los "Juzgados de Garantía" y los "Tribunales de Juicio Oral en lo Penal". También forman parte del poder judicial algunos tribunales especiales como los "Juzgados de Familia", los "Juzgados de letras del Trabajo" y los "Juzgados de Cobranzas Laboral y Previsional". Adicionalmente a lo anterior, teniendo presente que se está en una etapa de transición desde los antiguos "Juzgados del Crimen" a las nuevas instancias definidas en la reforma procesal penal, aún existe un juzgado del crimen terminando las causas pendientes del antiguo sistema judicial, el cual ha sido considerado para este diagnóstico preliminar.

Por otro lado, la información de infraestructura disponible para este diagnóstico por instancia del poder judicial, no está desagregado universalmente por cada tipo de tribunal. Lo anterior no permite construir ratios generales de superficie por tipo de tribunal o por tipo de causa. Por lo anterior, no es posible elaborar análisis comparativos que permitan deducir brechas de infraestructura por tipo de tribunal. Utilizando una información catastral de la Corporación de Administración del Poder Judicial se deduce que los inmuebles que están dedicados a las funciones de tribunales en el país alcanzan una superficie construida de alrededor de 582.582 m2. Al separar por instancias judiciales por tipo de tribunales se encuentra lo siguiente:

Corte Suprema, Cortes de Apelaciones y otros tribunales: La información catastral no permite separar los 15.844 m2 del inmueble principal del Poder Judicial, hoy ocupado por la Corte Suprema, Corte de Apelaciones Santiago y otros tribunales especiales que funcionan en el Palacio de Tribunales. Asimismo, al analizar la información del catastro de las otras Cortes de Apelaciones solo es posible conocer las superficies utilizadas por los tribunales de alzada en los casos Copiapó, Valparaíso, San Miguel, Rancagua, Chillán, Temuco, Valdivia, Puerto Montt, Coyhaique y Punta Arenas; 10 sobre 17 que imputan 41.355 m2 construidos para estos tribunales de alzada. En los otros 7 casos, los edificios que ocupan las cortes de apelaciones, también otorgan cabida a otros tribunales de primera instancia, que en el agregado corresponden a 35.954 m2. En total, la superficie edificada de los inmuebles de la Corte Suprema y Cortes de Apelaciones en régimen de uso total o parcial es de 77.309 m2.

Juzgados de Letras, Garantías, Juicio Oral, Familia, Letras del Trabajo, Cobranza Laboral y Previsional y, del Crimen: La información del Poder Judicial indica la siguiente distribución de tribunales por "Corte de Apelación"

Tabla N°1: Tribunales de primera instancia 2019

Cortes de Apelaciones	Juzgado Civil y Competencia Común	Juzgado de Cobranza Laboral y Previsional	Juzgado de Familia	Juzgado de Garantía	Juzgado Letras del Trabajo	Juzgado del Crimen	Tribunal de Juicio Oral	Total
Arica	3		1	1	1		1	7
Iquique	5		1	1	1		1	9
Antofagasta	11		2	3	2		2	20
Copiapó	10		2	3	1		1	17
La Serena	14		3	5	1		2	25
Valparaíso	26	1	11	12	2		6	58
San Miguel	13	1	8	9	3		5	39
Santiago	31	1	6	12	2	1	7	60
Rancagua	11		4	6	1		3	25
Talca	16		5	8	2		4	35
Chillán	7		1	3	1		1	13
Concepción	23	1	6	9	2		3	44
Temuco	17		2	8	1		3	31
Valdivia	11		2	5	2		2	22
Puerto Montt	12		4	4	2		2	24
Coyhaique	5		1	1	1		1	9
Punta Arenas	6		1	1	1		1	10
Total	**221**	**4**	**60**	**91**	**26**	**1**	**45**	**448**

Fuente: Memoria Institucional Poder Judicial, 2018

La superficie edificada de estos 448 tribunales de primera instancia corresponde al menos a lo que indica la Tabla N°2:

Tabla N°2: Superficie Edificada Aproximada[53] Tribunales de primera instancia 2019

Cortes de Apelaciones	Número Tribunales	Superficie Edificada (m2)
Arica	7	5.327
Iquique	9	2.583
Antofagasta	20	12.277
Copiapó	17	12.183
La Serena	25	19.026
Valparaíso	58	55.377
San Miguel	39	48.102
Santiago	60	196.921
Rancagua	25	22.664
Talca	35	25.548
Chillán	13	10.708
Concepción	44	24.375
Temuco	31	23.870
Valdivia	22	17.314
Puerto Montt	24	18.608
Coyhaique	9	4.361
Punta Arenas	10	6.029
Total	**448**	**505.273**

Fuente: Elaboración propia en base a catastro CAPJ

53 De los 77.309 m2 construidos donde están localizados la Corte Suprema y las Cortes de Apelaciones sólo 41.355 m2 tienen uso exclusivo para estas instancias judiciales. El saldo de 35.954 m2 son compartidos en inmuebles donde también funcionan tribunales de primera instancia.

Datos disponibles

Durante el año 2018 ingresaron 3.549.819 causas por competencia en los tribunales de primera instancia. A septiembre de 2019 hay un registro de ingreso de 2.607.411 causas. La desagregación de éstas por tipo de tribunal son las siguientes:

Tabla N°3: Ingresos de causas por tipo de tribunal 2018 y 2019

Tipo de Tribunal	N° Causas Ingresadas 2018	N° Causas Ingresadas Enero-Sept. 2019	N° Causas Proyectadas 2019
Juzgado Civil y Competencia Común	1.845.642	1.331.031	1.774.708
Juzgado de Cobranza Laboral y Previsional	415.544	284.161	378.881
Juzgado del Crimen	278	230	307
Juzgado de Familia	602.541	468.694	624.925
Tribunal de Juicio Oral y Juzgado de Garantía	606.975	461.168	614.891
Juzgado Letras del Trabajo	78.839	62.127	82.836
Total	**3.549.819**	**2.607.411**	**3.476.548**

Fuente: Estadísticas Poder Judicial

Al elaborar un coeficiente global de tribunales de primera instancia por causas se observa lo siguiente:

Tabla N°4: Causas por tipo de tribunal 2018

	Juzgado Civil y Competencia Común	Juzgado de Cobranza Laboral y Previsional	Juzgado de Familia	Tribunal de Juicio Oral y Juzgado de Garantía	Juzgado Letras del Trabajo	Juzgado del Crimen
N° de Tribunales	221	4	60	136	26	1
Causas/Tribunal	8.351	103.886	10.042	4.463	3.032	278

Fuente: Estadísticas Poder Judicial

Esta tasa de causas por tribunal como promedio es un valor referencial grueso. El valor más fino sería disponer de la información de jueces por tribunal, coeficientes que permitiría afinar estimar el número de causas por Juez, elemento que permitiría estimar un coeficiente de rendimiento.

Al revisar para el año 2018 las causas pendientes a finales del mismo año para los tribunales Civiles y de Competencia común se aprecia lo siguiente:

Tabla N°5: Número de causas civiles pendientes al fin de año 2018

Cortes de Apelaciones	Juzgado Civil y Competencia Común	Juzgado de Cobranza Laboral y Previsional	Juzgado de Familia	Tribunal de Juicio Oral y Juzgado de Garantía	Juzgado Letras del Trabajo	Juzgado del Crimen	Total
Arica	8.854	2.305	1.083	7.836	152	2	20.232
Iquique	21.964	6.895	3.287	15.713	856		48.715
Antofagasta	39.460	19.641	3.546	24.110	1.679		88.436
Copiapó	22.341	8.365	1.598	7.652	250		40.206
La Serena	30.790	23.024	4.486	12.967	2.196	1	73.464
Valparaíso	69.792	55.805	6.848	42.466	4.523	79	179.513
San Miguel	97.703	49.241	13.429	47.451	2.741	56	210.621
Santiago	389.991	435.641	22.611	89.510	11.994	44	949.791
Rancagua	34.356	19.932	4.145	18.018	1.251	5	77.707
Talca	36.523	18.686	5.742	21.186	1.158	17	83.312
Chillán	17.389	9.551	2.774	8.969	699	2	39.384
Concepción	48.609	35.742	5.204	36.196	2.922	2	128.675
Temuco	29.748	18.385	4.265	15.699	1.352	9	69.458
Valdivia	18.166	12.392	3.096	14.486	659		48.799
Puerto Montt	18.500	10.715	2.928	10.625	824	5	43.597
Coyhaique	4.008	995	540	2.163	145		7.851
Punta Arenas	6.835	2.621	1.412	3.303	443	3	14.617
Total	**895.029**	**729.936**	**86.994**	**33.844**	**225**	**225**	**2.124.378**

Fuente: Estadísticas Poder Judicial

La tabla anterior muestra la limitada capacidad de resolución de causas en los tribunales de primera instancia, lo que refleja un déficit de oferta de tribunales. Lo anterior, no necesariamente podría significar déficit total de infraestructura. Tal vez un proceso de uso de horario extendido de los tribunales, como se hace en otros sectores del ámbito público, que conlleva solo incrementos de gastos operacionales podría mejorar los estándares de rendimientos de resolución de causas.

Recomendaciones de estándares de Infraestructura y costeo preliminar

En año 2014 una consultora contratada por el CAPJ realizo estimaciones de déficit de infraestructura de tribunales. Para ello, hizo un levantamiento de oferta para algunas regiones y sobre la base de modelos o plantillas estándares de arquitectura hizo una determinación preliminar de demanda de superficies adicionales y costos de inversión.

Al realizar un ejercicio de aplicar las sugerencias del estudio para los tribunales de primera instancia en base a los datos disponibles (para este estudio preliminar), se puede determinar las siguientes necesidades de ampliación para la Infraestructura de tribunales existente:

Tabla N°6: Estimación de estandarización tribunales existentes m2

Área Geográfica	Superficie Construida 2019 m2	Propuesta Superficie s/ Nuevos Estándares m2	Brecha de Superficie m2
Arica	8.975	33.371	24.396
Iquique	11.142	53.719	42.577
Antofagasta	19.915	18.265	-1.650
Copiapó	13.138	22.693	9.555
La Serena	21.568	66.602	45.034
Valparaíso	61.527	134.650	73.123
San Miguel	50.919	94.951	44.032
Santiago	212.765	133.170	-79.595
Rancagua	26.478	59.132	32.654
Talca	35.021	84.950	49.929
Chillán	11.987	109.077	97.090
Concepción	28.469	42.523	14.054
Temuco	26.807	76.640	49.833
Valdivia	20.563	53.981	33.418
Puerto Montt	19.974	58.090	38.116
Coyhaique	6.313	25.687	19.374
Punta Arenas	7.021	27.901	20.880
Total	**582.582**	**1.095.402**	**512.820**

Fuente: Basado en Manual de Diseño de Modelos de Arquitectura para edificios Judiciales. Ed. 2014. CAPJ.

Para llegar a una real necesidad de las necesidades se debe considerar más dimensiones en el análisis. En primer lugar, al asumir necesidades de ampliaciones por mejores estándares de infraestructura, se está considerando que la infraestructura existente está en buenas condiciones, supuesto fuerte que no siempre es realista. Esto lleva a una subvaloración de la cartera de inversiones.

Por otro lado, el Poder Judicial está llevando a cabo un proceso de inversiones de larga data, con una cartera de proyectos en ejecución. Si por simplicidad se asume un efecto de neteo entre ambos escenarios, se puede asumir que los costos asociados a estas superficies son de UF 25.641.000 (512.820 m2 por 50UF/m2) o aproximadamente US$ 1.040 millones.

CONCLUSIONES

La primera conclusión de este diagnóstico preliminar es la necesidad de disponer de información catastral actualizada de la CAPJ. Esto implica poder disponer de las áreas de edificios que cada tribunal usa para el ejercicio de su función. En una segunda derivada es necesario conocer el formato de operación de cada tribunal en lo que se refiere a salas judiciales (Jueces por instancia), información que permitiría elaborar ratios de eficiencia en la resolución y atención de casos judiciales.

Como segundo aspecto, es necesario conocer los formatos de soluciones de infraestructura que está usando la CAPJ para la materialización de los tribunales de primera instancia. Estos formatos permiten dimensionar en función de la demanda de casos, el tamaño y localización de los tribunales. Como se evidencia del estudio parcial realizado en año 2014, el tema de disponibilidad de terrenos también constituye un desafío para acercar la solución de problemas judiciales a las personas.

Los números de casos pendientes que se arrastran de año en año (un poco más de 2.100.000 casos), los que se inician cada año (alrededor de 3.500.000 de casos), da evidencia de la necesidad de aumentar el número de tribunales si es que se desea abordar el tema de la oportunidad judicial. Estadísticas de demoras promedios de resoluciones de casos judiciales muestran que hay espacio para acortar los plazos. Abordar esta problemática obviamente no solo implica inversiones sino también aumento de costos operacionales por aumentos de personal y bienes y servicios de consumo.

RIESGO Y RESILIENCIA DE LA INFRAESTRUCTURA

CAMARA CHILENA DE LA CONSTRUCCION

Edición:
Gerencia de Estudios CChC
Alondra Chamorro
Juan Carlos de la Llera

Contribuciones:
Paula Aguirre
Eduardo Allen
Gabriel Candia
Sebastián Castro
Alondra Chamorro
Rodrigo Cienfuegos
Juan Carlos de la Llera
Tomás Echaveguren
Jorge Gironás
Jorge León
María Molinos
Felipe Rivera
Magdalena Vicuña
Sebastián Vicuña

SECCIÓN 1: INTRODUCCIÓN

MOTIVACIÓN

Pocos países en el mundo han sufrido a través de su historia amenazas naturales de la magnitud y frecuencia que hemos experimentado como país. Como ejemplo emblemático está el mega terremoto de Valdivia de mayo de 1960, que aún no ha sido superado por la historia sísmica conocida reciente. Chile es objeto de un conjunto de amenazas naturales extremas cuya recurrencia y magnitudes son significativamente más altas que en otros países de la región. Así, en el último siglo Chile ha sido afectado por más de 85 terremotos de magnitud Richter M_s 7,0 o mayor, 18 de ellos considerados altamente destructivos[1], han ocurrido 11 erupciones volcánicas de consecuencias mayores, al menos 16 catástrofes causadas por efectos climáticos extremos (sequías, aluviones y grandes inundaciones) y 8 temporadas catastróficas de incendios forestales[2]. La situación actual de sequía a raíz del cambio climático se manifiesta además con extraordinaria fuerza en nuestro territorio [Vicuña et. Al., 2019].

Solo en aproximadamente una década, Chile ha experimentado la erupción del volcán Chaitén (2008), el que devastó a la ciudad de Chaitén y forzó la evacuación de miles de personas; el terremoto y tsunami del Maule (2010), el sexto de mayor magnitud registrado en la historia conocida, que afectó casi al 70% del país y el 80% de su población (de la Llera et al., 2017), el terremoto de Iquique (M_W 8,2) del 1 de abril de 2014, y el de Illapel (M_W 8,4) de septiembre de 2015 que dejó 15 fallecidos y más de dos mil viviendas destruidas (ONEMI 2015). Estos dos últimos terremotos generaron también tsunamis con efectos severos en algunas localidades. También en 2015 sufrimos las devastadoras remociones en masa en las zonas de Atacama, Coquimbo, Palena y Aysén, junto con la erupción de los volcanes de Villarica y Calbuco. En 2017 numerosos incendios forestales arrasaron con casi 600.000 hectáreas en la zona centro y sur del país, dejando diez víctimas fatales[3]; y en el año 2019, las condiciones climáticas del país han dejado un déficit hídrico que alcanza un 72% en la zona central y un 30% en la zona sur, completando así 10 años de una mega sequía.

Estas amenazas naturales extremas y sus consecuencias sobre el entorno construido y social son claramente una particularidad de Chile[4] y han dado pie para hablar de un gran Laboratorio Natural para le Geociencia [Aguilera et al., 2018]. De hecho, la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) señala que Chile cumple con siete de las nueve características que definen a un país como vulnerable (Gobierno de Chile 2017, s.f.). Esto resulta de las características geomorfológicas de su territorio, principalmente por sus zonas costeras bajas, zonas áridas, cobertura forestal, predisposición a la sequía y desertificación, alta contaminación atmosférica urbana, y alto gradiente en dirección E-W, entre otros.

A nivel sísmico, el contexto andino es el resultado patente de la interacción tectónica entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana que convergen ambas a una rapidez relativa del orden de 68 mm/año en

1 El número se va actualizando constantemente debido a nuevos eventos. Ver: Grandes Terremotos En Chile: Sismos Importantes y/o Destructivos (1570 a la fecha). http://www.csn.uchile.cl/sismologia/grandes-terremotos-en-chile/ último acceso Enero 17, 2018.

2 Sin duda han existido mucho más de 8 incendios forestales en los últimos 100 años, como también más de 11 erupciones volcánicas, pero no todas han constituido grandes desastres en término de infraestructura e impacto social. Aquí se toma la información de The International Emergency Disaster Database (EM-Dat). Ver: www.emdat.be/database

3 CONAF "Número de incendios forestales y superficie afectada a la fecha" http://www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en-chile/estadistica-de-ocurrencia-diaria/ último acceso Junio 12, 2017.

4 Cuando hablamos de desastres "de origen natural" nos estamos refiriendo a aquellos desastres gatillados por un evento natural extremo, pero que se transforman en desastre principalmente debido a las características sociales, económicas y culturales de las comunidades afectadas.

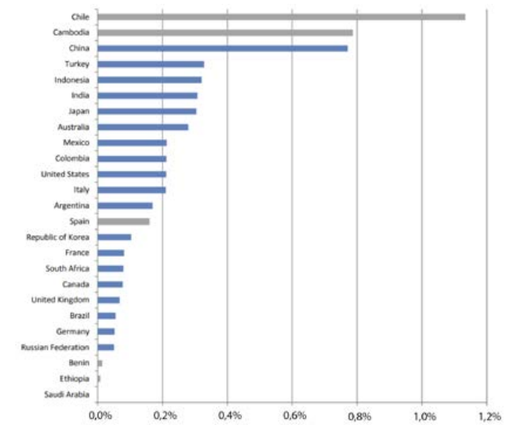
dirección prácticamente E-W (Ruegg et al. 2009). La interacción entre estas placas es responsable de nuestra característica geografía física de oriente a poniente caracterizada por una impresionante Cordillera de los Andes que se alza por sobre los 4 km, una depresión (valle) central delimitada al poniente por una Cordillera de la Costa, y una plataforma continental que se extiende hasta una fosa marina a aproximadamente 160 km al poniente de la costa con una profundidad máxima estimada de 8.065 m y que recorre una longitud de 5.900 km. Nuestra gran actividad sísmica, posiciona a Chile como uno de los países más sísmicos del mundo junto a Japón. Y es en este gran Laboratorio Natural (Ref. D.NN.) que aparece también otro aspecto muy distintivo: la posibilidad de comprender a gran escala las interdependencias entre distintos tipos de amenazas naturales y sus consecuencias sobre el entorno construido y social.

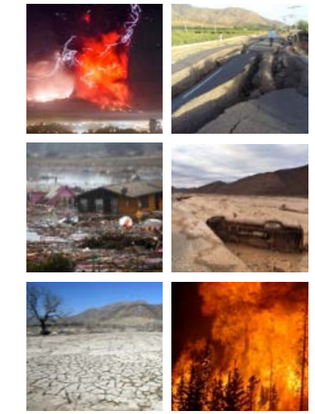
Como resultado de la actividad tectónica, existe otro importante factor de peligro para Chile, los más de mil volcanes que tiene a lo largo de su territorio, 90 de ellos considerados actualmente activos[5]. En los últimos años se han registrado 5 erupciones, siendo la más importante la anteriormente mencionada erupción del volcán Chaitén en 2008, seguidas por las erupciones del volcán Puyehue en 2011, Copahue en 2012, Villarrica y Calbuco en 2015. Si bien es un tema en estudio, es evidente que algunas de las grandes erupciones volcánicas son aceleradas por la ocurrencia de estos grandes terremotos de subducción propios del país.

A nivel climático, la cordillera funciona como un gran biombo climático (Vicuña et al., 2019) que nos expone también a amenazas que presentan características muy distintivas: gran diversidad, alta magnitud, gran tamaño y alta frecuencia. Uno de los mayores responsables de la variabilidad climática interanual de nuestro país se debe al fenómeno del Niño y la Oscilación del Sur (ENSO, Vicuña el al., 2019), fenómeno que se desarrolla en el Océano Pacífico ecuatorial central. Producto de una alteración en magnitud y orientación de los vientos, el transporte de aguas superficiales se ve debilitado, lo que favorece la aparición de una corriente cálida en la zona ecuatorial que al superar ciertas temperaturas se denomina fase del Niño. La contraparte de este fenómeno es conocido como la Niña y corresponde a la aparición de temperaturas más frías sobre el Pacífico, con una mayor intensidad de los vientos alisios y el desarrollo de períodos de sequía. Se ha estimado que los eventos climáticos extremos pueden afectar el crecimiento del PIB en un 0,19% y aumentar en un 0,39% la inflación en el país (Cashina et al., 2015). Es también de esperar que los eventos de este tipo vayan en aumento en el tiempo debido al impacto creciente del cambio climático (UNISDR 2016b).

Si miramos solo estas dos amenazas, no es de sorprender entonces que Chile sea considerado dentro de los miembros de la OECD, como el país más expuesto a desastres de origen natural, con un 54% de su población y 12,9% de su superficie total expuesta a tres o más tipos de amenazas (Dilley et al., 2005). Las consecuencias de esta condición se manifiestan en dimensiones y escalas que impactan a toda la sociedad y afectan de forma importante el desarrollo del país. En promedio, Chile ha sufrido, cada año entre 1980 y 2011, pérdidas cercanas al 1,15% de su PIB debido a desastres de este tipo (UNISDR 2015a) (Figura 1). Un ejemplo reciente de la envergadura de estos mega eventos naturales fue el terremoto M_W 8,8 del 27-F de 2010 que afectó gravemente a más de 13,8 millones de habitantes en el país y produjo pérdidas por alrededor de 30 mil millones de dólares, alcanzando un 18% del PIB nacional (SVS 2012).

5 SERNAGEOMIN, "Ranking de los 90 volcanes activos de Chile" http://sitiohistorico.sernageomin.cl/archivos/Ranking-de-Volcanes.pdf/ último acceso 20 enero 2018.





Fuente: reproducida de G20/OECD 2012.

Figura 1: (a) Pérdidas anuales, como porcentaje del PIB, asociadas a desastres en países del G20 más otros países seleccionados para el periodo 1980-2011; (b) imágenes de eventos recientes en Chile y considerados en CREDEN

A pesar de lo anterior, lo cierto es que Chile ha sabido enfrentar estos eventos de manera adecuada, saliendo incluso vigorizado institucionalmente de ellos (Gil, 2016). Primero, Chile ha desarrollado una institucionalidad acorde a la mitigación y gestión de riesgos que ha disminuido el impacto que eventos naturales extremos futuros tienen sobre la población. Un ejemplo claro de esto es en términos de la regulación sísmica en el ámbito de la construcción, que nació con la Ordenanza General de Construcciones luego del terremoto de Talca de 1928, la Norma Chilena NCh433 para el diseño sísmico de edificios luego del terremoto de Valdivia de 1960, y sus modernizaciones prácticamente después de cada terremoto mayor.

Por otra parte, el Estado ha desarrollado experiencia en el manejo de las emergencias causadas por estos mega eventos. Esto se observa claramente cuando se compara la respuesta del Estado hoy respecto de eventos hace 80 años, o incluso con lo ocurrido en el 2010. La organización de la Oficina Nacional de Emergencia luego del terremoto de 1960 y su institucionalización en 1974 claramente marca esta historia, así como también el proceso de modernización de esta institución que se llevó a cabo luego del 27/F.

Los desastres han inducido al Estado a desarrollar una mejor institucionalidad (Gil, 2016) para el bien de quienes habitamos Chile, incluso cuando no hay emergencias. Ejemplos de lo anterior son la creación del Servicio Sismológico Nacional en 1907 (actualmente el Centro Sismológico Nacional CSN), la Corporación Nacional de Fomento (CORFO) luego del terremoto de Chillán en 1939, el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) en 1980, el Observatorio Vulcanológico de Los Andes del Sur (OVDAS) luego de la erupción del Chaitén en 2008, el nuevo Centro de Alerta Temprana de ONEMI y el Sistema Integrado de Predicción y Alarma de Tsunamis (SIPAT) del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) luego del mega evento del 2010.

En definitiva, como es seguro que en el territorio chileno seguirán ocurriendo terremotos, tsunamis, erupciones volcánicas, inundaciones, sequías, aluviones, incendios forestales, deslizamientos, trombas marinas, marejadas y otros fenómenos asociados como la "marea roja", la posibilidad de sufrir con frecuencia importantes daños y pérdidas tanto en términos de vidas humanas, como económicas y financieras en el

entorno construido, el manejo adecuado de los distintos componentes del ciclo del riesgo es uno de los mayores desafíos que enfrenta el Estado de Chile, y del cuál debe hacerse responsable. Esto es modulado a la vez, por el desarrollo de una institucionalidad que, si bien es imperfecta, ha permitido mejorar la calidad de vida de todos en términos de una mayor resiliencia frente a estas grandes amenazas naturales.

Por razones de extensión, este capítulo toma sólo una parte del problema que dice relación con el concepto de resiliencia de la infraestructura, o entorno construido, frente a amenazas naturales. El foco de este capítulo es el concepto de resiliencia, el que será debidamente definido en las secciones que siguen. Una de las fortalezas del concepto de resiliencia es que trasciende a los sistemas físicos, e involucra otras dimensiones tales como la económica, ambiental, social y sicológica de las personas. Estas dos últimas son particularmente complejas y escapan el propósito de este capítulo en su primera versión, focalizando la discusión únicamente en los efectos sobre el entorno construido y sus implicancias operativas y económicas.

En el año 2016, y teniendo en mente la relevancia de enfocar el problema de los desastres de origen natural, nace un trabajo colaborativo de más de 80 expertos, profesionales de la industria, representantes del gobierno y miembros del Consejo Nacional de Innovación para el Desarrollo (CNID) que buscaron desarrollar para el país una estrategia de resiliencia frente a amenazas naturales extremas. El sustrato para esta estrategia fue la articulación efectiva del sistema nacional de I+D+*i* en resiliencia en torno a 14 tareas específicas, las que quedaron reflejadas en el documento de la Comisión de Resiliencia Frente a Desastres de Origen Natural (CREDEN) (CREDEN, 2016.). Los actores de este sistema lo constituyen los centros de investigación, las universidades, las organizaciones no gubernamentales, la industria y el estado en todas aquellas actividades y programas que promuevan el avance en mayor resiliencia del país usando la evidencia científica que proporciona la investigación, pero que no se queda sólo en eso sino que en el desarrollo de nuevos métodos, productos y servicios, y la innovación asociada que finalmente desplaza recursos de actividades de menor a mayor rentabilidad social y privada. Otro resultado importante de esta Comisión fue la identificación de 5 condiciones habilitantes para lograr este desarrollo, la primera de ellas la creación de una nueva institucionalidad de naturaleza pública que permitiera priorizar los esfuerzos y darle consistencia a la implementación de esta estrategia a través del tiempo. Esta institucionalidad nació en el año 2019, y se conoce como el Instituto para la Resiliencia ante Desastres (ITReND).

La Estrategia Nacional de I+D+*i* en resiliencia tiene un doble propósito: (i) fortalecer y acelerar el desarrollo de las capacidades que Chile tiene en I+D+*i* para generar el conocimiento requerido que permita aumentar la resiliencia del país, reduciendo así los efectos físicos, económicos, ambientales y sociales que derivan de los desastres; y (ii) crear valor global aprovechando la singularidad de nuestro país como una ventaja innovadora sostenible que permita crear una nueva industria de productos y servicios en torno a la resiliencia (CREDEN, 2016). Esto implica, entre otras cosas, identificar los factores de vulnerabilidad subyacentes, muy importantemente la infraestructura, a modo de mitigar el riesgo de personas y comunidades expuestas y a través de ello posicionar al país como un foco relevante mundial para el I+D+*i* en resiliencia ante desastres de origen natural.

ESTRATEGIA NACIONAL DE RESILIENCIA FRENTE A DESASTRES DE ORIGEN NATURAL (CREDEN)

La Estrategia de I+D+*i* para la resiliencia frente a desastres de origen natural se construyó a partir de la visión descrita y de los compromisos adquiridos por el Estado de Chile en el Marco de Acción de Hyogo (2005-2015) y el de Sendai (2015-2030). El primero, firmado por Chile el año 2005, nos compromete a reducir de manera considerable las pérdidas que ocasionan los desastres, tanto en términos de vidas humanas como en cuanto a los bienes sociales, económicos y ambientales (UNISDR 2005). Entre las recomendaciones de este acuerdo está la formulación de una Política Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, cosa que Chile cumplió el año 2014 a través de la creación de una Plataforma Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres liderada por ONEMI (ONEMI 2016a). Luego, para concretizar esta Política en un Plan de Acción se tomó en cuenta el segundo documento, el Marco de Acción de Sendai, firmado por Chile el año 2015. El acuerdo de Sendai tiene la novedad de que incluye de manera explícita el fomentar el conocimiento en desastres y garantizar su difusión promoviendo el acceso a datos fiables (UNISDR 2015b). De este modo, el Plan Estratégico Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres señala como objetivo específico "desarrollar las capacidades científicas del país" (ONEMI 2016b), para lo cual la creación de CREDEN constituyó un primer y muy importante esfuerzo.

Por otro lado, la creación de CREDEN también está conectada con la Estrategia Nacional para la Ciencia y la Tecnología cuyo objetivo es generar investigación aplicada e innovación en el país (Ciencia para el Desarrollo 2015). En este contexto se definieron "áreas prioritarias" muy amplias que guíen los esfuerzos en I+D+*i* de Chile. Entre éstas figura la resiliencia ante desastres de origen natural[6].

Con este doble propósito estratégico, la Comisión CREDEN se enfocó en seis tipos de amenazas naturales que, dado su alto impacto, pueden conducir a situaciones críticas a los complejos sistemas de la sociedad: terremotos, tsunamis, erupciones volcánicas, aluviones, fenómenos climáticos extremos e incendios forestales. Como en la Estrategia CREDEN se busca recoger la naturaleza compleja de estos fenómenos, sus interdependencias y consecuencias en las distintas fases del ciclo de riesgo, esto obligó a crear un marco conceptual interdisciplinario que abarcara la resiliencia del entorno físico y social.

Lo anterior condujo a un conjunto integrado de catorce tareas que se agruparon en torno a cuatro dimensiones: (i) la dimensión social de la resiliencia; (ii) la dimensión de desarrollo; (iii) la dimensión de evaluación y gestión del riesgo; y (iv) la dimensión de caracterización de las amenazas y exposición.

Como complemento a este trabajo se identificó también un conjunto de cinco condiciones necesarias para su éxito. Ellas se hacen cargo de distintas fallas del sistema de I+D+*i* que deben ser corregidas de forma urgente para poder sostener esta estrategia en el largo plazo, abordando las principales debilidades del sistema, y asegurando la colaboración entre todos los actores involucrados, principalmente el estado, las instituciones de educación superior, la industria y la sociedad civil. La Tabla 1 resume los elementos que conforman la estrategia CREDEN.

6 Discurso de la Presidenta Michelle Bachelet al recibir el informe de la Comisión Presidencial "Ciencia para el Desarrollo de Chile", en http://www.cnid.cl/2015/07/24/discurso-de-la-presidenta-michelle-bachelet-al-recibir-el-informe-de-la-comision-presidencial-ciencia-para-el-desarrollo-de-chile/ último acceso 20 enero 2018.

Tabla 1: Elementos de la Estrategia de CREDEN (CREDEN 2016)

Propósito	Hacer de Chile un país más resiliente frente a amenazas naturales mediante respuestas originales en el I+D+i que impacten positivamente a su desarrollo			
Valores	· Un I+D+i de excelencia sensible a los contextos físicos y sociales · El compromiso con la calidad de vida y bienestar de las personas y comunidades expuestas · La aspiración a la equidad de las personas expuestas a riesgos naturales · El fomento a la participación responsable y significativa de todos los actores · La generación de una cultura resiliente para nuestro país · Un I+D+i para una gobernanza efectiva en la gestión de riesgos naturales			
Dimensiones	Dimensión social de la resiliencia	Dimensión de proyección para el desarrollo	Dimensión de simulación y gestión del riesgo	Dimensión física de las amenazas naturales y exposición
Tareas	T1: Resiliencia Social frente a Desastres de Origen Natural T2: Resiliencia de Líneas Vitales e Infraestructura Crítica T3: Proyectos Demostrativos de Resiliencia Regional y Comunitaria	T4: Bienes Públicos y Políticas de Activación de la Demanda por Innovación en Resiliencia frente a Desastres T5: Próxima Generación de Tecnologías, Materiales Sustentables, Componentes y Sistemas. T6: Nuevas Aplicaciones de las TICC* y otras Tecnologías Habilitantes	T7: Escenarios de Desastres de Origen Natural T8: Simulación de las Pérdidas y Evaluación del Riesgo y la Resiliencia frente a Desastres T9: Evaluación y Mejoramiento de la Resiliencia del Entorno Construido	T10: Física de los Procesos de Amenazas Naturales T11: Sistema Nacional de Monitoreo y Reporte de Amenazas Naturales T12: Modelos Nacionales de Amenazas Naturales T13: Sistemas de Alerta Temprana T14: Modelos Operacionales Predictivos de Respuesta frente a Desastres
Condiciones Habilitantes	· Institucionalidad para el I+D+i en resiliencia frente a desastres de origen natural · Integración de datos e información · Desarrollo de capital humano avanzado en resiliencia · Desarrollo de infraestructura para el descubrimiento científico y la innovación en resiliencia · Vinculación con el medio y diseminación científica			

*TICC: Tecnologías de la Información, Comunicación y Control

DEFINICIONES IMPORTANTES

Antes de entregar algunos elementos básicos del ciclo de riesgo frente a amenazas naturales, es bueno explicar en detalle, pero con un lenguaje sencillo seis términos claves que permiten comprender el marco conceptual sobre el que se construye el resto del capítulo. Los términos son: **amenaza (o peligro), exposición, fragilidad, vulnerabilidad, resiliencia, y riesgo**. La clara distinción entre ellos simplifica de manera sustantiva la comprensión del concepto de riesgo y de los resultados que se entregan en este capítulo.

Para la explicación de los conceptos escogeremos distintos ejemplos del caso sísmico, pero naturalmente los conceptos presentados son válidos cualquiera sea la naturaleza de la amenaza considerada. De hecho, uno de los puntos centrales de este capítulo es mostrar que el marco conceptual de evaluación del riesgo y la resiliencia es uno solo y puede aplicarse a cualquier amenaza natural. Naturalmente, cada amenaza se caracteriza y afecta de manera distinta a los distintos sistemas construidos y es ahí donde entra el conocimiento específico del ámbito disciplinar correspondiente.

AMENAZA

La amenaza o peligro es usualmente una caracterización probabilística de los distintos niveles de intensidad de una solicitación. Utilizando una noción de frecuencia para la probabilidad, esta amenaza puede representarse como un cociente de tasas anuales medias de eventos que superan un cierto nivel de intensidad por sobre la tasa anual media de todos los eventos significativos que pueden actuar sobre el sistema. Denominando a la variable que caracteriza el nivel de intensidad de la amenaza IM, y a una realización (ocurrencia) de dicho nivel im, la probabilidad de excedencia de un cierto nivel de amenaza se puede expresar como

$$P(IM > im) = \frac{\lambda_{im}}{\lambda_{min}} \qquad (1)$$

donde λ_{im} es la tasa anual media de eventos con intensidad mayor a im y λ_{min} es la tasa anual media de eventos con intensidad mayor a un nivel mínimo relevante en el cálculo del riesgo de la infraestructura correspondiente.

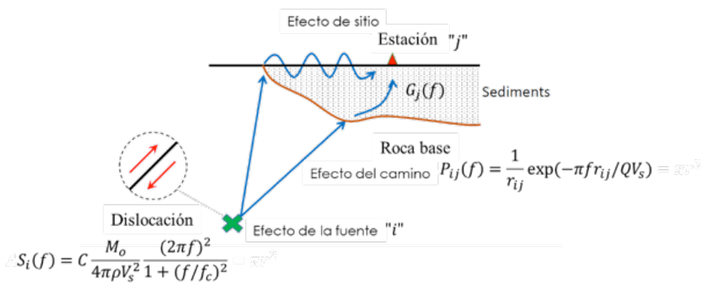
Amenaza Sísmica

La Figura 2 muestra esquemáticamente para conocimiento del lector los distintos fenómenos y conceptos asociados en la definición de la amenaza sísmica usada para la evaluación posterior del riesgo de una infraestructura. Tal como se observa, para el caso sísmico se distinguen tres componentes fundamentales en el cálculo de la amenaza: la fuente sísmica, el camino que siguen las ondas, y los efectos de sitio ocasionados por la constitución y topografía de los estratos superiores de fundación del sistema. Una caracterización correcta de la amenaza sísmica necesariamente requiere de considerar estos efectos y existe una vasta literatura en el tema.

Solo para ilustrar la similitud con otros fenómenos, si pensamos por ejemplo en el caso de inundación por tsunami, es claro que aparecen estos mismos componentes, la fuente, el camino, y los efectos de sitio. La fuente en el caso de un tsunami en Chile está asociada a la deformación acumulada en la placa continental que monta por sobre la placa de subducción (Placa de Nazca) y que durante un terremoto patea bruscamente de vuelta en dirección oeste y vertical principalmente movilizando la columna de agua en el océano Pacífico mientras partes de esta placa continental cercanas a la costa también pueden descender (el campo de desplazamiento es más complejo que esto, pero esta descripción es solo para ilustrar el punto). Luego, este empuje súbito vertical de la masa de agua oceánica produce una onda que viaja por el océano con muy bajo amortiguamiento (efecto de camino), para luego llegar a la costa continental y producir la inundación (efecto de sitio) cuya profundidad y run-up dependen de la topografía de la costa post sismo.

En el caso sísmico, una de las medidas más habituales de intensidad IM del movimiento impuesto en la corteza es la aceleración máxima del suelo durante el movimiento, conocida en inglés como PGA (Peak Ground Acceleration), esto es IM=PGA. Sin embargo, para un importante número de sistemas el PGA

no es la medida de intensidad más relevante y aparecen otras alternativas como puede ser la velocidad máxima del suelo, el desplazamiento o movimiento permanente del suelo, o cualquier otra cantidad que caracterice la demanda sobre una infraestructura. A modo de ejemplo, la Figura 3 muestra el mapa de la amenaza sísmica para Chile central solo considerando fuentes de subducción en roca base. Cada punto de las curvas de nivel dibujadas en el panel de la izquierda de la Figura 3 representa un nivel distinto de PGA correspondiente a un período de retorno de 475 años (nivel de diseño), que es equivalente a un 10% de probabilidad de excedencia en 50 años, aproximadamente.



$$O_{ij}(f) = S_i(f) P_{ij}(f) G_j(f) =$$

$$\log O_{ij} = -\log r_{ij} + \log S_i + \log G_j - (\log e)\, \pi f r_{ij}/QV_s)$$

Figura 2: Caracterización de los distintos componentes que constituyen la amenaza en un problema sísmico: fuente, camino, sitio, y estructura. Esto componentes pueden ser modelados en el dominio de la frecuencia como productos de funciones, o en términos más simples, como filtros en cascada de una señal. En el caso sísmico la fuente es habitualmente una dislocación en la interacción entre placas (Nazca y Sudamericana) que genera ondas de volumen y de corte que se propagan por la roca base (efecto camino), para luego entrar en la zona sedimentaria, por ejemplo, del valle de Santiago (efecto de sitio). Estas ondas al llegar a la superficie se encuentran con una discontinuidad que genera produce ondas de superficie que finalmente alcanzan también a la estructura (sistema). La estructura recibe el movimiento del suelo y es también un filtro que puede amplificar o atenuar dichas ondas.

El período de retorno T_r es un concepto muy utilizado en la caracterización de las distintas amenazas y se define como el inverso de la tasa media anual de excedencia de la medida de intensidad seleccionada IM, esto es

$$T_r = \frac{1}{\lambda_{im}} \quad (2)$$

Por ejemplo, si la probabilidad de excedencia de un nivel de intensidad PGA=A es de 10% en 50 años, es decir,

$$P(PGA > A, t = 50\ años) = 0{,}1 \quad (3)$$

la tasa media anual de excedencia es $\lambda_{im} \approx 0{,}1/50 = 0{,}002$, cuyo recíproco es el período de retorno $T_r = 1/0{,}002 = 500$ años. La interpretación de T_r es que en 500 años, se espera que en promedio dicha intensidad se supere al menos una vez. Implícito en el cálculo de probabilidades de excedencia es que la ocurrencia de estos eventos responde a un proceso estocástico homogéneo de Poisson.

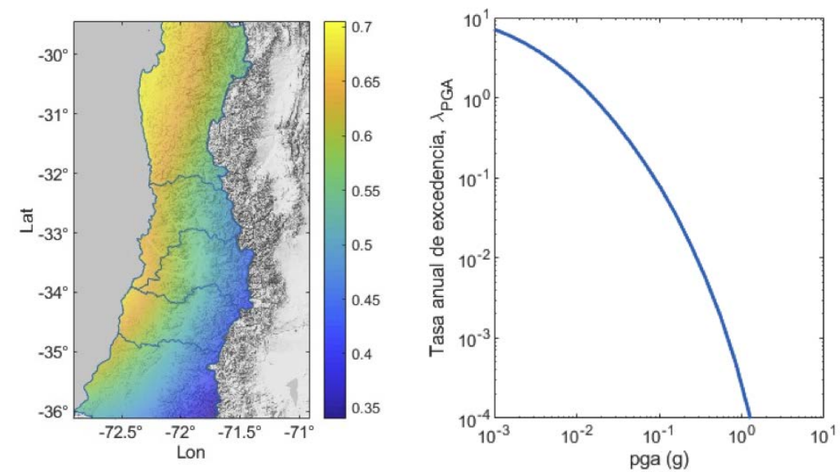


Figura 3: Mapa de amenaza sísmica de PGA para Chile generado por sismos de subducción (izquierda) y curva de amenaza λ_{PGA} (derecha) para un sitio en la comuna de Las Condes (sitio CChC)

Amenaza Hidrometeorológica

Otro tipo de amenaza natural que afecta la infraestructura corresponde a los fenómenos hidrometeorológicos, como anegamientos, crecidas, deslizamiento de laderas y taludes, aluviones, sequías y torrentes. Los conceptos esenciales para caracterizar estas amenazas son la magnitud y frecuencia, así como su ubicación espacial y dimensión temporal. Estos atributos permiten no solo caracterizar cuantitativamente la amenaza, sino que también determinar sus potenciales consecuencias, tanto inmediatas como futuras, sobre el sistema humano (Alcantara y Ayala, 2007). En la Figura 4 se observa la taxonomía de las posibles sub-amenazas que se relacionan con fenómenos hidrometeorológicos, los cuales pueden afectar zonas ribereñas o costeras como se muestra en la figura.

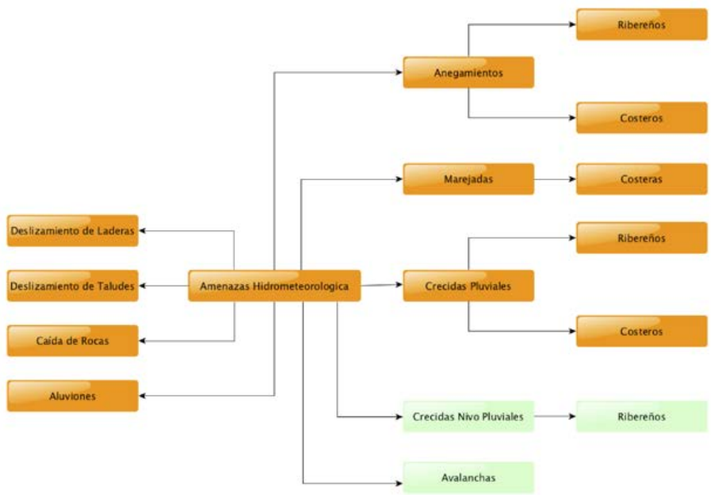


Figura 4: Taxonomía de la amenaza hidrometeorológica recurrente en Chile

Las inundaciones o anegamientos son una de las causas principales de pérdidas por eventos naturales hidrometeorológicos y es por eso que la identificación de lugares potencialmente inundables es información primordial para el tratamiento de los daños a la infraestructura y también para el incremento de su resiliencia.

Para la modelación y futuro cálculo del riesgo, es necesario relacionar periodos de retorno de eventos de crecidas con modelos de velocidad de escurrimiento y alturas de inundación para luego realizar un cruce con la infraestructura mediante ecuaciones de Saint-Venant por ejemplo. En la Figura 5 se observa la modelación de alturas de inundación (panel (a)) y velocidad de escurrimiento (panel (b)) para un sector del río Teno después de la confluencia con el río Claro, VII región de Chile para un periodo de retorno de 50 años obtenidos a partir de modelación hidrológica-hidráulica.

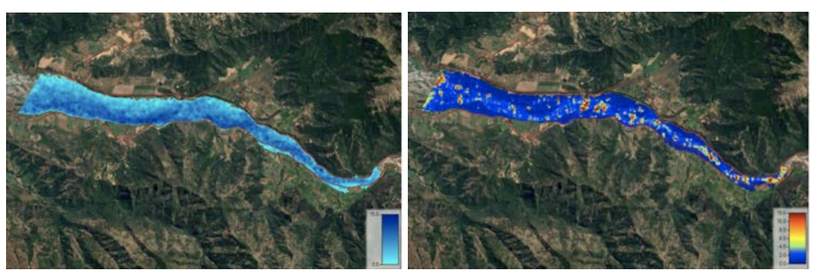


Figura 5: Mapa de crecida río Teno para periodo de retorno 50 años para altura de inundación en metros (a) y velocidad en metros/segundo (b).

Por otro lado, los aluviones son flujos de agua mezclada con sedimentos de distintas características que escurren rápidamente y por gravedad (Chen y Zhang, 2015). Los aluviones a su paso van colectando material, incrementando su volumen y masa. Los detonantes de los aluviones tienen su origen en fenómenos hidrometeorológicos combinados aportes de material provenientes de deslizamientos de laderas, erosión de los cursos de agua, escorrentía superficial, entre otros.

Los deslizamientos de laderas pueden activarse por inestabilidad inducida por sismos, por precipitaciones pluviales y/o de nieve, por usos humanos, o por inestabilidad mecánica o combinaciones de estas condiciones. Por último, las avalanchas de nieve son uno de los fenómenos más comunes en Chile en zonas cordilleranas

Amenaza Volcánica

La amenaza volcánica está compuesta por variados procesos, los que difieren en su recurrencia, su alcance y efectos potenciales. La ocurrencia de un evento volcánico conlleva la salida de magma por el cráter principal o por las fisuras existentes de la corteza en el entorno del volcán. El magma es un material rocoso fundido compuesto por una fase líquida, cristales y gases, y alcanza temperaturas típicamente entre 900 ºC y 1.300 ºC. Este material se forma a una profundidad de unos 100 a 150 km (Moreno, 2015). La salida del magma y el posterior escurrimiento generan distintos productos y procesos volcánicos como caída de piroclastos y ceniza, flujos piroclásticos, corrientes de lava y lahares.

En primer lugar, la caída de piroclastos corresponde a un fragmento sólido de material volcánico, generalmente caracterizado por roca ígnea, emitido y arrojado al aire durante una erupción. La generación de éstos ocurre cuando el magma de alta viscosidad y alto contenido de sílice se fragmenta por explosiones, siendo más explosivo y por lo tanto produciendo más piroclastos.

Por otro lado, los flujos piroclásticos corresponden a avalanchas incandescentes de gases y piroclastos, especialmente de cenizas donde el material avanza a velocidades muy altas (hasta 500 km/hr) y a altas temperaturas (sobre 400 ºC). Se trata del proceso volcánico más violento y destructivo, lo que lo hace imposible de mitigar. En otras palabras, si ocurre un flujo importante, éste destruirá todo lo que se encuentre en su trayectoria. Sin embargo, para producir estas consecuencias de gran envergadura en la población y en la infraestructura, la magnitud del flujo debe ser alta (se establece crítico flujos piroclásticos con un volumen superior a 0,5 km3) (Moreno, 2015).

Las corrientes de lava corresponden a material magmático fundido que expulsa un volcán ascendiendo a través de la corteza terrestre alcanzando la superficie. Al salir a la superficie, la temperatura de la lava oscila entre los 700ºC y los 1.200 ºC. La lava se genera cuando el magma sale a la superficie y escurre por gravedad sin la ocurrencia de explosiones. A pesar de su alta viscosidad puede fluir y recorrer largas distancias antes de solidificarse, momento en el cual se forman rocas ígneas. Si los magmas son más viscosos, es decir, contienen más sílice, la lava emitida será más gruesa, avanzará más lento y recorrerá menos distancia (Moreno, 2015).

Por último, uno de los procesos más críticos para la infraestructura, por ejemplo, carreteras y puentes, corresponde a los lahares, es decir, flujos de material (o sedimento) y agua que se movilizan por las laderas de un volcán. En otras palabras, son mezclas de elementos rocosos movilizados por agua a través de barrancos y cauces fluviales. El origen de los flujos laháricos se relaciona principalmente a la fusión violenta de nieve y/o hielo provocada por el flujo de calor proveniente de lavas o flujos piroclásticos emitidos durante un evento volcánico, o por el arrastre de material volcánico no consolidado producido durante lluvias intensas o ruptura violenta de un lago o laguna (Waitt, 2013). En la Figura 6 se observa la modelación de una erupción tipo Hawaiana-estromboliana, cuya recurrencia se encuentra estimada entre 5 a 10 años, en el Volcán Villarrica.

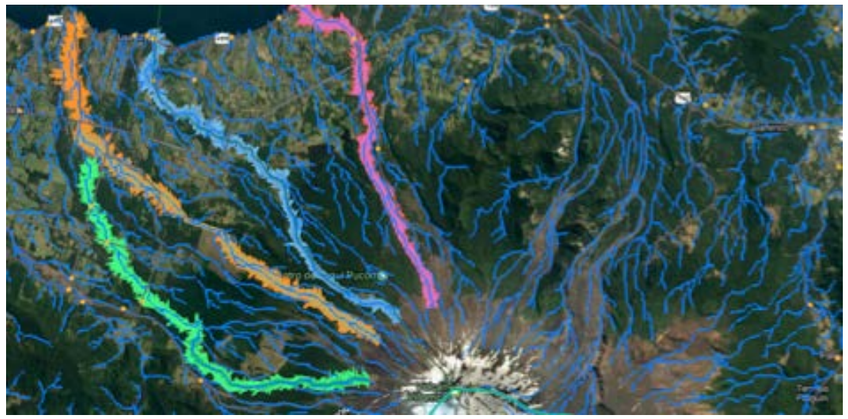


Figura 6: Modelación flujos laháricos para escenario Hawaiano-Estromboliano en Volcán Villarrica (T_r = 5 a 10 años)

EXPOSICIÓN

El segundo concepto relevante es el del modelo de exposición. Un modelo de exposición consiste en la descripción detallada de los activos asociados a cada ubicación geográfica que están expuestos a la amenaza considerada. Construir un modelo de exposición acabado es una tarea muy tediosa y de gran detalle, ya que no basta únicamente saber la tipología estructural del sistema que queda expuesto, sino que su materialidad, año de construcción, normas utilizadas para su diseño, contenidos, funcionalidad, costos, entre otras variables. Esencialmente, un buen modelo de exposición describe en detalle todas las características del activo físico expuesto que puede verse afectado por una falla cuando es sometido a una amenaza extrema. Es sobre este modelo de exposición sobre el que se calcula el riesgo; naturalmente, de no existir un activo expuesto, no tiene sentido hablar de riesgo o resiliencia. A pesar de que existen algunos modelos de exposición en Chile para vivienda, lamentablemente no existe un modelo de exposición único y universalmente aceptado debido a la complejidad para su obtención dada la inconsistencia en los datos disponibles de edificación en las distintas bases de datos de acceso público. Esta es una tarea fundamental para Chile que debe tomarse seriamente en los distintos ámbitos del entorno construido, vivienda, infraestructura crítica y líneas vitales, etc.

Los modelos de exposición de sistemas distribuidos a lo largo y ancho del territorio agregan aún mayor complejidad ya que deben definir no solo las características del activo en la ubicación geográfica determinada, sino que para un vector de ubicaciones geográficas (la red) sobre las cuales se emplaza geográficamente el sistema. Sin embargo, el concepto de exposición es el mismo, ya que corresponde definir en cada celda geográfica el tipo de componente considerado de la red, sus características físicas como materialidad o geometría, el año de construcción, las normas utilizadas, la funcionalidad del componente, y su costo, entre otras características.

La Figura 7 muestra a modo de ejemplo el modelo de exposición de la ciudad de Iquique utilizado en un estudio reciente de la ciudad (Aguirre et al. 2018). En el mapa de la izquierda se muestra la distribución total de edificaciones por manzana, junto con la ubicación de instalaciones de salud y educacionales. Además, en el panel de la derecha se muestran las distribuciones de materialidad y nivel de diseño sísmico para edificaciones residenciales y comerciales. Este modelo fue construido a partir de la conjunción de las bases de datos disponibles del Servicio de Impuestos Internos, datos censales, bases de datos de los ministerios de Vivienda y Urbanismo, Salud, y Educación.

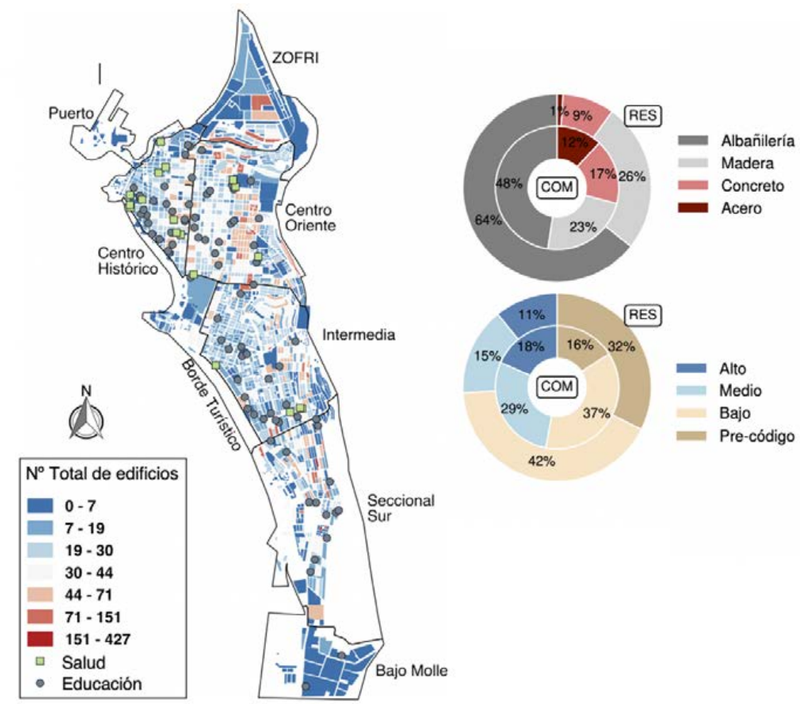


Figura 7: Modelo de exposición de la ciudad de Iquique (Aguirre et al. 2018). En panel de la izquierda se muestra la distribución total de edificaciones por manzana, junto con la ubicación de instalaciones de salud y educacionales. En panel de la derecha se muestran las distribuciones de materialidad (superior) y nivel de diseño sísmico (inferior) para edificaciones residenciales (RES) y comerciales (COM).

FRAGILIDAD Y VULNERABILIDAD

Para cada uno de los activos físicos definidos en un modelo de exposición es necesario caracterizar el nivel de daño asociado a una cierta intensidad de la amenaza, o bien la pérdida asociada a ese nivel de amenaza. Ambos conceptos están íntimamente relacionados, pero implican información muy distinta.

El primero de ellos se caracteriza por la probabilidad condicional de que un componente exceda un cierto estado de daño, $DS_i > ds_i$, dado un cierto nivel de intensidad de la amenaza, IM=im. En términos matemáticos se define como la $P(DS_i > ds_i \mid IM=im)$. Esta curva se conoce como la función de fragilidad de

un sistema, y constituye una pieza fundamental en el cálculo de riesgo. En la literatura existen curvas de fragilidad para distintos sistemas estructurales y no estructurales. Naturalmente, dado el número discreto de estados de daño, la probabilidad de encontrarse en un nivel de daño determinado, es

$$P(DS_i > ds_i|IM = im) - P(DS_{i+1} > ds_{i+1}|IM = im) = P(DS_i = ds_i|IM = im) \quad (4)$$

La Figura 8 muestra de forma esquemática curvas de fragilidad para 4 estados de daño (leve, moderado, extenso y completo) desarrolladas para HAZUS (FEMA 1999) para edificios de muros de hormigón armado de baja altura (1 -3 pisos, C2L), media (4 -7 pisos, C2M) y gran altura (8 o más pisos, C2H), comparables a los típicos edificios chilenos.

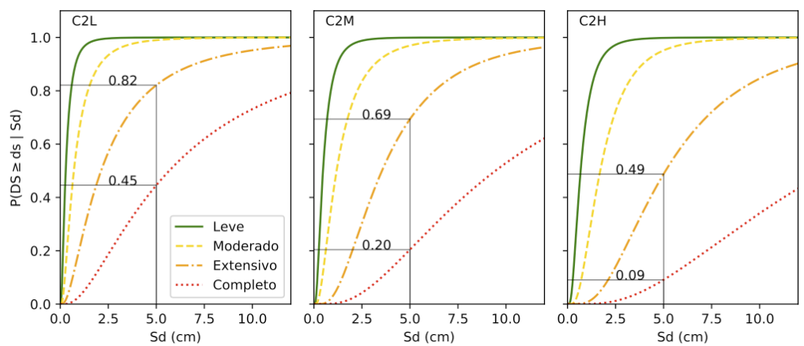


Figura 8: Funciones de fragilidad para un edificio de HA según Hazus (FEMA 1999), para estados de daño leve, moderado, extensivo y completo. Los tres paneles muestran las curvas de fragilidad para edificios bajos (C2L), medianos (C2M) o de gran altura (C2H).

Por ejemplo, para un edificio de hormigón armado de altura media (C2M), si el (seudo) desplazamiento es Sd=5,0 cm, las curvas de fragilidad de la Figura [5] implicarían que la probabilidad de daño extensivo es de:

$$P(DS > extensivo|IM = 5{,}0\ cm) - P(DS > completo|IM = 5{,}0\ cm) = 0{,}69 - 0{,}20 = 0{,}49 \quad (5)$$

Similarmente, para edificios bajos y edificios de gran altura, las probabilidades de quedar en un estado de daño extensivo serían de 0,37 y 0,40, respectivamente.

La fragilidad de los distintos sistemas puede llevarse directamente a pérdidas (económicas o de otro tipo) a través del **concepto de vulnerabilidad**. Las curvas de vulnerabilidad reflejan la probabilidad condicional de que un sistema o componente exceda un cierto nivel de pérdida dado un cierto nivel de intensidad de la amenaza. Estas pérdidas pueden ser económicas y representar costo directo, esto es el costo de reparar y reestablecer la funcionalidad del sistema, o bien costo indirecto o consecuencial, es decir las pérdidas económicas que resultan del cese, deterioro, o caída del servicio prestado como resultado del daño ocurrido. Un ejemplo de curvas de vulnerabilidad para sistemas de agua potable se presenta en la Figura 9, donde se presentan distintos modelos para estimar la tasa de reparaciones de tuberías de agua subterráneas como función de la velocidad máxima del suelo (PGV).

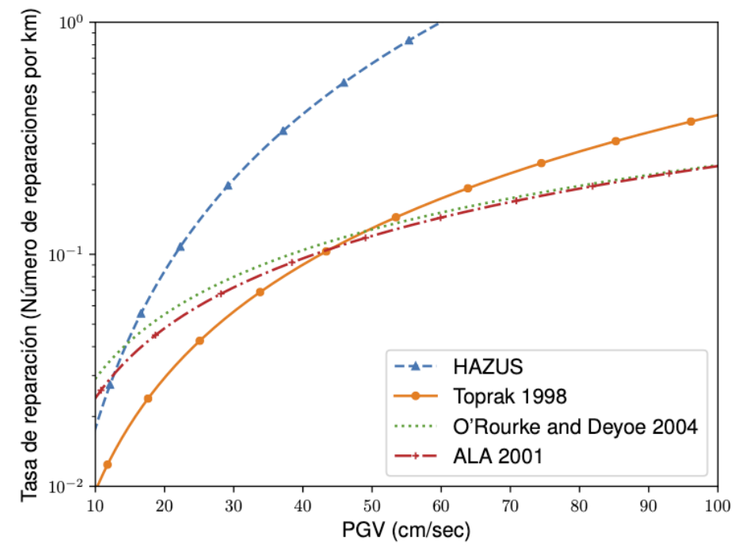


Figura 9: Curvas de vulnerabilidad para sistemas de agua potable. Las curvas presentan distintos modelos de correlación entre la tasa de reparaciones de tuberías de agua subterráneas y la velocidad máxima del suelo (Toprak 1998, FEMA 1999, ALA 2001, O'Rourke and Deyoe 2004, Toprak & Taskin 2007).

RIESGO

Definido el modelo de la amenaza, el modelo de exposición, y las fragilidades y vulnerabilidades de cada uno de los sistemas expuestos, es posible cuantificar el riesgo para el portafolio completo de estructuras o redes consideradas simplemente mediante el esquema de evaluación (suma) que se describe a continuación.

La forma más sencilla de interpretar el problema de riesgo es entenderlo como un problema de equilibrio entre oferta (C por capacidad) y demanda (D). La falla de un sistema está dada por la probabilidad de que la solicitación (D) exceda la capacidad (C), lo que escrito en términos de tasas medias anuales de excedencia (F por falla), usando el concepto de probabilidad total, se puede escribir como:

$$\lambda_F = \nu P(D > C) = \nu \int P(D > C|D = y) f_D(y)\, dy \quad (6)$$

La integral descrita solo refleja una suma de todos los casos posibles una vez condicionado el evento D>C a un nivel de demanda o solicitación D=y. Como veremos en la sección siguiente, esta integral se cuantificará numéricamente a través de técnicas de simulación numérica de Montecarlo. Geométricamente este cálculo puede interpretarse como el área bajo la curva achurada que se muestra en la Figura 10, donde los factores α y ø reflejan los factores de mayoración de cargas y reducción de capacidad propios de un diseño por capacidad (LRFD) incorporados en la mayoría de los códigos de diseño actuales. Es interesante interpretar el cálculo de la ecuación anterior de manera sencilla, por ejemplo, para una estructura existente.

En ese caso podríamos muestrear aleatoriamente la demanda y simplemente contar los casos en que esa demanda excede a la capacidad también muestreada para el sistema, y luego agrupar los cálculos para cada nivel de demanda constante D=y, y finalmente componer la suma que indica la ecuación para calcular la probabilidad de falla mediante la tasa media anual de falla.

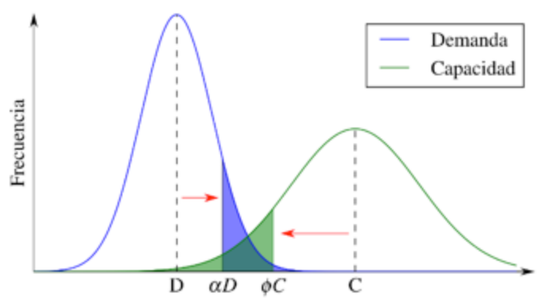


Figura 10: Diagrama esquemático que muestra geométricamente el cálculo de la probabilidad de falla de un sistema en que la demanda mayorada αD se compara con la capacidad (resistencia) minorada øC.

RESILIENCIA

El concepto más relevante para efectos de este capítulo es el de **resiliencia**. En términos cualitativos definimos resiliencia como "la capacidad de un sistema, persona, comunidad o país, expuestos a una amenaza de origen natural para anticiparse, resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de sus efectos de manera oportuna y eficaz, para lograr la preservación, restauración y mejoramiento de sus estructuras, funciones básicas e identidad" (CREDEN 2016).

La resiliencia deber ser entendida como un proceso que conlleva diversas etapas. La Figura 11 muestra de manera gráfica lo que se entiende por resiliencia de un sistema, e involucra a grandes rasgos una etapa de absorción del shock externo producido por la amenaza (progreso del evento) y que irrumpe en el normal funcionamiento de un sistema produciendo una caída en su nivel de servicio (R), una etapa de restauración de ciertas condiciones mínimas del sistema que le permitan operar en condiciones estables, y una etapa de recuperación hacia una condición de operación del sistema idealmente mejor a la que existía previa al shock.

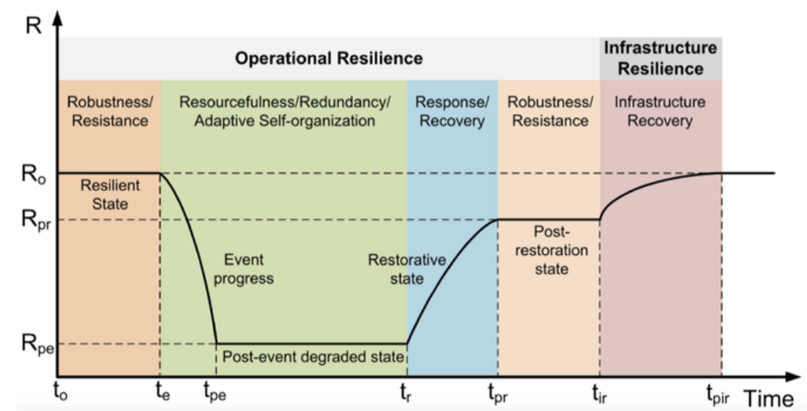


Figura 11: Fases típicas del problema de resiliencia de un sistema eléctrico (Espinoza et al., 2017).

Como la resiliencia es un proceso, existen diversas métricas posibles para cuantificarla en relación al sistema. De hecho, existe una extensa literatura en la cuantificación de la resiliencia de un sistema, pero las métricas más clásicas dicen relación con la pérdida de servicio en relación a la condición previa al evento (área achurada en la Figura 11) y la velocidad (o tasa) de recuperación que exhibe el sistema. Cualquiera sea la métrica utilizada es relevante evaluarla en función de la demanda por el servicio, ya que dicha demanda también puede verse afectada por el impacto generado por la amenaza. Un ejemplo clásico de métrica de resiliencia puede ser, para una cierta ventana de tiempo, la energía total no suministrada por una red de transmisión o distribución eléctrica, o el volumen total de agua potable no entregada, o la suma de los tiempos de espera de pacientes en una sala de emergencia en un hospital.

Es interesante notar que dada una realización de la amenaza, es decir conocidas las intensidades de la amenaza en los distintos puntos de la zona afectada, para cualquier operador de un sistema es posible determinar la curva presentada en la Figura 11 y, por ende, cualquier métrica de resiliencia de un sistema puede evaluarse bajo el marco de riesgo que se presenta a continuación. Si se escogiera, por ejemplo, como métrica de la resiliencia, la energía eléctrica que deja de ser suministrada a los consumidores luego de un gran evento sísmico, dicha cantidad puede ser considerada como la variable de salida (OV) para la cual se calcula el riesgo mediante la expresión

$$\lambda_{OV} = \nu P(OV > ov) = \nu \int P(OV > ov | IM = im) f_{IM}(im)\, dim \qquad (7)$$

Esta expresión es idéntica a la que se vio anteriormente e indica que la tasa media anual de excedencia (del evento probabilístico) que la energía no suministrada OV supere el valor ov, es decir OV>ov, se calcula como la suma (integral) de la probabilidad condicionada del evento a las distintas intensidades IM=im multiplicada por la probabilidad de ocurrencia de dicha intensidad. En este caso, traducir esta pérdida acumulada de energía no suministrada en valor económico es sencillo

La comprensión de los conceptos de amenaza, modelo de exposición, fragilidad, vulnerabilidad, riesgo y resiliencia constituyen la piedra angular de este capítulo y serán usados de forma reiterada en las secciones siguientes.

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

Este capítulo presenta los conceptos fundamentales del riesgo y resiliencia de las infraestructuras sometidas a amenazas naturales extremas. El capítulo es auto-contenido y entrega en su introducción los conceptos esenciales que deben ser conocidos por el lector para entender cómo se cuantifica el riesgo y la resiliencia de un activo físico frente a una amenaza natural extrema. El capítulo sigue en cierta forma la estructura de una evaluación de riesgo y utiliza ejemplos para facilitar su comprensión.

Luego de introducir los conceptos básicos, la Sección 2 presenta la cuantificación del riesgo y la resiliencia en un marco de incertidumbre para distintas escalas que abarcan desde la estructura como sistema individual hasta la integración de sistemas en una ciudad o región. La Sección 3 describe someramente la realidad del cambio climático en Chile y sus consecuencias en la infraestructura para la provisión de agua y la protección de las distintas infraestructuras frente a amenazas derivadas de este fenómeno. El escrito continúa en la Sección 4 con una descripción de los sistemas críticos considerados a nivel habitacional y de redes de infraestructura, incluyendo aquellos que mayor impacto pueden generar sobre la población. Para entregar un contexto y aplicación se describe brevemente en la Sección 5, el caso del terremoto del 27F, el que entregó una serie de lecciones muy relevantes en términos del riesgo y la resiliencia de nuestra infraestructura urbana y sus líneas vitales. La Sección 6 sube una escala y presenta el concepto asociado a ciudades resilientes, donde se discute brevemente cómo también el espacio urbano puede alcanzar mayores niveles de resiliencia frente a amenazas naturales. Conocidos los impactos, la Sección 7 presenta algunos de los criterios utilizados en la mitigación de estas amenazas naturales y la reducción del riesgo de desastres. Finalmente, la Sección 8 describe las principales conclusiones de este capítulo y sintetiza las acciones que pueden permitir avanzar en mejorar la resiliencia de la infraestructura y reducir el riesgo de desastres frente a amenazas naturales extremas.

SECCIÓN 2: CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO Y LA RESILIENCIA

MARCO CONCEPTUAL PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO

Una infraestructura requiere de la operación correcta de distintos componentes para su funcionamiento. Las amenazas extremas, tales como terremotos, eventos climáticos tales como huracanes, tormentas de viento y nieve, incendios y tormentas eléctricas, pueden afectar a distintos componentes de forma simultánea, o en cascada, reduciendo la capacidad del sistema de proveer un correcto servicio a los usuarios.

Para estimar las consecuencias negativas de estas amenazas sobre una infraestructura debemos ser capaces de estimar los daños y consecuencias que generan estos eventos futuros sobre el sistema. Sin embargo, el estado actual de nuestro conocimiento sobre estos fenómenos no permite tener certeza sobre todas las variables que definen estos futuros eventos y sus intensidades. Hay incertidumbre sobre su ocurrencia, lugar, magnitud, e interdependencia con otras amenazas. Adicionalmente, y aun cuando se conocieran algunas de estas características, la forma en que los sistemas responden a estos eventos es también incierta. Por lo tanto, para considerar todas estas fuentes de incertidumbre se debe utilizar una metodología que cuantifique correctamente el riesgo, es decir, que considere tanto la probabilidad de ocurrencia de las distintas amenazas, su intensidad, y el efecto que tienen sobre el sistema.

La metodología que se presenta a continuación es completamente general y puede ser aplicada para todo tipo de amenazas extremas actuando sobre una infraestructura, una red de servicios, una ciudad, región o país. La metodología puede aplicarse a cualquier sistema localizado o distribuido espacialmente cuando éste es sometido a una amenaza. Esto incluye viviendas, industrias, hospitales, redes de transporte, telecomunicaciones, agua potable y saneamiento, transmisión eléctrica, solo por mencionar algunas.

Resumen metodológico

La cuantificación del riesgo parte por definir el tipo de evento extremo a estudiar y una variable de decisión o salida (OV) que se quiere cuantificar tal que sintetice la respuesta del sistema considerado a este tipo de evento. Esta variable puede representar la confiabilidad del sistema, o bien alguna métrica de su resiliencia. Las variables de confiabilidad se preocupan solo de la reducción inicial del nivel del servicio del sistema como resultado del "shock" externo inicial producido por la amenaza, como puede ser la cantidad de clientes que quedan sin suministro, o la potencia inicial no suministrada por un sistema de transmisión eléctrica. En cambio, las variables de resiliencia consideran adicionalmente el proceso completo de respuesta y recuperación del sistema; algunos ejemplos son el tiempo de restauración completa del servicio o la demanda total no suministrada.

El análisis de riesgo requiere conocer y poder describir los componentes del sistema afectados por el tipo de amenaza a estudiar y su forma de afectación. Esto implica definir los posibles estados de daño de estos componentes para distintos niveles de intensidad de la amenaza y asociarles una reducción en su nivel de desempeño consecuente con este estado de daño. Además, si se quiere estimar la resiliencia del sistema, se deben asociar tiempos de recuperación para cada uno de los estados de daño. Es necesario entonces poder predecir el nivel de daño de un componente dada una medida de intensidad del evento en la ubicación de los componentes vulnerables evaluados. Por ejemplo, para una tormenta de viento, la medida usual de intensidad es la velocidad del viento; para temperaturas extremas, la temperatura media diaria o máxima

a la que se ve sometido el componente en un instante; y para un evento climático puede ser la altura de inundación en cada punto.

En base a estas definiciones básicas, se puede proceder a evaluar el riesgo del sistema utilizando la metodología presentada esquemáticamente en la Figura 12. El primer paso consiste en evaluar la amenaza que se quiere estudiar a partir de un generador estocástico de eventos compatibles con la caracterización estadística de la amenaza. Para cada realización de la amenaza—que se denomina escenario—se deben muestrear los estados de daño de los distintos componentes y se deben cuantificar las consecuencias sobre el funcionamiento de cada componente. Con las consecuencias evaluadas en cada componente, se procede a simular en el tiempo la operación del sistema, ya sea justo después del evento (confiabilidad), o hasta la recuperación total del suministro (resiliencia). Finalmente, se repite este proceso para cada escenario y se utilizan todas las realizaciones posibles (escenarios seleccionados de forma inteligente) para estimar el riesgo global del sistema. Cada paso de este diagrama es explicado con mayor detalle a continuación.

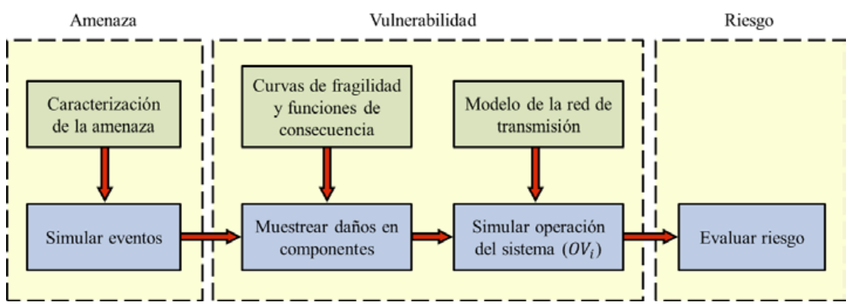


Figura 12: Resumen esquemático de la metodología del cálculo de riesgo para el ejemplo de sistemas de transmisión eléctrica.

Generación de eventos

Los escenarios generados deben ser probabilísticamente consistentes con la amenaza real de la región en estudio. Para cada uno de los escenarios simulados se debe estimar la intensidad de la amenaza sobre cada componente del sistema. Por ejemplo, la Figura 13 muestra la realización de aproximadamente 25.000 posiciones de posibles focos sísmicos distribuidos a lo largo del territorio nacional. Cada punto en la figura corresponde a una posible ubicación de terremotos cuya magnitud es también variable. Mediante técnicas de muestreo reducido, se puede simular mediante ecuaciones de predicción del movimiento la variabilidad del PGA en la ubicación del edificio de la CChC, tal como se indica en el histograma de la Figura 13.

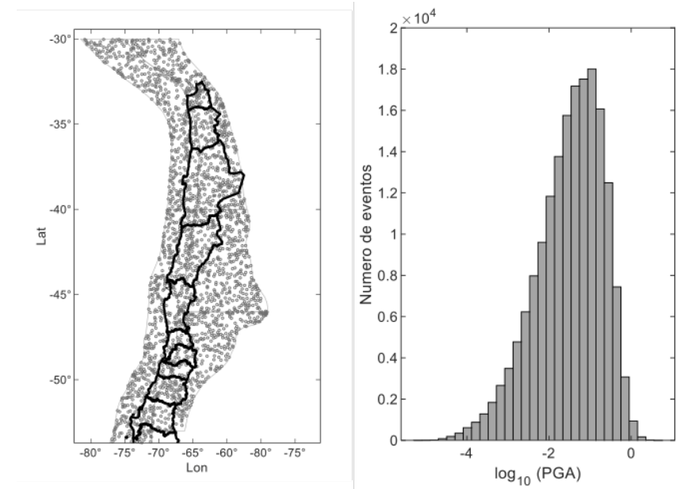


Figura 13: (a) Ejemplo de ubicación de escenarios sísmicos para análisis de riesgo, en donde cada círculo representa la ubicación de un evento posible (realización); y (b) histograma de PGAs para el sitio de la Cámara Chilena de la Construcción en Santiago de Chile.

Distintos simuladores para diversos tipos de eventos han sido propuestos en la literatura. Generar el conjunto de escenarios de amenaza requiere que dichos escenarios respeten la física y recurrencia del fenómeno subyacente. Esto es trabajo de la comunidad científica y el conocimiento generado forma la base de cualquier normativa utilizada para el diseño de estructuras y sistemas. Generalmente, la información de la amenaza queda oculta detrás de un formato comúnmente más amigable al ingeniero para ser utilizado en el diseño. En el caso estructural, por ejemplo, ese formato es el denominado espectro de diseño de la norma sísmica NCh433, o de la norma de estructuras con aislamiento sísmico, NCh2745. El espectro de diseño de la NCh433 para suelo firme en la ciudad de Santiago se muestra en la Figura 14. En términos simples, en el eje de las abscisas aparece el período fundamental de la estructura y en cada ordenada del gráfico un valor que es proporcional a la fuerza de corte basal con que debiera ser diseñada dicha estructura. La Figura 14 presenta adicionalmente un espectro de diseño conocido como de 'espectro de amenaza uniforme' asociado a un período de retorno de 500 años, el que fue calculado para la ciudad de Santiago en un suelo firme y que se ha superpuesto al espectro de diseño utilizado por la norma sísmica NCh433. La diferencia entre ambos muestra que el espectro de la NCh433 es consistente aproximadamente con el de amenaza uniforme para una probabilidad de excedencia de 10% en 50 años ($T_r \approx 500$ años).

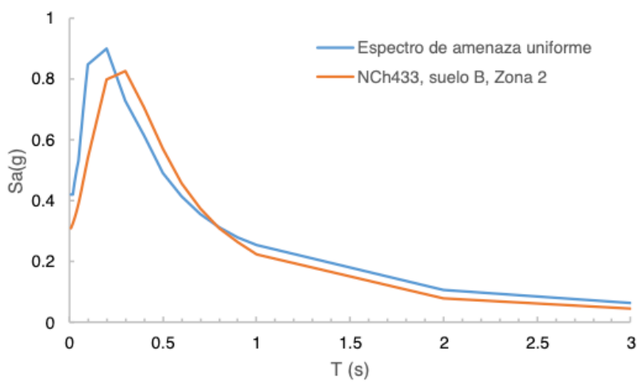


Figura 14: Comparación entre un espectro de amenaza uniforme para la ciudad de Santiago (T_r≈500 años) y el espectro de diseño de la norma sísmica NCh433.

Un aspecto relevante al definir las intensidades de la amenaza es respetar también la correlación espacial entre dos ubicaciones geográficas dentro de un mismo evento. Es evidente que dos puntos cercanos geográficamente debieran tener intensidades IM similares. Para el caso de eventos de corta duración, como terremotos, normalmente se considera solo la correlación espacial de la medida de intensidad (Jayaram & Baker, 2009), mientras que para eventos de mayor duración se consideran correlaciones espacio-temporales, como es el caso de tormentas de viento (Fu et al., 2018) y otros fenómenos climáticos

Efecto sobre componentes del sistema

Una vez simuladas las intensidades para un evento dado en las ubicaciones de los componentes, es necesario muestrear sus estados de daño. La relación entre intensidad local y daño se caracteriza por las denominadas funciones de fragilidad, que definen matemáticamente la probabilidad de que un componente se encuentre en un cierto estado de daño dado un cierto nivel de intensidad de la amenaza. Estas funciones son específicas para cada tipo de componente y medida de intensidad, y pueden ser construidas con datos empíricos (Shinozuka et al., 2000), simulaciones computacionales (Sadeghi, et al., 2012), u opinión de expertos (Ioannou et al., 2017). También pueden determinarse por combinaciones de todos los métodos anteriores.

La Figura 15 presenta esquemáticamente un ejemplo de funciones de fragilidad para una subestación eléctrica de voltaje medio (230 kV) que tiene sus componentes anclados al suelo. Estas curvas provienen de la base de datos que contiene el software Hazus (FEMA, 2015). Para este ejemplo existen cuatro estados de daño, denominados menor, moderado, mayor y completo, cada uno de ellos asociado a un tiempo de restauración distinto del componente (función de consecuencia). Muchas veces por simplicidad, o bien por las características propias de operación de un sistema, es usual ver un único estado de daño para un componente, esto es operativo e inoperativo (e.g., Fu et al. 2018).

Para entender el uso de estas curvas consideremos los estados de daño de una subestación eléctrica para una medida de intensidad IM=0,4g. Las probabilidades de que la subestación se encuentre en cada uno de los estados de daño son (ver Figura 15):

P(Daño=completo | IM=0,4g)=0,08;

P(Daño=severo | IM=0,4g)=0,65-0,08=0,57;

P(Daño=moderado | IM=0,4g)=0,81-0,65=0,16;

P(Daño=menor | IM=0,4g)=0,95-0,81=0,14;

P(Daño=0 | IM=0,4g)=1-0,95=0,05;

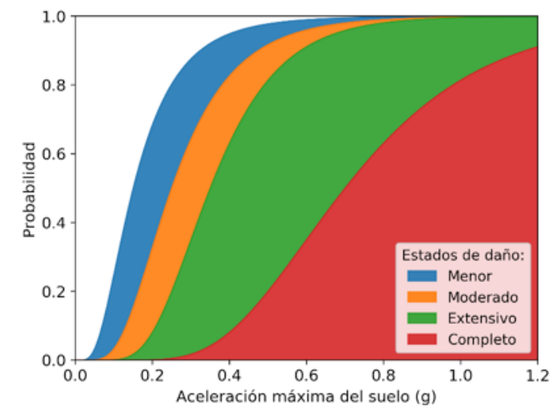


Figura 15: Curvas de fragilidad de una subestación eléctrica ante eventos sísmicos y probabilidades de encontrarse en los distintos estados de daño para una intensidad IM=0,4g.

Repuesta del sistema

Cada uno de los escenarios seleccionados genera una situación particular de daño en los componentes del sistema considerado. Para esa situación de daño es necesario simular la operación del sistema y evaluar su condición mediante alguna variable relevante que definimos como . Si se tratara de una red de agua potable, por ejemplo, el objetivo sería tratar de satisfacer el máximo de la demanda requerida de agua, sujeto a las restricciones físicas y operativas del sistema. Esto se realiza generalmente utilizando modelos físicos de flujo que contemplan la condición de los componentes producto del nivel considerado para la amenaza. La condición de cada componente del sistema para el nivel de amenaza considerado resulta de muestrear aleatoriamente su estado respetando la distribución de probabilidad implícita en las funciones de fragilidad antes descrita.

Si se desea estimar una variable que represente resiliencia en el sistema, la operación debe ser simulada hasta que se logra la recuperación completa del servicio. A medida que pasa el tiempo desde la ocurrencia del evento, la infraestructura dañada se recupera dependiendo de sus propias condiciones y del estado de las de otras redes de servicio necesarias para su funcionamiento. También es importante considerar el cambio de demanda que ocurre en el sistema debido al daño ocurrido en otros agentes que demandan

el servicio. Por ejemplo, la Figura 16 muestra una comparación entre las funciones de recuperación del servicio de agua potable para Chile y otros países luego de los terremotos severos que sufrieran entre 2010 y 2011.

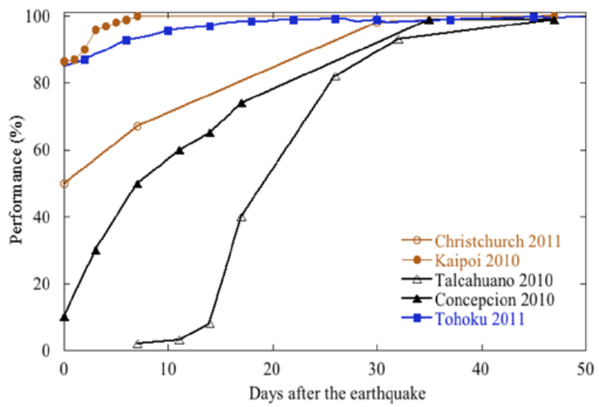


Figura 16: Ejemplo de curvas de recuperación de las redes de agua potable luego de los terremotos en Chile, Nueva Zelanda y Japón (Alberto Y. et al, 2020).

El objetivo es mantener o recuperar el equilibrio del sistema en el menor tiempo posible dadas las restricciones físicas, operativas y económicas existentes. Este proceso se repite para cada una de los escenarios de amenaza considerados y de esta manera se construye, utilizando una aproximación de frecuencia, las estadísticas requeridas para las variables de interés OV. Uno de los puntos más complejos en este proceso tiene que ver con el número de simulaciones requeridas para acotar correctamente la incertidumbre, lo que en general implica (decenas de) miles de simulaciones, cada una de ellas costosa computacionalmente. Consecuentemente, se aplican una serie de técnicas de reducción de varianza que buscan mejorar los procesos de muestreo de forma de estimar con el menor número de simulaciones posibles, las estadísticas requeridas con un buen nivel de confianza.

Evaluación del riesgo

Es común ver que los resultados de una evaluación de riesgo de un sistema se expresen utilizando la tasa media anual de eventos que superan un cierto valor de la variable de interés de salida, λ_{OV} (ov), la que puede ser derivada de un cociente de frecuencias, esto es:

$$\lambda_{OV}(ov) = \nu P(OV > ov) \quad (8)$$

donde ν es la tasa de eventos sobre algún umbral inferior, definido usualmente como la tasa de eventos que pueden generar algún impacto sobre el sistema; y P(OV>ov) es la probabilidad de que la variable de interés para un escenario se encuentre sobre este umbral, es decir, adopte un valor mayor a ov. Esta probabilidad se puede interpretar como aquella que determina, de todos los eventos posibles, aquellos que superan el umbral. Dada la alta complejidad de calcular esta probabilidad de forma analítica, y aunque existen métodos aproximados para hacerlo, es usual estimarla utilizando simulación de Monte Carlo.

Consecuentemente, para realizar esta evaluación se deben generar una gran cantidad de eventos posibles y a partir de sus respuestas estimar la variable de interés para cada uno de ellos. Finalmente, la tasa media anual λ_{OV} (ov) en la Ecuación (8) puede ser estimada aproximadamente a través de contar los casos (simulaciones) en que la respuesta supera el nivel ov dividido por la cantidad total de simulaciones realizadas:

$$\lambda_{OV}(ov) \approx \nu \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \mathbf{1}(OV_i > ov) \quad (9)$$

donde N es el número de simulaciones realizadas; OV_i es la variable de salida (variable de interés) que resulta de la simulación número i; y $1(OV_i>ov)$ es la función indicatriz, es decir, adopta el valor 1 si $OV_i>ov$ y 0 en caso contrario.

Muchas veces el resultado de la evaluación de riesgo se expresa por el período de retorno de los eventos que superan cierto valor de la variable de salida. Tal como se describiera en la Sección 1, la correspondencia entre la tasa media considerada y el período de retorno se define por T_{OV} (ov)=1/λ_{OV} (ov).

A modo de ejemplo, la Figura 17 muestra resultados de la evaluación del riesgo sísmico del antiguo Sistema Interconectado del Norte Grande (SING) utilizando el período de retorno descrito. La variable de salida utilizada en este caso es la cantidad de energía no suministrada por el sistema como porcentaje de la demanda semanal. Como toda aplicación de Monte Carlo, el resultado presentado en la Figura 17 tiene un error asociado que decrece con la cantidad de simulaciones consideradas. Este error es representado en la Figura utilizando un intervalo de confianza del 99% (Normal MCS).

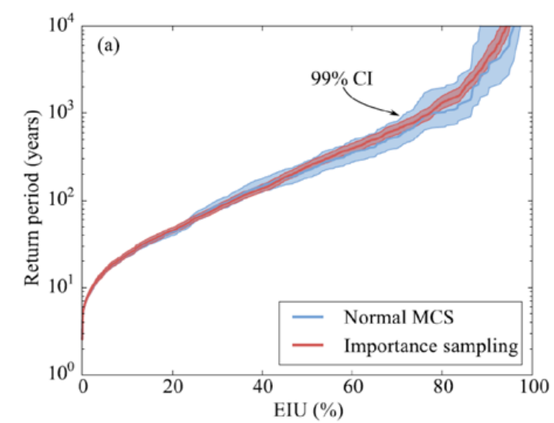


Figura 17: Períodos de retorno de eventos que generan un nivel determinado de energía no suministrada como porcentaje de la demanda semanal de energía (Poulos et al. (2017)).

La cantidad de simulaciones necesarias para una evaluación depende principalmente de la precisión que se requiera de los resultados. Sin embargo, el costo computacional de la evaluación puede ser muy significativo para sistemas complejos reales debido a la gran cantidad de variables aleatorias que deben ser muestreadas para cada simulación de la red, por ejemplo, los estados de daño de cada componente. Por lo tanto, existen varias técnicas estadísticas y de optimización que pueden ser utilizadas para reducir los tiempos de cómputo para una precisión dada de esta curva de período de retorno (Han & Davidson et

al., 2012). Por ejemplo, para el caso de terremotos se han propuesto técnicas de muestreo que favorecen a eventos que son más significativos para el cálculo del riesgo (e.g., Kiremidjian et al., 2007; Poulos et al., 2017) y otras que reducen la cantidad de eventos simulados agrupando a todos aquellos que son similares (e.g., Jayaram y Baker, 2010). En el ejemplo de la Figura 17 se presenta la efectividad de una de estas técnicas denominada *importance sampling*, comparada con la evaluación de Monte Carlo convencional (Normal MCS). Como se aprecia la reducción del error en los resultados es bastante significativa (curva y franja de color rojo) para una misma cantidad de escenarios (26 mil).

Este marco conceptual de evaluación de riesgo es aplicable a cualquier sistema y tipo de amenaza. Naturalmente, la respuesta de cada sistema y la caracterización de sus curvas de fragilidad varía de acuerdo con el tipo de amenaza. Utilizando este esquema es también posible considerar la correlación entre las distintas amenazas, aun cuando eso aumente la complejidad en la generación de los escenarios y el número de simulaciones requeridas para el cálculo del riesgo.

MARCO CONCEPTUAL PARA LA EVALUACIÓN DE LA RESILIENCIA

Diversas métricas para caracterizar la resiliencia de una infraestructura o sistema de infraestructuras han sido propuestas en la literatura (Bruneau & Reinhorn 2007¸ Francis & Bekera 2014, Ouyang et al. 2012). El tópico es actualmente materia de amplio interés en distintas comunidades científicas y tecnológicas del mundo. La principal razón es que, dado el enorme avance en la capacidad de cómputo, es posible hoy analizar la resiliencia de sistemas muy complejos, lo que en décadas anteriores habría sido impensado.

Tal como se describió anteriormente, la resiliencia de una infraestructura es un proceso temporal que se caracteriza por diversas etapas que pueden resumirse en la absorción por el sistema del efecto de la amenaza y la recuperación de sus capacidades como resultado del deterioro causado por la amenaza. Esta recuperación en muchos casos no depende exclusivamente de la propia infraestructura, sino que de otras infraestructuras. Este es el caso, por ejemplo, de cualquier componente de una red que requiera para su recuperación del acceso de cuadrillas de ayuda a través de la operación de rutas de una red de transporte. Esta última permite trasladar los recursos necesarios hacia los lugares con daño para reestablecer el servicio de la infraestructura en tiempos usualmente muy acotados. En consecuencia, la recuperación de un servicio es usualmente interdependiente de la condición de otros servicios. Esta interdependencia es también objeto de trabajo y estudio (Monsalve et al, 2019).

Las métricas clásicas de estimación de la resiliencia de una infraestructura cuantifican la merma que se produce en el servicio prestado por la infraestructura en relación a una situación base de operación sin la acción de una amenaza. Por ejemplo, si un cierto arco de una red vial está saturado de vehículos en hora punta en condiciones normales, es contra esta situación de operación que se evalúa la merma en esa misma hora punta cuando el sistema es impactado por la amenaza. En el caso de una infraestructura aislada (no en red), el cálculo de esta merma es bastante más simple que para una red, como puede ser la red pública hospitalaria.

Asumamos que la capacidad de una infraestructura es C(t) y la demanda sobre esa infraestructura es D(t). En una situación de equilibrio del sistema C(t)=D(t) para todo tiempo t. Una vez ocurrida la amenaza, la merma o déficit del sistema puede calcularse como μ(t)=D(t)-C(t). Cabe destacar que luego de un evento, la capacidad de la infraestructura C(t) puede verse deteriorada producto de daños físicos y operacionales, y por otro lado, la demanda de la infraestructura también puede variar luego de un evento natural D(t) de tal forma que disminuya, se mantenga o aumente, es por esa razón que resulta interesante evaluar el déficit o merma del sistema comparando la demanda con la capacidad. Una medida clásica de resiliencia es la integral de este déficit en una ventana de tiempo entre un instante inicial y otro final—el instante final puede definirse como aquel en que se ha recuperado íntegramente la capacidad del sistema. Esta métrica de resiliencia puede expresarse como:

$$R = \frac{1}{(t_f - t_i)} \int_{t_i}^{t_f} \mu(t)dt \qquad (10)$$

en que el valor de R es tal que, 0≤R≤1. Un valor de R=1 implica una pérdida total del servicio en la ventana considerada y un valor de 0 lo opuesto, es decir un funcionamiento sin pérdidas en el servicio.

La otra gran familia de indicadores de resiliencia tiene que ver con tasas de recuperación. En estricto rigor, es la tasa de recuperación la que permite reducir más rápida o lentamente la pérdida en el servicio del sistema. La tasa de recuperación puede ser, por ejemplo, el número de hogares que ha recuperado la energía eléctrica, o el servicio de agua potable, por día u otra unidad de tiempo. Matemáticamente esta tasa de recuperación puede medirse a través de la variación del déficit del sistema por unidad de tiempo, es decir

$$V(t) = \frac{d\mu}{dt}(t) = \dot{D}(t) - \dot{C}(t) \qquad (11)$$

donde V(t) es la velocidad instantánea de recuperación. Naturalmente es posible también definir una velocidad media $\bar{V}(t)$ de recuperación para una ventana de tiempo t_f-t_i simplemente calculando

$$\bar{V} = \frac{\mu(t_f) - \mu(t_i)}{(t_f - t_i)} \qquad (12)$$

La Figura 18 muestra gráficamente el sentido físico de todas estas medidas de resiliencia. El lector puede intuir que nada impide considerar a cualquiera de estas métricas de resiliencia como nuestra variable de salida OV, y por ende someterla al mismo tipo de análisis de riesgo que cualquier otra variable, calculando tasas medias anuales o períodos de retorno para λ_R,λ_V o λ_V.

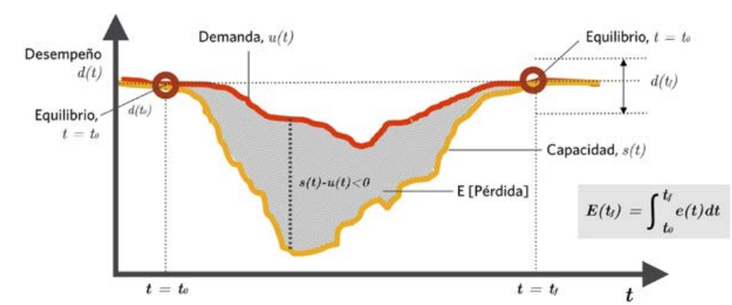


Figura 18: Representación de relación capacidad / demanda de un sistema

EJEMPLO SIMPLIFICADO DE LA EVALUACIÓN DEL RIESGO DE UNA ESTRUCTURA BAJO AMENAZA SISMICA

Esta sección contiene un ejemplo completo, pero simplificado, del cálculo del riesgo de un edificio de Hormigón Armado (HA) bajo amenaza sísmica. El edificio es una estructura (ficticia) de muros de HA con 22 pisos de altura y dos subterráneos (Superficie total, A= 30.000 m2). Su período fundamental de vibración es T=1s. El propósito de este ejemplo es únicamente mostrar al lector las distintas etapas del proceso y los tipos de cálculo que se realizan. Los valores entregados si bien son realistas, no dicen relación con ninguna estructura en particular. Es importante mencionar además que, a pesar de la simplicidad del ejemplo, los pasos requeridos para el cálculo del riesgo y la resiliencia de esta estructura son similares a los que se utilizan en sistemas más complejos como puede ser una red o una ciudad completa.

Curva de amenaza para el sitio de estudio

Consideremos que la estructura se ubica en la intersección de avenida San Martín con 14 Norte de la ciudad de Viña del Mar. Las coordenadas geográficas de latitud y longitud de este punto son (-33,009°, -71,551°). El primer paso de esta evaluación de riesgo corresponde a la estimación de la curva de amenaza sísmica calculada en este caso para el sito en estudio. El suelo de fundación es una arena de densidad media y clasifica como suelo tipo D caracterizado por una velocidad de las ondas de corte V_{s30}=200 m/s. Para simplificar el análisis, consideremos que la medida de intensidad que nos interesa es IM=PGA. La curva de amenaza específica de PGA para el sitio se muestra en la parte (a) de la Figura 19 y el espectro de diseño derivado consistente con esta amenaza se presenta en la parte (b) de la Figura. El valor de la coordenada espectral para T_o=1s, que es el período fundamental del edificio, fue derivado utilizando el GMPE (Ground Motion Prediction Equation) propuesto por Montalva et al. (2017).

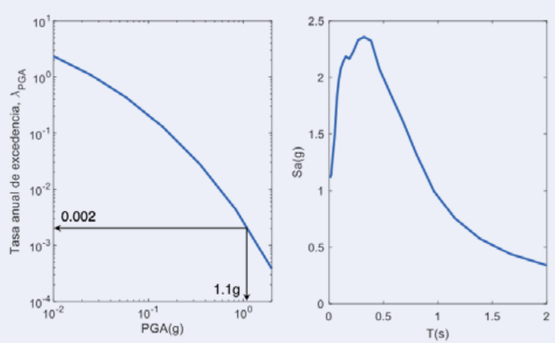


Figura 19: Curva de amenaza y espectro de diseño elástico para el edificio de HA usado en el ejemplo con coordenadas geográficas (33,009°S, 71,551°W)

Definición y función de fragilidad del sistema

Por razones de simplicidad escogeremos la función de fragilidad para edificios de muros de HA propuesta por la plataforma Hazus (FEMA). Estas funciones de fragilidad se derivan de análisis inelásticos de muchas estructuras y están siendo actualmente derivadas específicamente para edificios chilenos por uno de los equipos de investigación de CIGIDEN (Ref.). Sin embargo, para efectos de este ejemplo, es suficiente considerar por ahora las curvas y estados de daño propuestos por Hazus y presentados en la Figura 8.

Definición de la variable de salida y resiliencia del sistema

Supongamos que el edificio es para arriendo y que la variable de salida que es de interés a la evaluación de riesgo es el costo asociado a recuperar el normal funcionamiento de la estructura. Por simplicidad, la función de costo propuesta considera una componente fija, correspondiente al costo de reparación de la estructura como porcentaje del costo total de la estructura, y a una componente variable correspondiente al costo diario por tener en desuso al edificio (por ejemplo, el pago por perjuicio a los arrendatarios del edificio mientras la estructura se recupera). Tanto el costo fijo, como el costo variable, dependen del estado de daño en que se encuentre la estructura. La Tabla 2 muestra ambos costos para cada uno de los estados posibles de daño, y el tiempo de recuperación requerido para poner a la estructura en funcionamiento nuevamente.

Tabla 2: Costos y tiempos de recuperación, ambos determinísticos, asociados a los distintos estados de daño

ESTADO DE DAÑO	COSTO FIJO (C_F)/COSTO ESTRUCTURA[1] (%)	COSTO VARIABLE C_V (UF)/DIA	TIEMPO DE RECUPERACIÓN, T(DIAS)
SIN DAÑO	0	140	0
LEVE	0,5	140	7
MEDIO	2	140	30
SEVERO	20	140	180
COMPLETO	100	140	700

1 El costo por metro cuadrado considerado para la estructura es de C_E/A=40 UF/m²

Así, el costo de reparación C_{TOT} (ds) para una estructura sometida a este terremoto que alcanza el estado de daño ds estará dado por la expresión

$$C_{TOT}(ds) = C_F(ds) \cdot C_E + C_V(ds) \cdot T(ds) \quad (13)$$

donde las variables C_F, C_E, C_V y T representan el costo fijo, calculado como porcentaje asociado al estado de daño, el costo de inversión de la estructura, el costo variable por interrupción del uso y el tiempo de recuperación, respectivamente. Los valores de los costos utilizados corresponden a los estados de daño definidos en la fila correspondiente a ds en la Tabla 2, mientras que el estado de daño ds se determina muestreando aleatoriamente la distribución discreta de probabilidades P(ds=DS|im=IM) en el punto correspondiente a la medida de intensidad sísmica considerada (curva de fragilidad, Figura 8). Tal como se explica a continuación, este análisis se repite para cada una de las miles de simulaciones que requiere el método de Monte Carlo para el cálculo del riesgo.

Curva de riesgo para la variable de salida

Para calcular la curva de riesgo asociada a la variable de salida que es λ_{costo}, es decir la tasa media anual de exceder un cierto valor de costo, debemos utilizar simulación de Monte Carlo, muestreando un gran número de veces todas las cantidades que son aleatorias, en este caso, el valor de la amenaza sísmica y los estados de daño de la estructura dada una amenaza (curva de fragilidad). El diagrama de la Figura 20 muestra esquemáticamente el flujo de las operaciones necesarias para determinar la tasa λ_{costo}. Sin embargo, para mayor sencillez consideremos primero los cómputos asociados a una sola realización, la que luego debe repetirse decenas de miles de veces para el cálculo de la curva descrita en la Figura 21.

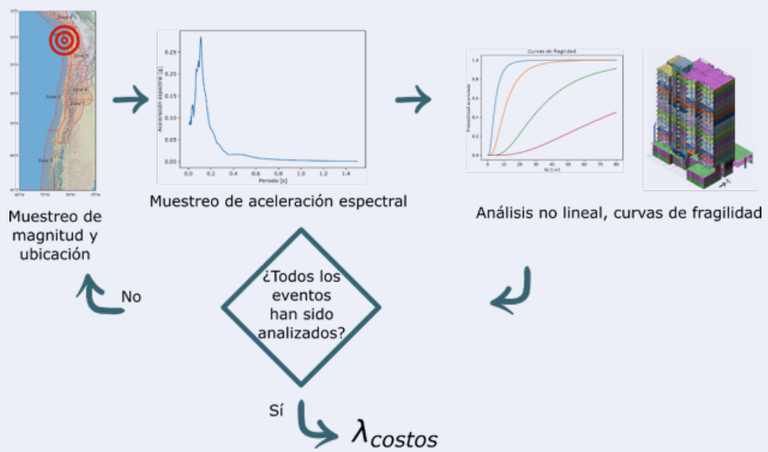


Figura 20: Diagrama de flujo esquemático de las operaciones necesarias para determinar la tasa media anual de excedencia del costo del edificio por concepto de sismo, λ.

Consideremos, por ejemplo, que se ha muestreado aleatoriamente un terremoto con magnitud de momento M_w 8,2 y distancia R = XX km, y que entrega una aceleración espectral en el periodo fundamental de la estructura T_o = 1s de IM = S_A (T_o) = 2,94 m/s² para el sitio en estudio. La intensidad IM = S_A (T_o) = 2,94 m/s² corresponde a un seudo-desplazamiento IM = S_D (T_o) = $^{2,94}/_{(4\pi^2)} \times 100$ = 7,45 cm.

Con este seudo-desplazamiento es posible entrar a la Figura 8c y evaluar las probabilidades de caer en los distintos estados de daño. En particular, para este edificio se tiene que las probabilidades de los distintos estados de daño son: 21,85% sin daño; 50,55% daño leve; 26,38% daño moderado; 1,16% daño severo; y 0,06% daño completo. Para determinar el costo debemos muestrear el estado de daño con las probabilidades antes mencionadas. Asumamos que nuestro muestreado aleatorio nos arroja que la estructura quedó en un estado de daño moderado. Finalmente, el costo de reparación de la estructura, cuando la aceleración espectral es de 2,94 m/s² y el daño es moderado, es de 28.200 UF. Este análisis, que de por sí está muy simplificado en este ejemplo, se repite para cada una de las simulaciones de magnitud y distancia del sismo y posible estado de daño, ya que para el mismo valor de aceleración espectral podría implicar otro estado de daño, cambiando totalmente el resultado de esta simulación. De ahí la importancia de que el número de simulaciones sea suficientemente grande como para representar adecuadamente las probabilidades asociadas a cada magnitud, distancia, y estado de daño posible.

Consecuentemente, el valor calculado de esta manera no entrega información de la probabilidad de ocurrencia, ya que la mayor incertidumbre detrás de este valor está escondida en el valor de la amenaza considerada y los estados de daño. Por ejemplo, para una variable como la aceleración espectral IM = S_A (T_o) = 2,94 m/s², existen infinitas posibilidades de magnitud y distancia de un sismo que pueden generar este valor. Como es de esperar, valores muy altos de aceleración espectral tienen probabilidades muy bajas de ocurrencia si la magnitud del sismo es baja y la distancia al foco del sismo es grande, mientras que este valor aumenta a medida que la magnitud es mayor y la distancia decrece. Sin embargo, al acercarnos al sitio en estudio, estos eventos son cada vez más infrecuentes. Consecuentemente, para obtener la curva de riesgo asociada a la variable de una tasa de excedencia de un costo medio anual, λ_{costo}, es imprescindible utilizar simulación de Monte Carlo, muestreando un gran número de veces la magnitud del sismo y su distancia al edificio, y para la ocurrencia de cada sismo, muestrear los estados de daño de la estructura dada esa amenaza. El diagrama de la Figura 20 muestra esquemáticamente el flujo requerido de las operaciones necesarias para determinar la curva de riesgo de λ_{costo}. .

Una vez realizadas las miles de simulaciones, podemos contar aquellas que exceden el nivel de costo deseado y dividir por el número de realizaciones consideradas para calcular la probabilidad de exceder ese costo (Ecuación (13)). Para calcular la tasa media anual de excedencia de dicho costo, λ_{costo}, es necesario multiplicar las probabilidades obtenidas por la tasa media anual de todos los eventos considerados, ν. Es así como obtenemos la curva de riesgo presentada en la Figura 21. Es interesante observar en este ejemplo simple, como el intervalo de confianza crece a medida que el costo esperado de reparación crece. Otro aspecto interesante, es que el costo máximo posible es el del edificio que es 40 UF ×30000 m²=1,2 millones de UF. Naturalmente como los estados de daño considerados para la estructura son discretos, la tasa media anual de excedencia del costo aparece como constante a tramos decrecientes cuanto mayor es el costo esperado de reparación.

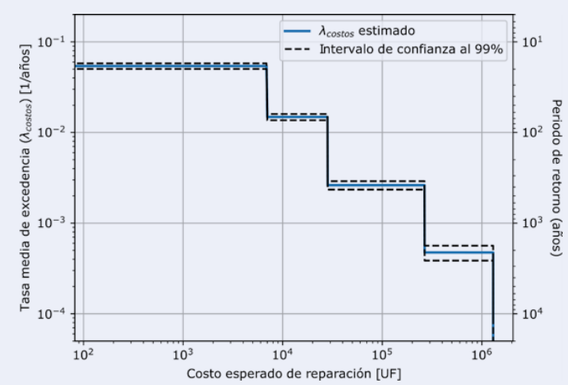


Figura 21: Tasa media anual de excedencia del costo esperado por sismo en la estructura considerada, λ_{costo}

Interpretación de los resultados

Las curvas de riesgo (Figura 21) son una herramienta muy útil para realizar un análisis económico de un proyecto; sin embargo, el lector puede reconocer que para calcular este riesgo se requiere bastante trabajo. Lamentablemente, el procedimiento descrito en este ejemplo, que es central para entender la evaluación de riesgo de cualquier sistema, muchas veces no es comprendido a cabalidad por los tomadores de decisión.

Es común ver en la práctica, y también en la literatura técnica, muchos estudios basados en situaciones de eventos extremos, como si el fenómeno fuese determinístico, o pudiese ser caracterizado de forma determinística. Esta es una discusión profunda, pero la ventaja de un análisis de riesgo es que considera todos los eventos posibles que le pueden ocurrir a un sistema y en función de eso caracteriza, de forma probabilística, la variable de interés para el tomador de decisión, en este caso λ_costo. Por ejemplo, decir que el costo esperado de reparación para un próximo evento sísmico es de, digamos 2 UF/m2, es conceptualmente incorrecto. Lo que se puede decir gracias a esta metodología es que conocemos la probabilidad de exceder un cierto nivel esperado de daño, digamos 2 UF/m2, dada la ubicación y el tipo de estructura. Alternativamente podemos decir que la tasa media anual de excedencia de un costo como el indicado (2×30.000=60.000 UF) es también conocida. Como la ocurrencia de los eventos sísmicos se ha asumido como realizaciones de un proceso de Poisson homogéneo (ocurrencia infrecuente e incrementos temporales independientes), el valor esperado del costo en un tiempo t, se puede escribir como

$$E[C_{TOT}, t] = \frac{E[C_{TOT}, 1\ \text{año}]}{\ln(1+\alpha)}\left(1 - \frac{1}{(1+\alpha)^t}\right) \qquad (14)$$

donde $E[C_{TOT}, 1\ \text{año}]$ es al área bajo la curva de la Figura 21 y α es una tasa de descuento real (corregida por inflación). En nuestro ejemplo, $E[C_{TOT}, 1\ \text{año}] \approx 1.900$ UF, de forma que, si consideramos una tasa de descuento real del 4% y una ventana de tiempo de 50 años, el costo esperado de recuperación resulta de alrededor de 41.600 UF.

Más concretamente en este ejemplo sencillo, viendo la Figura 21, podemos decir que para un edificio con las características planteadas en este ejemplo se estima que la tasa de tener un costo anual que supere las 10.000 UF es $\lambda_{costos} \approx 0{,}015$ [1/años], o equivalentemente, que en promedio se espera superar las 10.000 UF cada 67 años. Esto no es lo mismo que decir que un sismo con un periodo de retorno de 67 años generará este costo por daño. La razón es que este costo de 10.000 UF es el resultado de todos los eventos posibles que pueden ocurrir sobre el sistema en esa ventana de tiempo, y que este valor en promedio se supere cada 67 años.[7]

El análisis de riesgo nos permite entonces poder identificar medidas de prevención sobre la estructura de forma de reducir, por ejemplo, estas tasas medias anuales de excedencia de los costos. Nos permite también, muy importante, poder comparar la seguridad de alternativas distintas.

7 Estos datos no son reales, es solo un ejemplo que tiene algún sentido de realidad, pero no corresponde al riesgo de estructuras de hormigón armado de 30 pisos en la ubicación indicada.

SECCIÓN 3:
CAMBIO CLIMÁTICO E INFRAESTRUCTURA EN CHILE

INTRODUCCIÓN

Los servicios y obras de infraestructura cumplen un rol de soporte esencial para una amplia gama de sectores sociales y productivos, y por ende son un facilitador para el desarrollo económico y el bienestar social, la salud y calidad de vida de la población. Todos los sectores productivos necesitan de infraestructura, especialmente aquella que permite utilizar agua: la agricultura, la minería, el sector energético, la pesca, la silvicultura y las industrias. Por otra parte, la población necesita de obras para abastecerse de agua potable y disponer y tratar sus aguas servidas y aguas lluvias, así como para asegurar su bienestar general y reducir o minimizar el riesgo frente a peligros hidrometeorológicas, tales como crecidas, sequías, deslizamientos en masa y avalanchas. Finalmente, también son muy necesarias las obras que garanticen la movilidad y conectividad de la sociedad, como son los puertos, puentes, caminos y carreteras.

El desempeño de la infraestructura, así como su planificación, diseño y operación, pueden ser directa o indirectamente afectados por las condiciones climáticas existentes, y también por condiciones a largo plazo producto del cambio climático. A esto se agregan cambios en otras variables muy relevantes para la infraestructura, como lo son los usos y coberturas de suelo, el tamaño de la población, las costumbres sociales y culturales, etc. Los servicios de infraestructura de conectividad y protección necesitan tomar en cuenta los potenciales impactos asociados a todos estos cambios, y en particular, en lo referido al cambio climático, deben considerar alteraciones que se esperan en la frecuencia y magnitud o intensidad de los eventos hidrometeorológicos, particularmente aquellos de carácter extremo. Por otra parte, se debe considerar los posibles cambios en la oferta y demanda de recursos hídricos, las que definen en parte el tipo y diseño de las obras a implementar.

De acuerdo con el último informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2014), el cambio climático está ocurriendo, y el efecto de la actividad antropogénica sobre este proceso es indesmentible. El potencial impacto que el cambio climático pueda tener sobre las actividades socioeconómicas de una región determinada es difícil de cuantificar. Sin embargo, las proyecciones indican que los esfuerzos hasta hoy realizados en relación con la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) son insuficientes para evitar el alza de las temperaturas promedio globales, por lo que esfuerzos de adaptación ligados al desarrollo de políticas públicas han pasado a cobrar mayor relevancia durante los últimos años.

Esta sección entrega un marco conceptual de cómo se relaciona el cambio climático con la infraestructura. Se entrega adicionalmente información específica de los efectos del cambio climático en Chile y su relación con infraestructura y finalmente se entregan algunos aspectos metodológicos que deben tenerse en cuenta para la planificación y diseño de infraestructura. La presentación de este documento contiene experiencia previa de proyectos que el Centro de Cambio Global UC (CCG) y el Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN) han desarrollado a solicitud del Ministerio de Obras Públicas y Ministerio de Medioambiente de Chile.

MARCO CONCEPTUAL: IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO E INFRAESTRUCTURA

Como base del marco conceptual de este trabajo utilizaremos la información generada en el Informe Especial de Cambio Climático y Eventos Extremos (SREX por sus siglas en inglés) (IPCC, 2012). En dicho informe se establecen las relaciones básicas existentes entre la adaptación al cambio climático y la gestión del riesgo de desastres tal como se presentan en la Figura 22.

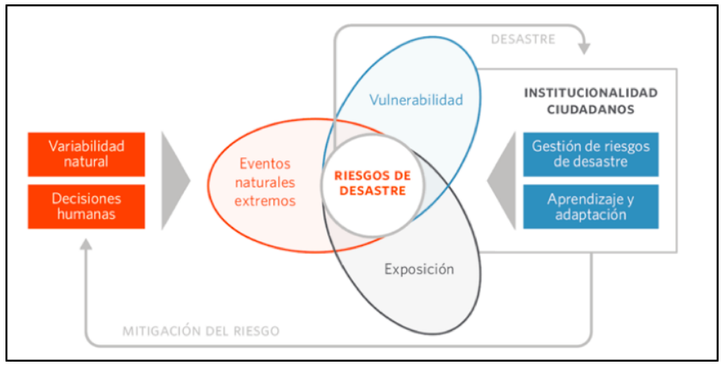


Figura 22: Relaciones entre la adaptación al cambio climático y la gestión de desastres. Fuente: Modificado de IPCC (2014).

De acuerdo con el marco conceptual descrito en la Figura 22, tal como ya se ha explicado, un desastre se desarrolla por la concurrencia de tres factores: las amenazas (de origen climático, geofísico, biológico o tecnológico), la exposición de sistemas sociales y construidos frente a estas amenazas, y las vulnerabilidades de estos sistemas que cuantifican los daños o efectos negativos en función de la intensidad con la que las amenazas los alcanzan. De esta definición se deriva que para reducir el riesgo de desastres se deben controlar estos factores, en donde las decisiones humanas tienen efectos directos sobre la exposición y la vulnerabilidad, e indirectos sobre el clima a través de los gases de efecto invernadero. Para las amenazas climáticas se puede distinguir entre la variabilidad natural intrínseca al sistema y aquella inducida, exacerbada o disminuida producto del cambio climático de origen antropogénico. El desarrollo sostenible contribuye a ambos efectos en particular a través del desarrollo de políticas y/o medidas de Adaptación y Gestión del Riesgo de Desastres. Pese a que el objetivo de ambas estrategias es el mismo, la adaptación al cambio climático se puede reconocer como un complemento a la gestión del riesgo de desastres concebido para amenazas que se manifiestan en el largo plazo.

Esta relación básica muy centrada en desastres o eventos extremos puede ser extendida al considerar condiciones climáticas de largo plazo o climatología de base. Al ampliar el esquema en este sentido cobra más relevancia en términos relativos la adaptación al cambio climático permitiendo además reconocer aspectos no sólo negativos, sino que también positivos que pueden manifestarse con nuevos escenarios climáticos. Una nueva condición climática de base puede ofrecer nuevas oportunidades en una región determinada. Un ejemplo de esta situación podría asociarse a cambios positivos en la productividad de ciertos cultivos.

La infraestructura tiene un rol muy relevante básicamente en dos aspectos asociados a la adaptación al cambio climático:

1. Por una parte, las obras de infraestructura pueden considerarse como parte de los elementos que se ven expuestos y/o son vulnerables a una amenaza climática específica. En cierta medida se puede considerar que todas las obras de infraestructura en Chile están expuestas a alguna amenaza natural, geofísica o climática.
2. Por otra parte, es posible considerar que cambios en las condiciones climáticas pueden aumentar de manera negativa la exposición de grupos vulnerables siendo la infraestructura una de las alternativas existentes para reducir esta exposición[8]. Ejemplos de obras que caen dentro de esta categoría son todas aquellas obras destinadas a proteger a la población de eventos extremos (e.g., drenaje de aguas lluvia, obras de protección costera y fluvial) así como también obras de infraestructura destinadas al almacenamiento, distribución y uso eficiente de recursos hídricos (e.g., embalses, sistemas de regadío, sistemas de agua potable).

CAMBIO CLIMÁTICO EN CHILE

En Centro y Suramérica, las proyecciones de cambio climático indican que habría en el futuro un alza de las temperaturas y cambios en la intensidad y frecuencia de ocurrencia de precipitaciones y clima de oleaje (Magrin et al., 2014). Potenciales impactos asociados a este tipo de cambios, generalmente vinculados a posibles cambios en los eventos extremos, implican una amenaza para las obras de infraestructura, y consecuentemente, una amenaza también para todos aquellos sectores o necesidades que dependen o son abordadas por medio de distintas obras.

La información oficial más reciente de los impactos del cambio climático para el caso de Chile es la que se utilizó en la preparación de la Tercera Comunicación Nacional (MMA, 2017). Actualmente el Ministerio de Medioambiente se encuentra preparando la Cuarta Comunicación Nacional que entregará información actualizada de estos impactos. Esta evaluación se basará en los resultados del proyecto Atlas de Riesgo Climático (ARCLIM). Sin perjuicio de lo anterior, tomando en cuenta información proveniente de escenarios climáticos proveniente de la versión CMIP5 de los Modelos de Circulación General del Clima (GCM) y análisis de tendencias de eventos históricos se puede concluir que los principales impactos del cambio climático en relación con la infraestructura en Chile están asociado a los siguientes fenómenos climáticos:

- Reducción de precipitaciones y aumento de demanda de sequía en la zona centro norte, centro, centro sur y sur del país
- Aumento en intensidad de precipitaciones en la zona norte y austral del país y mayor frecuencia de aluviones e inundaciones fluviales
- Aumento en intensidad y frecuencia de eventos de marejadas e inundaciones costeras

Los resultados promedio (para un escenario RCP 8.5) esperados para Chile en términos de cambios de temperatura y precipitación se presentan en la Figura 23. Se aprecia que para mitad de siglo se proyecta un aumento en las temperaturas, sobre pasándose 1 °C en parte importante del territorio, excepto en la zona más austral donde los aumentos en temperatura son menores debido a la influencia moderadora de los océanos. Por otra parte, en el caso de la precipitación se aprecia de manera robusta a partir de la

8 Es posible concebir también que el cambio climático sea percibido como una oportunidad y no como una amenaza en cuyo caso la infraestructura podría servir para aumentar la exposición de grupos humanos a estas nuevas condiciones.

Región de Valparaíso hasta la Región de Los Lagos una reducción de precipitaciones del orden de un 10%. En el extremo norte del país, en la zona altiplánica y en las zonas cordilleranas de la Región de Atacama y Región de Coquimbo se aprecia también en promedio de los modelos una reducción en precipitaciones, sin embargo, en muchas de estas zonas existe un porcentaje importante de modelos que proyecta más bien un aumento en las precipitaciones (zona de transición). Esta es una zona con mayor nivel de incertidumbre. Finalmente, en la zona más austral se presenta una señal de aumento en las precipitaciones que es incierta en la Región de Aysén pero que se va tornando más robusta en la Región de Magallanes.

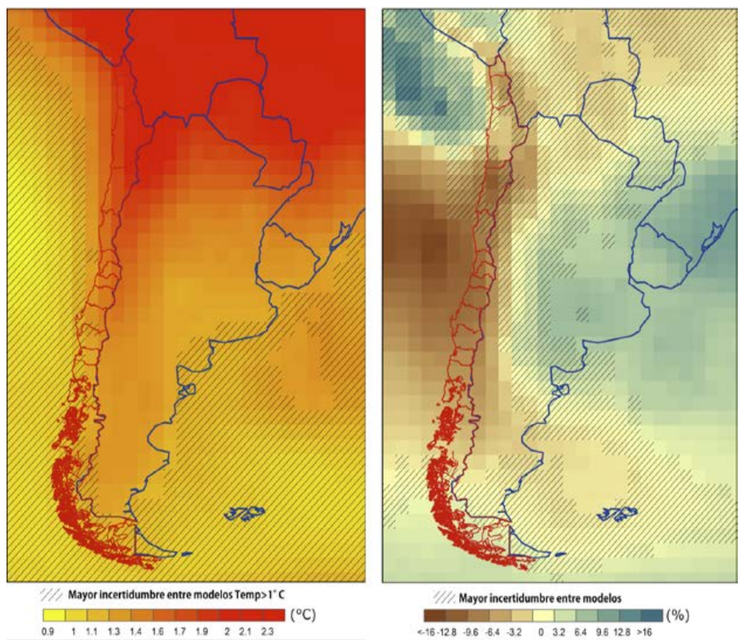


Figura 23: Cambios promedios en precipitación anual (a) y temperatura promedio anual (b) para el periodo 2030-2060 (respecto de base histórica 1986-2015). Nota: Resultado de ensamble de 20 GCMP. En el panel de cambios en precipitación las áreas achuradas corresponden a las zonas en donde existe menos de un 50% de modelos que presentan la tendencia indicada por el color. En el panel de cambios en temperatura las áreas achuradas corresponden a las zonas donde existe menos de un 50% de modelos que indiquen un aumento 1 °C. Fuente: Bambach et al. (2019).

Las sequías son un fenómeno recurrente en términos temporales y que normalmente muestra una extensión espacial considerable. La evidencia reciente muestra que las sequías meteorológicas, hidrológicas y agronómicas se han intensificado de manera relevante en los últimos años (Boisier et al., 2018; Garreaud et al., 2019). Si bien ellas dependen de condiciones climáticas e hidrológicas, en un número importante de casos su ocurrencia y severidad están asociadas a temas institucionales y de manejo que hacen que la oferta sea incapaz de satisfacer la demanda (Muñoz et al., 2020). Los posibles impactos asociados a una reducción en niveles de precipitación y cambios en la disponibilidad de recursos hídricos han sido estudiados en una serie de cuencas del país especialmente en la zona centro del país (Vicuna et al., 2011; Demaria et al., 2013; Meza et al., 2014; Bozkurt et al., 2018).

Otro fenómeno de gran interés dado sus potenciales altos impactos es el de las inundaciones y aluviones. Entendida como una amenaza de origen meteorológico, las inundaciones y aluviones se explican por la ocurrencia de crecidas, o aumentos bruscos y bastante puntuales de los caudales y volúmenes de escorrentía. Estas crecidas típicamente se clasifican como fluviales y pluviales (Di Castri & Hajek, 1976; Peña & Klohn, 1990). Las inundaciones fluviales son un proceso natural en el que la descarga del río sobrepasa la zona del cauce principal y fluye a través de la planicie de inundación (Tockner et al., 2010). Estos eventos se convierten en un peligro cuando esta planicie se encuentra ocupada por asentamientos o actividades humanas. Por otra parte, las crecidas pluviales son típicas del contexto urbano y son ocasionadas no por la crecida de un curso de agua propiamente tal, sino por anegamientos con aguas superficiales generadas in-situ, y magnificadas por la carencia de sistemas de gestión de drenaje urbano. Los factores meteorológicos son los principales detonantes de crecidas fluviales, las que suelen ocurrir debido a precipitaciones elevadas, con intensidades importantes en periodos cortos de tiempo para el caso de cuencas pequeñas, y más largos para aquellas de mayor tamaño. En el contexto nacional dado el particular relieve del país, a este factor se agrega la concurrencia de elevadas temperaturas, las que aumentan la elevación de la Isoterma 0 °C (e.g. Carrasco et al., 2005; Garreaud, 2013; Vicuña et al., 2013; Soto et al., 2017; Castro et al., 2019). Estos eventos de precipitación con altas temperaturas comúnmente conocidos como lluvias cálidas (Garreaud, 2013) producen aumento en los volúmenes de agua disponible para escurrir, e incrementos en los caudales y concentraciones de sólidos transportados. Ejemplos de este tipo de eventos son los aluviones de Antofagasta y Taltal de 1991 (91 muertos, 19 desaparecidos y 70.000 damnificados), el aluvión del 3 de mayo de 1993 en Santiago (26 muertos, 8 desaparecidos y 30.000 damnificados), y los aluviones de Atacama el 2015 (31 muertos, 16 desaparecidos y 35.000 damnificados. Ahora bien, es importante notar que la plataforma de índices de cambio climático[9] de la Dirección Meteorológica de Chile en general reporta aumentos en indicadores extremos de precipitación sólo en la zona norte del país, incluyendo en particular los indicadores de precipitación máxima diaria, y días lluviosos y extremadamente lluviosos, aunque no hay estudios que establezcan la significancia estadística de estas tendencias temporales. Similares tendencias al aumento no se reportan consistentemente para el resto del país; por otra parte, si se identifican sistemáticas alzas en las temperaturas para todo el territorio nacional.

Finalmente es de relevancia notar que, junto a estos factores meteorológicos, otros factores detonantes de crecidas a considerar son la actividad volcánica (Peña & Klohn, 1990; Mandujano & Rodríguez, 2016; Tonon et al., 2017), deslizamientos cosísmicos (Mazzorana et al., 2019), procesos nivo-glaciales y los denominados Glacial-lake-outburst-flood (GLOF) (Peña & Escobar, 1987; Dussaillant et al., 2010; Jacquet et al., 2017; Iribarren Anacona et al., 2018) e intervención antropogénica (Harper et al., 1992; Rojas et al., 2014; Yáñez-Morroni et al., 2018).

Por último, con respecto del clima de oleaje y la ocurrencia de marejadas, el estudio MMA (2019) efectúa un análisis histórico obteniéndose un aumento en el rango de 0,003 y 0,011 [m/año] en las alturas significativas, siendo las tendencias mayores hacia el sur. En lo relativo a proyecciones, el mismo estudio analiza los cambios del oleaje entre un período histórico (1985-2004) y la proyección a medio siglo (2026-2045). Los resultados muestran que la altura significativa para el clima medio experimenta cambios menores en todo el territorio, salvo por el extremo austral (Figura 24). En general, el clima medio del oleaje experimentará cambios menores a mediados de siglo (aumento leve de altura y periodo además de un giro leve al sur). No obstante, los eventos extremos (marejadas) asociados a periodos de retorno altos, se incrementarán notoriamente a mediados de siglo, especialmente en la costa central de Chile. Respecto de otros cambios

9 https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/historicos/mapaIndicesClimaticos/#

en las características del oleaje los análisis realizados en MMA (2019) muestran que el período medio del oleaje aumenta en todas las costas y la dirección del oleaje presenta un giro moderado al sur atribuible a la migración proyectada al sur del Anticiclón Permanente del Pacífico Sur (Schneider et al., 2017) que se asocia a un desplazamiento también al sur de la zona de generación del oleaje. Asociado a estos cambios, y a un desarrollo territorial que no ha internalizado correctamente las zonas inundables y los cauces naturales, en la última década se han acrecentado los problemas de erosión costera - especialmente en la zona central de Chile (Martínez et al., 2018). Un aspecto adicional que no debe olvidarse en el caso de Chile está relacionado con la gran actividad tectónica, que genera modificaciones del relieve (subsidencia o solevantamientos) a través de movimientos co-sísmicos o inter-sísmicos (Montencinos et al., 2017): éstos tienen efectos sobre el nivel medio del mar y a través de él, pueden aumentar o disminuir los impactos de las marejadas sobre los sistemas costeros.

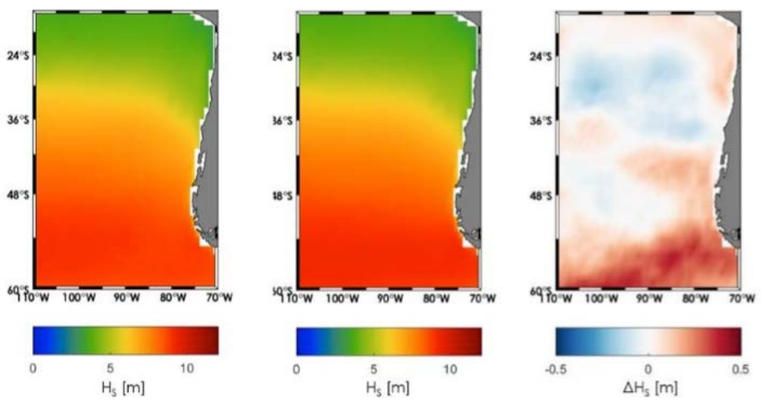


Figura 24: Campos de altura significativa, para el período histórico (1985-2004) y proyección (2026-2045), además de la diferencia entre ambos para el percentil 99% frente a Chile (Fuente: MMA, 2019).

La evidencia histórica reciente muestra la relevancia de la ocurrencia de estos eventos hidrometeorológicos extremos. En el estudio MOP (2018) se analizan eventos hidroclimáticos recientes (periodo 2006-2018) que han sido amenazas sobre la operación de obras de infraestructura hidráulicas y costeras. Estos eventos (Figura 25) se separan en remociones en masa (aluviones), los más recurrentes (46% del total), inundaciones fluviales (29% del total) y marejadas (25% del total). Dada el corto periodo analizado no es posible establecer conclusiones sobre recurrencia o tendencias en la ocurrencia de estos eventos. Se puede destacar solamente que el año 2015 fue particularmente intenso en ocurrencia de estos eventos.

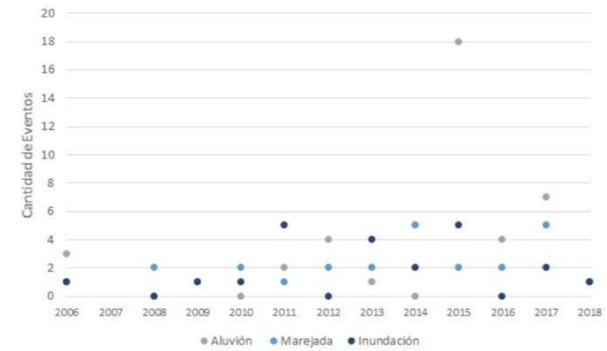


Figura 25: Ocurrencia de eventos extremos de origen hidrometeorológico periodo 2006-2018 (Fuente: MOP, 2018)

Una síntesis de los posibles efectos del cambio climático distribuidos por regiones del país se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3: Distribución regional de los efectos del cambio climático relacionados con obras de infraestructura

Zonas del país (regiones)	Efectos del cambio climático		
	Escasez de recursos hídricos	Inundación/aluviones	Oleaje
Norte (Arica y Parinacota; Tarapacá; Antofagasta)	Aumento de demanda (mayor evaporación)	Aumento en intensidad de precipitaciones	Aumento altura significativa
		Aumento elevación de isoterma 0 °C e inundaciones fluviales y aluviones	
Centro Norte (Atacama; Coquimbo)	Aumento en demanda (mayor evaporación)	Aumento en intensidad de precipitaciones	Aumento altura significativa
	Disminución precipitación anual	Aumento elevación de isoterma 0 °C e inundaciones fluviales y aluviones	
	Cambio estacionalidad de caudales		
Centro (Valparaíso; Metropolitana)	Aumento demanda (mayor evaporación)	Aumento elevación de isoterma 0 °C e inundaciones fluviales	Giro al sur del oleaje
	Disminución precipitación anual		
	Cambio estacionalidad de caudales		
Centro-Sur (O'Higgins; Maule; Ñuble; Biobío)	Aumento demanda (mayor evaporación)	Aumento elevación de isoterma 0 °C e inundaciones fluviales	Giro al sur del oleaje
	Disminución precipitación anual		
	Cambio estacionalidad de caudales		
Sur (Araucanía; Los Ríos; Los Lagos)	Aumento demanda (mayor evaporación y riego)	Aumento en intensidad de precipitaciones	Aumento altura significativa
	Disminución precipitación anual	Derretimiento abrupto de glaciares	Giro al sur del oleaje
Austral (Aysén; Magallanes)	Aumento demanda (mayor evaporación y riego)	Aumento en intensidad de precipitaciones	Aumento altura significativa
		Derretimiento abrupto de glaciares	
		GLOFs	

Fuente: Elaboración propia

CAMBIO CLIMÁTICO Y PLANIFICACIÓN DE INFRAESTRUCTURA EN CHILE

En base a estos antecedentes se pueden considerar una serie de relaciones entre los efectos del cambio climático y el rol de la infraestructura en Chile. Se presenta a continuación una descripción de estas relaciones dependiendo del servicio de infraestructura.

SERVICIO DE INFRAESTRUCTURA PARA LA PROVISIÓN DE AGUA

Los cambios en la oferta y demanda (actual o potencial) de recursos hídricos provocan una brecha que puede ser resuelta en parte con obras de infraestructura. Estas obras pueden utilizarse para acceder a nuevas fuentes, regular la disponibilidad de fuentes disponibles o reducir el consumo de agua. En función de las condiciones de base de disponibilidad de recursos hídricos, la manifestación de los cambios en el clima a lo largo del país y la existencia actual de obras que cumplan los servicios de infraestructura se pueden considerar distintas necesidades y tipos de obras. En la **zona norte** del país donde la disponibilidad actual de recursos es baja se pueden considerar obras que ayuden a acceder a nuevas fuentes como la desalación, acceso a pozos profundos y el reúso de aguas. Importante tener en cuenta los impactos que todo este tipo de obras tiene en términos de consumo de energía. En la **zona centro norte** existe actualmente una alta capacidad de infraestructura de regulación de agua y riego tecnificado. En esta zona se pueden considerar obras que logren acumulación de agua a nivel intrapredial y embalses pequeños en zonas de cabecera que puedan utilizarse para regular los cambios en la estacionalidad de caudales. Las obras de acceso a agua potable por comunidades rurales deben ser revisadas aumentando en gran parte de los casos la profundidad de pozos. En la **zona centro y centro sur** se puede mejorar la capacidad de regulación de caudales con embalses teniendo precaución de no afectar el transporte de sedimentos relevantes para las zonas costeras de esta zona del país. Dada la alta concentración de habitantes, se ve plausible también el reúso de aguas servidas, y respecto del riego, mejoras en la tecnificación y conducción de agua por canales. En esta zona del país en la medida que los recursos en los meses de invierno son más abundantes, se deben considerar obras que ayuden a la recarga de acuíferos en un esquema de operación conjunta de obras superficiales y subterráneas. En la **zona sur** existe una mayor abundancia de recursos hídricos, sin embargo, la infraestructura es limitada en algunos casos producto de esta abundancia de recursos y por lo tanto se deben realizar ajustes especialmente en relación con la provisión de agua potable rural. Se prevé que en esta zona aumente la presencia de cultivos permanentes (frutales, viñedos) que requieren riego transformándose paulatinamente la agricultura de secano que actualmente predomina en estas regiones. Se debe planificar estas nuevas obras de infraestructura para el riego. En la **zona austral** del país no se aprecian necesidades relevantes producto del cambio climático respecto de la provisión de recursos hídricos.

SERVICIO DE INFRAESTRUCTURA PARA LA PROTECCIÓN FRENTE A EVENTOS EXTREMOS ASOCIADOS A INUNDACIONES Y ALUVIONES

Para el control de estos eventos, tradicionalmente se ha adoptado en el país una estrategia basada en medidas estructurales de mitigación, como son obras fluviales de distinto tipo, canalizaciones y estabilización de cauces, y piscinas decantadoras para el control de sólidos, las que disminuyen la velocidad y el poder destructivo de los posibles aluviones. Si bien la planificación y diseño de esta infraestructura generalmente toma en cuenta variaciones tendenciales en algunos factores que condicionan su buen funcionamiento (e.g. cambios de uso de suelo, aumento de la población, etc.), la incertidumbre climática típicamente se evalúa bajo condiciones de estacionaridad, con un clima futuro igual al histórico. Al significar el cambio climático una condición de no estacionaridad que afectan el desempeño de la infraestructura, este fenómeno debe incorporarse formalmente en la planificación, diseño y operación de la infraestructura. Este es un desafío importante, no sólo porque conceptual y técnicamente requiere de enfoques y metodologías particulares y eventualmente complejas, sino también porque hay mucho en juego, dado la gran cantidad de recursos involucrados en el desarrollo de infraestructura, y su relevancia en el bienestar de la sociedad. El desafío en la materia entonces es desarrollar, documentar y promover metodologías cuantitativas sólidas para diseñar infraestructura y evaluar los impactos del cambio climático sobre esta. La ciencia ha dado importantes pasos que ahora la ingeniería está llamada a evaluar, entender y plasmar en estas metodologías. A esto se agrega las necesidades de implementación y seguimiento de infraestructura piloto diseñada, construida y operada según estas nuevas metodologías.

A pesar del positivo impacto en el control de inundaciones y aluviones, las obras de infraestructura pueden tener también algunos efectos negativos, los que se deben tener en cuenta. Por una parte, la sensación de seguridad asociada a estas obras puede motivar un aumento de la exposición y magnificar los impactos de una eventual falla. Por otra parte, particularmente en cauces y ríos perennes, puede haber una importante afectación del régimen y los ecosistemas fluviales dependiente de este. Finalmente, en muchas ocasiones este tipo de soluciones no se integran bien con el territorio urbano, pues solo buscan reducir los impactos del fenómeno físico, pero no necesariamente responden a otros objetivos de sustentabilidad y conservación ambiental. Por lo tanto, es relevante considerar un amplio espectro de medidas de mitigación que incluyan también las medidas no estructurales (MNE), las cuales con un enfoque de anticipación buscan reducir los daños y costos, más que modificar las propiedades físicas de los eventos. Adicionalmente, las MNE pueden responder a objetivos adicionales, como son la conservación del ambiente, el uso sostenible de recursos y la integración con otros servicios en el medio urbano. Ejemplos de MNE son la zonificación del riesgo, normas de construcción, comunicación del riesgo y planes de emergencia y evacuación. Estas medidas -particularmente las relacionadas con la planificación territorial- son esenciales y debiesen ser consideradas previo a las medidas estructurales, las que más bien debiesen focalizarse en el control del riesgo remanente luego de la correcta implementación de MNE. Es muy importante tener en cuenta que la implementación de cualquier medida requiere del entendimiento lo más completo posible de la cuenca y cauces involucrados, así como del comportamiento histórico y en tiempo real de las variables meteorológicas en el lugar. Con esta información es posible predecir la ocurrencia y el comportamiento de crecidas y aluviones, y sus potenciales impactos. En otras palabras, la ingeniería nacional está también llamada a participar activamente en el desarrollo, implementación y evaluación de estas medidas no estructurales, así como en el monitoreo continuo de las variables hidrometeorológicas detonante de eventos potencialmente desastrosos.

SERVICIO DE INFRAESTRUCTURA PARA LA PROTECCIÓN FRENTE A EVENTOS EXTREMOS ASOCIADOS A CLIMA DE OLEAJE

Los antecedentes recientes en relación con los efectos del cambio climático sobre el clima de oleaje ponen de manifiesto algunas tendencias que pueden tener incidencias importantes en el funcionamiento de obras de infraestructura portuaria y costera. De acuerdo con las proyecciones para las próximas décadas (MMA, 2019) el clima medio presentaría variaciones leves en altura de oleaje y dirección (con un giro hacia el sur) para las costas de Chile, pero cambios importantes en las estadísticas de valores extremos, especialmente para la zona central del país. Esta situación plantea desafíos importantes para i) el mantenimiento y adaptación de obras civiles diseñadas en base a las estadísticas de oleaje de décadas pasadas, ii) la actualización de normas y metodologías de diseño para incorporar proyecciones futuras de eventos extremos y la cuantificación de las incertidumbres asociadas.

Actualmente la normativa tanto referida al diseño de obras de infraestructura como aquella asociada al seguimiento de estas en etapas de vida posteriores no incorpora el Cambio Climático y sus posibles efectos sobre las obras costeras. Del mismo modo, los datos observados de oleaje disponibles a lo largo de la costa de Chile son insuficientes para caracterizar tendencias y cambios en el tiempo debido a que no existe una red de medición permanente con series de tiempo suficientemente largas. Es por ello por lo que el diseño de obras de ingeniería se ha basado fundamentalmente en bases de datos de oleaje modelados representativos del clima de décadas pasadas (hindcast), sin considerar en general escenarios futuros asociados al Cambio Climático. Esta última limitación, es particularmente crítica en obras civiles que requieren de gran inversión y larga vida útil, como lo son por ejemplo las obras portuarias.

Especialmente en la última década, se han evidenciado problemas de inundación costera debido al aumento en frecuencia e intensidad de marejadas. Un caso emblemático fue la tormenta del 8 de agosto de 2015, donde un evento ciclónico donde se combinaron fuertes vientos y bajas de presión generó marejadas e inundaciones que afectaron fuertemente a la infraestructura costera de las regiones de Valparaíso y Coquimbo (Winckler et al., 2017; Carvajal et al., 2017). Si bien los impactos de este evento fueron considerados inusuales, en los últimos años se han repetido en varias ocasiones sobrepasos de infraestructura costera, donde las imágenes de inundaciones en la Avenida Perú en Viña del Mar se han vuelto recurrentes.

Los servicios portuarios también han experimentado un incremento de cierres debido a marejadas, lo que ha redundado en down-times más prolongados para sus operaciones (MMA, 2019). El aumento proyectado para lo que resta del siglo XXI en intensidad y frecuencia de eventos extremos podría empeorar esta situación para varios puertos del país. Sin embargo, se requiere profundizar estos análisis puesto que los modelos también anticipan un leve giro hacia el sur para el clima medio del oleaje, lo que podría mejorar las condiciones de abrigo de algunos puertos. La modificación del clima de oleaje está también teniendo un impacto importante en las actividades de pesca artesanal y operación de caletas, y esta tendencia podría mantenerse en las próximas décadas dificultando aún más el desarrollo de esta actividad.

Otro aspecto que ha generado preocupación estos últimos años tiene relación con la erosión costera que ha sido especialmente visible en la Región de Valparaíso. El estudio del Ministerio del Medio Ambiente da cuenta del estado de distintas playas a nivel nacional (MMA, 2019) encontrando que, de las 35 playas analizadas, 9% presentan tendencias erosivas altas (retroceso de línea de playa de más 1,5 m por año), 71% muestran tendencia al retroceso, 11% se encuentran en condición estable, y sólo 9% presentan una tendencia a la recarga o acreción. El levantamiento de información realizado permite entonces realizar un diagnóstico preocupante en relación con los procesos de erosión y degradación de sistemas costeros, los que se han intensificado en la última década (Martínez et al., 2018; Rojas et al., 2019). La sequía prolongada (que disminuye los aportes de sedimentos hacia los sistemas costeros), el aumento de la energía del oleaje, sumado a la urbanización de espacios costeros que incluyen sistemas dunares, humedales o playas, estarían explicando la intensificación de los procesos de erosión costera (e.g. Arriagada et al., 2019; Rojas et al. 2019).

Finalmente, es necesario también recordar que Chile está expuesto a inundaciones por tsunamis, que, aunque con menor frecuencia, han afectado de manera importante a diversas localidades e infraestructuras costeras en la última década con gran impacto económico y social (Fritz et al. 2011; Catalán et al., 2015; Aránguiz et al., 2016).

En atención a los antecedentes y proyecciones iniciales disponibles en relación con el impacto que ya se está sintiendo en infraestructuras y sistemas naturales costeros debido al Cambio Climático, se hace necesario profundizar en los análisis para poder diseñar nuevas estrategias de desarrollo que permitan asegurar el desarrollo sostenible y seguro de la zona costera. La combinación de amenazas derivadas de la exacerbación de fenómenos climáticos, sumados a la posibilidad de ocurrencia de inundaciones por tsunamis de menor frecuencia, sugieren un abordaje integrado del problema de planificación, diseño y gestión de infraestructura portuaria y costera, así como de los procesos y normativas relacionadas con la planificación urbana y territorial.

REFLEXIONES FINALES

De acuerdo con lo presentado en este documento, queda en evidencia que la infraestructura tiene un rol muy relevante para lograr la resiliencia a los impactos del cambio climático en Chile. Este rol está asociado a distintos servicios de la infraestructura como son la provisión de recursos hídricos y la protección de otros servicios (como la movilidad, actividades productivas, generación de electricidad) frente a la ocurrencia de eventos extremos. Pese a no existir una cuantificación de las necesidades de infraestructura, se da cuenta de cuál es el tipo de infraestructura y como debiese ser su diseño y planificación en el contexto de un clima cambiante.

Es importante destacar que el rol de la infraestructura tiene que ir acompañado con otros mecanismos que ayudan también a lograr la resiliencia de la comunidades, ecosistemas y sectores productivos del país. Dentro de estos mecanismos se debe destacar el rol de la infraestructura verde (o soluciones basada en la naturaleza), la gestión de la demanda y la planificación del uso del territorio. Tomando en cuenta estos mecanismos complementarios se puede reducir de manera más eficiente la vulnerabilidad y exposición mejorando la resiliencia del país.

SECCIÓN 4: DESCRIPCIÓN DE INFRAESTRUCTURA CRÍTICA

Esta sección describe conceptos de resiliencia en relación a cuatro de los sistemas críticos que tiene el país. La descripción está lejos de ser exhaustiva, pero busca que el lector comprenda el tipo de análisis y resultados que se buscan para garantizar la continuidad operativa de estas cuatro líneas vitales. El propósito de toda evaluación de riesgo es identificar también qué aspectos son aquellos que condicionan de mayor manera dicho riesgo, y cuales son menos críticos. La sección anterior hizo hincapié sobre el riesgo de estructuras o sistemas individuales emplazados en un punto del territorio. En cambio, esta sección se concentra sobre sistemas distribuidos espacialmente como son las cuatro redes críticas estudiadas y de las cuales dependen la mayoría del resto de las redes y sistemas urbanos.

LÍNEAS VITALES: RED ELÉCTRICA, AGUA POTABLE, TRANSPORTE Y SALUD

RED ELÉCTRICA

La red eléctrica es un sistema tecnológico industrial que consiste en la generación y distribución de electricidad para cumplir con la demanda de electricidad de los consumidores residenciales, comerciales e industriales. Es un sistema a gran escala, compuesto por varios componentes heterogéneos, tanto desde un punto de vista físico como funcional, que interactúan en una estructura de red.

Los macro componentes principales que explican el funcionamiento de la red eléctrica a grandes rasgos incluyen las unidades generadoras, las subestaciones, las líneas de transmisión y distribución de electricidad, y las cargas que representan la demanda agregada de los usuarios finales. Tradicionalmente, la energía eléctrica es generada por unidades generadoras centralizadas que están situadas lejos de los consumidores finales. El nivel de voltaje, o tensión eléctrica, es elevado por subestaciones eléctricas "elevadoras" antes de entregar la energía a la red de transmisión, que a través de líneas de alto voltaje transmiten la electricidad con alta eficiencia en un área geográfica muy extensa, por ejemplo, en todo nuestro territorio. Luego, el nivel de tensión de la energía eléctrica es reducido en varias etapas por subestaciones eléctricas "reductoras" hasta llegar a un nivel de tensión compatible con la red de distribución que es caracterizada por líneas de bajo voltaje que suministran electricidad a los consumidores finales en un área local, por ejemplo a nivel urbano. Cabe notar que en las últimas décadas están ocurriendo cambios estructurales y funcionales importantes en la red eléctrica debidos a la introducción de la generación distribuida—por ejemplo, paneles fotovoltaicos en el techo de casas, micro turbinas hidráulicas, micro generación eólica, entre otros. Los generadores distribuidos están situados cerca del lugar donde hay demanda de electricidad y suministran electricidad a un solo consumidor o a una micro red que exporta la electricidad a la red eléctrica principal.

La red eléctrica, como los otros sistemas considerados como "críticos" es esencial para la prosperidad, la salud, el bienestar, la economía y la seguridad de la sociedad. Consecuentemente, su funcionamiento continuo debe estar garantizado. Sin embargo, estos sistemas a gran escala están muy expuestos a distintas amenazas naturales como pueden ser los terremotos y aluviones, entre otros. Los distintos componentes de la red eléctrica (unidades generadoras y subestaciones) están expuestos a varias intensidades de movimiento de suelo que son imprevistas y pueden causar daños estructurales importantes que pueden comprometer la capacidad del sistema eléctrico de generar, transmitir, distribuir y suministrar electricidad a los usuarios finales. Los daños pueden ser amplificados debido a las dependencias e interdependencias que existen entre el sistema eléctrico mismo y otras infraestructuras conectadas o dependientes. En efecto, incluso una pequeña falla puede propagarse a través de la red y en las infraestructuras conectadas generando los denominados efectos cascada. Por esta razón, es imprescindible conocer el modelo de la red eléctrica, para prevenir, mitigar y recuperar el funcionamiento de la red bajo un evento sísmico severo u otras amenazas naturales.

Descripción del modelo de la red eléctrica de Chile

En Chile se pueden identificar tres sistemas eléctricos principales: el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) que cubre la mayoría del territorio nacional desde la ciudad de Arica en el norte hasta la Isla de Chiloé en el sur; y los sistemas eléctricos de Aysén y Magallanes, respectivamente. Este trabajo se enfoca en el SEN, que se extiende por un largo de 3.100 km y suministra electricidad al 98,5 % de la población en Chile (Coordinador, 2019a). El SEN nació en noviembre del 2017 cuando el sistema eléctrico de las regiones del norte conocido como el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING) y el Sistema Interconectado Central (SIC) fueron interconectados (Coordinador, 2019a).

La creación de un modelo del SEN para analizar el riesgo y la resiliencia frente a una amenaza como la sísmica consiste de las siguientes etapas: (i) levantamiento de datos (geográficos, topológicos, eléctricos, y operativos) de las instalaciones de la red (unidades generadoras, subestaciones y líneas); (ii) conocimiento del comportamiento histórico de la generación y de la demanda de electricidad; (iii) modelamiento de la fragilidad de los componentes para evaluar el eventual daño estructural en cada componente; y (iv) desarrollo de un modelo para evaluar el desempeño de la red, en términos de energía no suministrada a los consumidores finales, considerando el daño ocurrido en los distintos componentes.

Los datos de las instalaciones de la red fueron levantados a partir del Coordinador Eléctrico Nacional (Coordinador, 2019b), el Ministerio de Energía (2019), y la Comisión Nacional de Energía a través de su plataforma Energía Abierta (Energía Abierta, 2019). Detalles sobre este proceso de levantamiento de datos se pueden encontrar en (Ferrario et al., 2019). En síntesis, los datos considerados que se refieren al año 2017 permitieron de identificar 500 unidades de generación, 994 subestaciones y 1.195 líneas de transmisión. En el año 2017, la capacidad de generación instalada era de 21,9 GW, la carga total anual de 68.526 GWh y la carga horaria más alta registrada fue de 10 GW. En la Figura 26a se reporta el mapa de Chile con las 500 unidades generadoras y las 994 subestaciones conectadas por 1.195 líneas, en la Figura 26b.

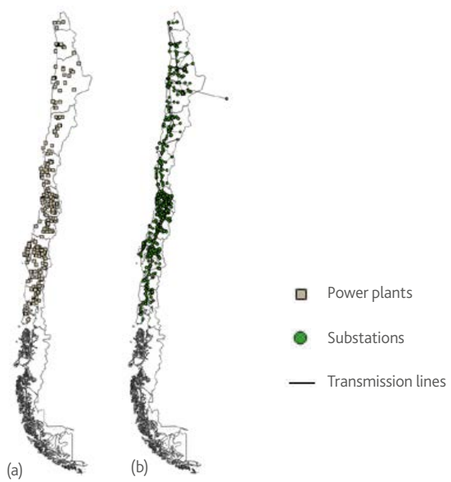


Figura 26: Mapa de la red eléctrica chilena: (a) unidades generadoras; (b) subestaciones y líneas de transmisión. Notar que la subestación fuera de Chile es una subestación chilena situada en Argentina (Ferrario et al., 2019).

Para estimar, por ejemplo, el eventual daño estructural que las unidades generadoras y subestaciones pueden sufrir por la ocurrencia de un sismo, se pueden utilizar de forma aproximada las curvas de fragilidad desarrolladas por FEMA (FEMA, 2003). Tal como fuera explicado anteriormente, estas curvas representan distintos estados de daño, a partir de un estado sin daño hasta un estado de daño total. Ellas diferencian las unidades generadoras según tamaño, es decir si pueden generar una potencia mayor o menor de 200 MW. Las subestaciones se clasifican según el nivel de voltaje, es decir si tienen bajo voltaje (entre 34,5 kV y 150 kV), medio voltaje (entre 150 kV y 350 kV), o alto voltaje (arriba de 350 kV) (FEMA, 2003). Respecto a la funcionalidad de los componentes, se asume en general que un componente que entra en cualquier estado de daño durante un sismo deja de funcionar, es decir se desconecta. Cuando eso ocurre, se asume típicamente que todas las líneas de transmisión conectadas a ese componente se interrumpen.

Por cada estado de daño estructural de un componente existe una curva de recuperación propuesta también por FEMA (FEMA, 2003) que estima el tiempo que demora la recuperación total del componente. Esta estimación del tiempo de recuperación es importante para evaluar el desempeño de la red y su recuperación en el tiempo.

Para el estudio de riesgo, una vez que la información sobre el estado de los componentes de la red antes y después del sismo sea conocida, es posible estimar el desempeño de la red usando diferentes tipologías de modelos, ya sean topológicos o de flujo. Lo usual es un modelo estándar de flujo de potencia para simular el despacho de electricidad a los distintos usuarios considerando la demanda agregada a nivel de las subestaciones considerando la disponibilidad (funcionalidad) de los distintos componentes.

Los modelos de flujo de potencia buscan reproducir el despacho de electricidad en la red y se basan en las leyes de Kirchhoff y de Ohm. Como es de esperar, estos modelos necesitan mucha información de las características eléctricas de los componentes. Por ejemplo, el modelo *Direct Current–Optimal Power Flow* (DC-OPF), es el modelo que más típicamente se adopta en redes eléctricas de transmisión (Gan et al., 2013). Este modelo se basa en una relación lineal entre el flujo de potencia en las líneas de transmisión y la potencia suministrada por las unidades generadoras. El despacho de electricidad ocurre según un criterio de minimización de los costos de operación y los costos de interrupción del servicio que son aquellos en que se incurre al no suministrar parte de la electricidad solicitada. Es por ello, que la métrica más comúnmente usada para evaluar el desempeño de la red es la energía no suministrada a los consumidores finales. Esta métrica representa bien el comportamiento de la red frente a cualquier amenaza.

Resultados del análisis del SEN

A modo de ejemplo, la Figura 27a presenta el mapa de PGA de un escenario de terremoto de magnitud de momento M_w 8,5, situado hipotéticamente en el mismo epicentro del terremoto de Algarrobo del 3 de marzo de 1985. En la Figura 27b se muestra uno de los posibles escenarios del estado de daño estructural de los componentes de la red obtenido usando el PGA de la Figura 27a. La Figura 27c muestra un posible escenario de recuperación de los componentes de la red y en Figura 27d muestra la curva de recuperación del servicio de la red eléctrica en el tiempo en términos de porcentaje de demanda suministrada a partir de la ocurrencia del terremoto hasta la recuperación completa de todos los componentes dañados (resiliencia). Para esta realización (escenario) resulta que la energía no suministrada es de 307,6 GWh y el tiempo total de recuperación del servicio es de 1.125 horas, esto es aproximadamente 47 días (Ferrario et al., 2019). Las fluctuaciones que se notan en la curva dependen de la variabilidad horaria de la demanda asumiendo condiciones normales, ya que en este ejemplo no se consideró una variación de la demanda debido a la ocurrencia del terremoto.

Los resultados reportados en la Figura 27 son solo un ejemplo de los miles de simulaciones que se generan en un análisis de riesgo y resiliencia de una red eléctrica. Para hacer un análisis completo de riesgo y resiliencia de la red, es necesario repetir este análisis un gran número de veces (decenas de miles en rigor) generando distintas realizaciones de la amenaza y del daño de los componentes de la red. Cada escenario de sismo en este caso se genera de manera estocástica produciendo intensidades variables de movimiento bajo cada componente de la red. En función de esas intensidades, estimamos el daño de ese componente y su tiempo de recuperación. Una vez obtenido el conjunto de todos estos resultados (escenarios), para un análisis de riesgo estudiamos estadísticamente dichos resultados para determinar tasas medias anuales de excedencia por ejemplo de ciertos niveles de energía no suministrada, o les asociamos períodos de retorno a dichas tasas. Este proceso es el mismo que se utiliza para cualquier amenaza, salvo que cada amenaza puede producir un impacto distinto a cada una de las componentes de la red eléctrica.

Un análisis de riesgo y resiliencia permite responder preguntas complejas, como por ejemplo ¿Cuál es la probabilidad de que el servicio eléctrico entregue un cierto nivel de servicio predefinido luego de un terremoto severo en cierto territorio del país? ¿O cuál es la probabilidad que ante un futuro sismo el servicio eléctrico se recupere antes de cierto intervalo de tiempo?

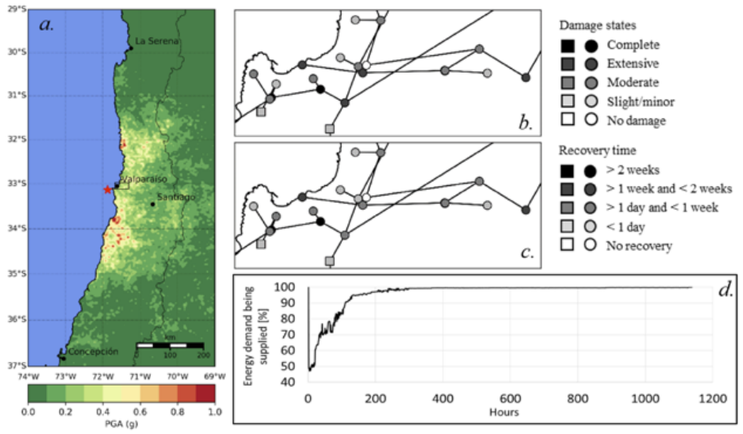


Figura 27: Resultado de una sola simulación de un solo escenario de terremoto de magnitud Mw8,5 (Ferrario et al., 2019): (a) mapa de PGA (la estrella roja indica el epicentro de terremoto y el rectángulo representa el zoom considerado en las Figuras 27b-c); (b) estado de daño estructural de los componentes de la red eléctrica; (c) tiempo de recuperación de los componentes de la red eléctrica; y (d) historia de la recuperación del servicio eléctrico como porcentaje de demanda suministrada.

RED DE AGUA POTABLE

El agua tiene usos diversos, -doméstico, público, comercial e industrial-, que son fundamentales para llevar a cabo las actividades productivas y de vida de una comunidad. Un sistema de agua moderno incluye instalaciones para recolección, almacenamiento, transporte, bombeo, tratamiento y distribución de aguas. Las obras para recolección y almacenamiento incluyen cuencas, presas, embalses de retención, pozos, galerías de infiltración y manantiales. Las obras de tratamiento incluyen aireación, revisión, sedimentación, floculación, filtración, desinfección, depuración y remoción de elementos dañinos. La distribución comprende embalses de distribución, tuberías, válvulas, hidrantes y otros elementos complementarios.

Generación

Los sistemas de agua potable son uno de los sistemas de infraestructura crítica dado que están a cargo de producir de manera permanente agua potable apta para el consumo humano y distribuirla de forma continua a los usuarios en cantidades suficientes para satisfacer sus necesidades. En sectores urbanos, estos sistemas típicamente se componen de una fuente de agua, plantas de tratamiento y almacenamiento de agua y una gran red de distribución, esta última compuesta principalmente por tuberías bajo tierra.

La Figura 28 corresponde a una representación esquemática de un sistema de abastecimiento de agua potable estándar, compuesta por estructuras de producción que incluye la captación del recurso desde la fuente y la planta de tratamiento de agua, y una parte de distribución, a cargo de hacer llegar el agua tratada a los consumidores finales.

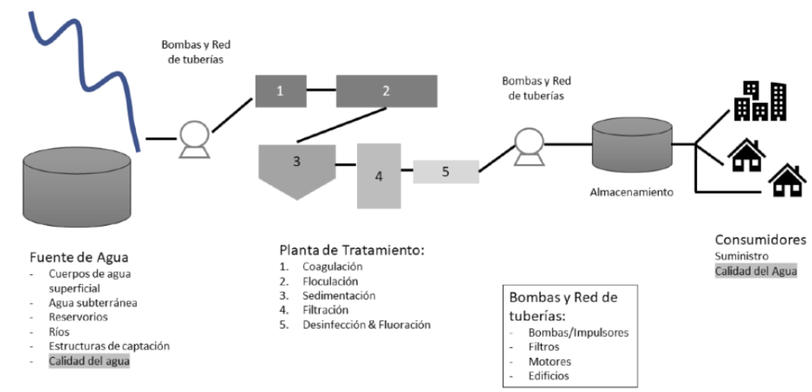


Figura 28: Representación de la infraestructura correspondiente a un sistema de abastecimiento de agua potable. Fuente: Quintana (2018)

A grandes rasgos, y según el esquema de la Figura 28, la operación de los sistemas de agua potable comienza con la captación del recurso desde la fuente (natural o artificial), la cual debe cumplir con ciertos estándares de calidad tal que el tratamiento logre potabilizarla. Le sigue el tratamiento del agua cruda para hacerla potable, entendiendo que esta agua "potable" cumple con los estándares de calidad de agua establecidos por la normativa definida para cada país. Los procesos físicos y químicos básicos para potabilizar el agua cruda incluyen: i) coagulación-floculación; ii) sedimentación; iii) filtración y; iv) desinfección (con posible fluoración). Finalmente, la distribución de agua apta para el consumo utilizando las redes de distribución, llevándola hasta los usuarios finales.

Análisis de riesgo de una red de distribución de agua potable

De todos los gastos que involucra la provisión y manejo de un sistema de agua para consumo humano, casi el 70% ocurre en la red de distribución, por lo que resulta esencial poder conocer su comportamiento bajo diferentes condiciones impuestas por amenazas extremas. Para Chile una de las condiciones más adversas para un sistema de agua son los terremotos y naturalmente los eventos climáticos, especialmente en la alta cordillera.

La construcción de un modelo de red comienza con la recolección de los datos topológicos, geográficos, geológicos y geotécnicos de la red, los datos geométricos y funcionales de cada uno de los componentes de esta red, y todas las variables que permitan llevar adelante un análisis hidráulico del sistema. Al igual que para todas las redes, es relevante conocer las condiciones de sitio en cada punto de la red para poder estimar la amenaza sísmica en ese punto y conocidas las propiedades de los componentes en ese punto, poder estimar el daño del componente de la red ubicado en ese punto.

En este documento se resume el trabajo realizado para la red de agua en la región de Valparaíso, donde el sistema de distribución es gestionado por la empresa ESVAL, que a su vez está regulada por la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SiSS). Toda la información empleada para la construcción de este modelo fue proporcionada por la SiSS.

Para la definición geométrica de la red, las tuberías están definidas por polilíneas como entidades geográficas de *shapefile*s en un sistema de información geográfica (SIG). Cada polilínea tiene atributos que incluyen su ubicación, y los niveles máximos y mínimos de la elevación de agua. En este caso, los valores máximos de elevación fueron empleados para el modelo descrito. La demanda de agua es proporcionada como mediciones mensuales obtenidas en los registros instalados a lo largo de toda la red; para la simulación estas demandas fueron adaptadas a valores diarios.

Comúnmente, los estanques de distribución están localizados en las zonas de mayor altitud, pero el sistema considera estaciones de bombeo para proporcionar presiones de agua adecuadas en cada sector de la red. En el desarrollo del modelo, la presión de bombeo fue transferida a los estanques de distribución sumando esta carga a la generada por la elevación natural del agua.

Una vez que la información entregada es corregida para ajustar aspectos de conectividad de todos los nodos y elementos de la red, es posible construir un modelo hidráulico en EPANET, que es un programa de modelación de sistemas de distribución de agua que fue desarrollado por la Agencia de Protección del Ambiente (EPA) de los Estados Unidos. Para el modelo, los *shapefiles* que contienen las tuberías y estanques se convierten en tuberías y embalses de EPANET, respectivamente. Aunque los estanques de distribución de agua son fuentes finitas de agua, para el propósito del análisis en estado de régimen y operación normal de la red se consideran como infinitos, es decir como embalses, dado que los eventos de interrupción del servicio por déficit de suministro de los estanques son raros. Las juntas son generadas en los vértices de las poli-líneas de tuberías y la demanda asignada a los nodos, basados en la proximidad existente a los medidores. La red fue construida como un modelo basado en demanda. Esto implica que la demanda es el flujo de salida, el que siempre es satisfecho en condiciones normales. La presión en la red se calcula con el programa EPANET de acuerdo al modelo de la red.

Los estándares del país estipulan que la presión normal de operación debe superar los 10 metros de columna de agua, pero ser menor a los 70 metros de columna de agua (INN 2015). Este criterio es empleado en el modelo para determinar si los nodos tienen un suministro adecuado. La Figura 29 muestra el resultado de las presiones en el sistema de agua potable bajo condiciones normales.

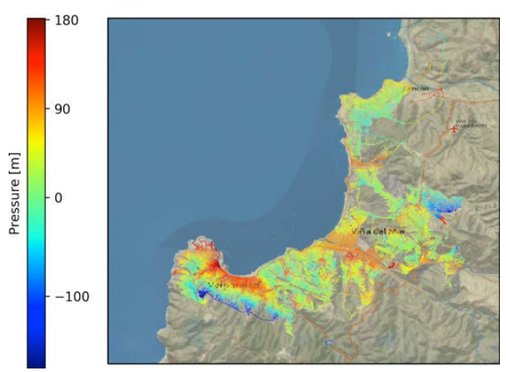


Figura 29: Distribución de presiones en la red de agua en condiciones normales

Para el análisis de riesgo se consideró un total de 100.000 escenarios sísmicos con sus correspondientes mapas de aceleración máxima de terreno (PGA). Las curvas de fragilidad utilizadas fueron las desarrolladas por Yoon et al. (2019). Tal como en cualquiera de las redes se utiliza una simulación de Monte Carlo para muestrear probabilísticamente el daño de cada componente de la red. Por simplicidad en el modelo, se considera que las componentes afectadas por daño pierden su funcionalidad de manera completa. Como un análisis de primera instancia, después de cada una de las simulaciones, el análisis hidráulico de la red dañada se utilizó para estimar la pérdida de conectividad de distintos nodos. Las presiones obtenidas del análisis se muestran esquemáticamente en la Figura 30 para algunos de los escenarios de daño seleccionados (cuyo número en el nombre indica el número de tuberías que fueron eliminadas del modelo).

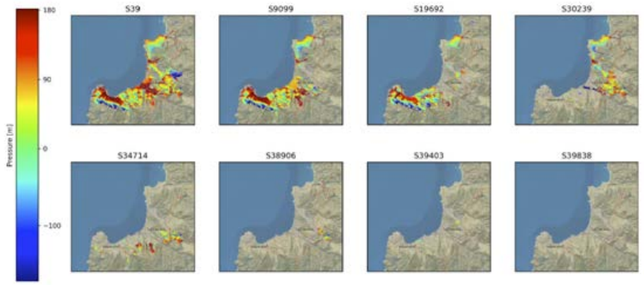


Figura 30: Distribución de presiones de redes dañadas en escenarios seleccionados; las componentes dañadas fueron eliminadas de la figura.

Para revisar el desempeño de las redes dañadas, se hizo una evaluación del índice de conectividad, definido como (Ref.):

$$\mathrm{SCL} = 1 - \frac{1}{|\mathcal{N}|}\sum_{i\in\mathcal{N}} \frac{N_S^i}{N_0^i} \qquad (15)$$

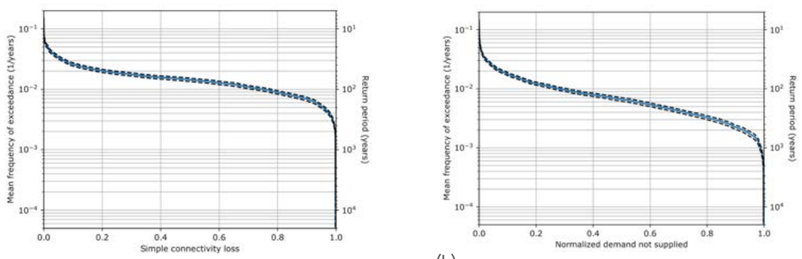
donde N es el set de nodos con demanda de agua; |N| es el número total de nodos con demanda de agua, y N_S^i y N_0^i son el número de fuentes (estanques de agua) conectados al nodo *i* en los escenarios con daño y sin daño, respectivamente. También se puede emplear el índice de demanda no suministrada:

$$\mathrm{DNS} = 1 - \frac{\sum_{i\in\mathcal{N}} s_i}{\sum_{i\in\mathcal{N}} d_i} \qquad (16)$$

donde s_i es el flujo de agua suministrado al nodo *i* después del sismo, y d_i es la demanda del nodo i.

Las curvas mostradas en la Figura 31 muestran las tasas de excedencia de ambos índices. La curva de SCL muestra que se espera una pérdida del 70% de conectividad en ventanas de 100 años, lo que puede interpretarse como un efecto no-lineal, es decir que la red sufre poco daño en diferentes eventos más frecuentes, pero es muy vulnerable a impactos puntuales que podrían afectar al sistema completo. La curva en la Figura 31 muestra que el periodo de retorno de eventos que producen una demanda no suministrada es de casi 20 años y el periodo de retorno de eventos que detienen por completo la distribución de agua es aproximadamente de 1.100 años. Esta curva decrece más rápidamente comparada con la de conectividad. Es importante notar que el índice SCL está asociado al número de estanques conectados a cada nodo y

que los estanques se asumieron con capacidad infinita. Este análisis sobrestima el parámetro DNS dado que sólo usa un estado de daño para representar la pérdida total de funcionalidad de un componente y no considera posibles estados intermedios de los componentes. Es de esperar que la pendiente de la curva mostrada se haga más horizontal si se cambian estos supuestos.



(a) (b)

Figura 31: Resultados de la tasa de excedencia anual: (a) índice de conectividad y (b) índice de demanda no suministrada.

RED DE TRANSPORTE

El efecto de eventos naturales en la infraestructura vial puede reflejarse de tres formas: (1) los activos pueden quedar totalmente destruidos y con ello se ve interrumpida la operación de la red y debe haber una reconstrucción estructural; (2) puede existir un grado de deterioro estructural que limite la operación parcialmente y por último, (3) puede haber una interrupción de la circulación sin existir daño estructural como puede ser por lodo o anegamiento (Bil et al., 2014). Un ejemplo de daño físico en la infraestructura vial se vivió en el terremoto de Loma Prieta el 17 de octubre de 1989 en el estado de California, Estados Unidos, que tuvo un grado 7,0 de magnitud de momento. De acuerdo a un informe entregado por el Departamento de Transporte del Estado de California (Caltrans, 1994), ese sismo produjo el colapso de 91 puentes.

Esta sección presenta un modelo para evaluar el riesgo en redes viales expuestas a amenazas de origen natural, es decir, la probabilidad de sufrir consecuencias en términos operativos producto de eventos de origen natural como sismos, eventos volcánicos, hidro-meteorológicos, entre otros. La evaluación del nivel de operatividad de la red o 'nivel de servicio' requiere de una mirada de múltiples áreas como la geología para la estimación de la amenaza, el transporte para la evaluación de los flujos de vehículos post evento natural, la ingeniería estructural para el análisis de la vulnerabilidad de la infraestructura, entre otros. Por esta razón, es necesario desarrollar un marco teórico para el cálculo del riesgo y analizar la interacción de cada uno de los elementos. La Figura 32 muestra el proceso integrado para el cálculo del riesgo para la red vial, donde son necesarios modelos de amenazas, características de la red vial, modelos de vulnerabilidad e información de demanda de tránsito para poder estimar las consecuencias operativas de un evento de origen natural.

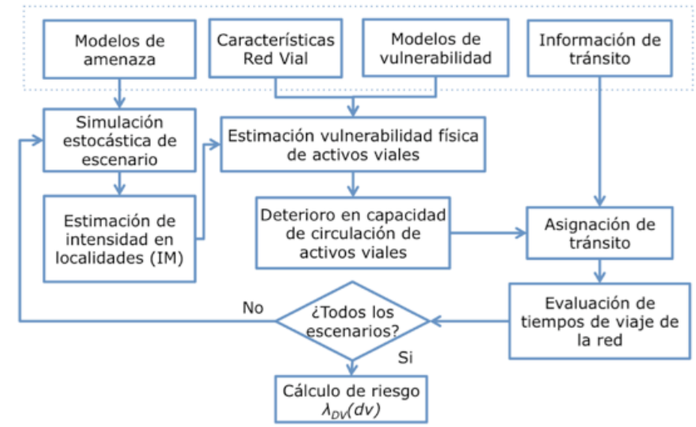


Figura 32: Marco conceptual para evaluación del riesgo y resiliencia de redes de transporte (Allen, 2019)

El marco está formado por tres partes principalmente: (1) datos de entrada; (2) procesos y (3) resultados. Los datos de entrada se relacionan principalmente a modelos que son requeridos para la evaluación del riesgo como el análisis de la amenaza en cuanto a su recurrencia y relaciones espaciales para determinar la amenaza en todas las localidades (IMi). Las características de la red corresponden a toda la información para poder caracterizar estructuralmente a cada uno de los activos viales. Por ejemplo, se detalla los atributos estructurales de los puentes para un posterior análisis de la vulnerabilidad de los mismos. Además de la información estructural, las características de la red vial incluyen la capacidad, tiempo de flujo libre y estándar de cada uno de los activos viales de la red seleccionada. Los modelos de vulnerabilidad son evaluados mediante curvas de fragilidad. Por último, la información del tráfico se refiere principalmente a matrices origen-destino en las zonas de interés para la evaluación.

El proceso para el cálculo del riesgo de la red vial comienza con la simulación estocástica de escenarios, considerando los modelos de recurrencia calibrados para la zona de estudio. La simulación estocástica indica tanto la intensidad de la amenaza como el epicentro del evento. El siguiente proceso consiste en la estimación de la intensidad de la amenaza en cada una de las zonas donde exista un activo vial vulnerable para luego estimar las probabilidades de daño mediante curvas de fragilidad calibradas para el tipo de infraestructura y el tipo de amenaza. Luego que se estima la probabilidad de daño de cada uno de los activos viales, se relaciona el estado de daño con una pérdida en la capacidad de circulación del activo vial producto de que hay una limitación para transitar por el camino o restricción de paso cuando se trata de vehículos pesados. Finalmente, dado que las capacidades de transitar por cada uno de los activos viales han disminuido, es necesario realizar una reasignación del tráfico considerando las matrices de origen- destino y medir la operatividad de la red en cuanto a tiempos de viaje entre dos puntos de interés. El proceso termina cuando todos los escenarios de la amenaza han sido evaluados y se puede evaluar el riesgo.

A modo de ejemplificar la metodología previamente descrita, se realiza un estudio sobre la red vial de la zona central de Chile. La red considerada para este ejemplo corresponde a la red interurbana de las regiones Metropolitana y de Valparaíso, para las rutas principales que conectan la región y principalmente que conectan Santiago con los puertos de San Antonio y Valparaíso como se observa en la Figura 33.

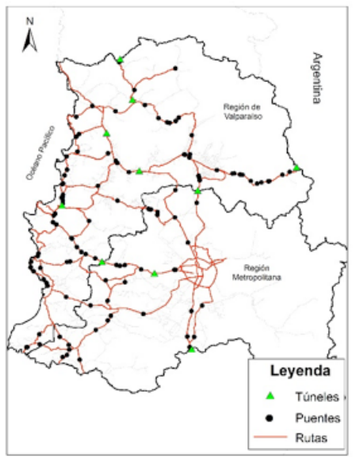


Figura 33: Red vial en la zona de Chile central (Allen, 2019)

Uno de los factores que determina la susceptibilidad de las redes frente a amenazas naturales que pueden interrumpir el normal flujo en los caminos es el nivel de redundancia que posean en términos de caminos independientes que unan los diferentes orígenes-destinos (Javanbarg, M & Takada, S, 2007). Para este caso, la ruta entre Santiago y San Antonio presenta solamente dos caminos que son totalmente independientes (sin arcos en común) que son principalmente por el acceso de la ruta directa (ruta 78) y la unión con la ruta a Valparaíso a la altura de la comuna de Casablanca (ruta 68). Por otro lado, la ruta que conecta Santiago con Valparaíso presenta tres caminos totalmente independientes y varios caminos que permiten reasignar flujo para llegar a destino, por lo que los efectos de los eventos naturales disminuyen y permite que no haya mayor aumento del tiempo de viaje entre los nodos de interés cuando existe un corte total o parcial de parte de la infraestructura vial.

RED DE SALUD DE EMERGENCIA

El sistema de salud chileno es un sistema mixto, compuestos por proveedores públicos y privados, además de sistemas cerrados que atienden a entidades específicas como las fuerzas armadas o ciertos grupos de trabajadores. El sistema público es gestionado por el Ministerio de Salud, y la provisión de atenciones de salud se realiza a través del Sistema Nacional de Servicios de Salud (SNSS), que comprende 29 servicios distribuidos territorialmente a lo largo de todo Chile. Cada servicio cuenta con una red de establecimientos hospitalarios de diversa complejidad, establecimientos de atención primaria y secundaria, y consultorios de atención primaria (MINSAL 2011).

En particular, la red de atención primaria de urgencia está compuesta por los departamentos de Urgencias Hospitalarias, los Servicios de Atención Primaria de Urgencia (SAPU), y los Servicios de Urgencia de Alta Resolución (SAR).

En la etapa posterior a un gran evento natural como puede ser un terremoto, es vital que los sistemas de salud de emergencia mantengan su funcionalidad de manera de proveer atención rápida y adecuada a personas lesionadas a causa del evento, y a la vez mantener además los niveles usuales de atención para evitar que pacientes afectados por diversas patologías crónicas, o agudas, se descompensen o agraven por falta de tratamiento oportuno. Esto es posible en la medida el sistema de salud sea ***resiliente***, es decir, que tenga la capacidad de absorber de manera adecuada el impacto del evento extremo y recuperarse de manera rápida con la menor pérdida de funcionalidad posible. Dicho en términos simples que tenga una probabilidad reducida de sufrir un impacto significativo en su funcionalidad a causa del evento de forma de acomodar sus necesidades operacionales convencionales además del aumento de demanda que se origina debido a la ocurrencia de un desastre.

La resiliencia de hospitales o redes hospitalarias se define entonces en términos de la funcionalidad del sistema. A diferencia de otras redes, donde la funcionalidad puede caracterizarse mediante variables fácilmente cuantificables (kilowatts de energía, m3 de agua, etc.), para redes de salud no existe una única medida de funcionalidad (Cimellaro et al. 2010). Una de las métricas ampliamente usadas en la literatura es el tiempo de espera promedio de un paciente antes de ser atendido en condición de emergencia (t_{wait}) normalizado con respecto al tiempo de espera en condición de operación normal (e.g. Rhodes 2006, Mc Carthy et al. 2000). A mayor tiempo de espera, aumenta el atochamiento de los departamentos de Urgencias y decae por lo tanto la calidad del servicio entregado por el sistema (Vieth & Rhodes 2006).

Para realizar una evaluación probabilística de la pérdida de funcionalidad de la red de atención de urgencia ante una amenaza sísmica, se puede plantear una metodología en base a seis etapas: (1) la generación de los escenarios sísmicos; (2) la construcción del modelo de exposición físico y social de la región atendida por la red hospitalaria; (3) el modelo físico y funcional de la red de atención de urgencia; (5) la evaluación de daño físico y social en la región de estudio; (5) la evaluación de los daños y pérdida de funcionalidad en los distintos centros de salud; y (6) la evaluación del riesgo sísmico en la red de salud. El esquema de esta metodología se muestra en la Figura 34.

Figura 34: Esquema evaluación riesgo es sistema de urgencia

Al igual que para todos los casos anteriores, la evaluación del riesgo se hace de manera estocástica y considera todos los posibles escenarios sísmicos generados en base a las leyes que caracterizan a la amenaza en magnitud, distancia y recurrencia temporal. Las simulaciones que se describen a continuación

se repiten para el conjunto de escenarios seleccionados de manera de representar correctamente de manera estadística la amenaza en la zona de estudio.

Por diseño, una red de salud atiende a una determinada región geográfica y a su respectiva población, la que en condiciones normales de operación genera una demanda de atenciones de urgencia que varía en el tiempo de acuerdo a factores demográficos, epidemiológicos y estacionales. Por lo tanto, un análisis de riesgo requiere de un **modelo de exposición físico y social**, que consiste en un inventario georreferenciado de todos los activos físicos en la región de estudio, incluyendo la caracterización de los principales parámetros que determinan su fragilidad frente a la amenaza, y un catastro de la población que habita esa zona y utiliza dichos activos.

Además de la construcción de un modelo de exposición física y social, es necesario construir también un modelo detallado **físico y funcional** de cada uno de estos activos (o nodos) que componen la red de salud de emergencia, incluyendo sus propiedades estructurales y no estructurales, su dependencia de insumos básicos como agua y electricidad, la cadena completa de otros suministros operativos, su capacidad de atención y prestaciones ofrecidas, el equipamiento disponible, y los protocolos de operación de cada unidad dentro de la red. Para efectos de la red completa, es imprescindible conocer y modelar en detalle el modo de operación de las distintas instalaciones de salud, lo que se traduce principalmente en protocolos de traslados de pacientes a unidades críticas y derivaciones de una unidad a otra cuando se requieren tratamientos más complejos, o bien no existe capacidad en una unidad de la red.

Ante la ocurrencia de un gran desastre a causa de un terremoto, las edificaciones e infraestructura de la región tienen una cierta probabilidad de sufrir daños físicos desde leves a totales, lo que puede causar lesiones de distinta severidad en los habitantes, generando una demanda adicional sobre los centros de salud y el sistema de emergencia en general. Para estimar esta sobredemanda, se realiza una **evaluación de los daños físicos y sociales en la región de estudio** de acuerdo a un análisis macro de la ciudad utilizando plataformas computacionales ampliamente reconocidas como Hazus u OpenQuake. El resultado de esta etapa permite conocer el crecimiento en la tasa de arribo de personas afectadas por el terremoto en cada uno de los centros de salud, y para los distintos niveles de severidad de las lesiones. Dependiendo de las patologías consideradas cada paciente tiene tasas de sobrevivencia han sido ampliamente documentadas en la literatura (Ref.)

Por su parte, las instalaciones de salud también pueden verse afectadas por el efecto del sismo, por lo que se requiere una **evaluación individual del daño y pérdida de funcionalidad de cada centro de atención de urgencia que compone la red**. Los daños pueden ser estructurales o no estructurales, estos último afectando potencialmente a los suministros básicos como agua y electricidad (unidades generadoras de respaldo y otras), lo que puede resultar en una pérdida de funcionalidad parcial o total de la unidad. La evaluación de los daños físicos se realiza de acuerdo a la metodología de riesgo planteada en la Sección 2 de este informe, y los resultados son el insumo para estimar el nivel de desempeño post-evento y el tiempo de recuperación de cada nodo de la red. Para ello se plantea un modelo simplificado de las unidades de urgencia, sobre los que se aplican árboles de decisión, o de falla, para estimar la probabilidad de pérdida de funcionalidad de ciertos espacios críticos, por ejemplo, boxes de urgencia, pabellones, todo en función del nivel de daño de elementos estructurales primarios o secundarios tales como cielos falsos, tabiquerías, y contenidos, entre ellos, el equipamiento médico (Favier et al. 2019). La Figura 35 muestra un ejemplo de las funciones de pérdida consideradas para cielos falsos.

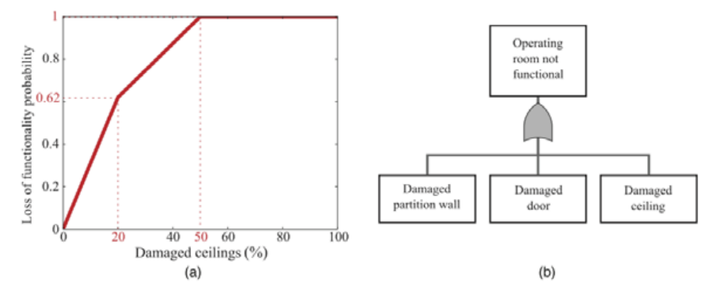


Figura 35: Pérdida de funcionalidad como resultado del daño en cielos falsos

La etapa final corresponde a la evaluación del riesgo y la resiliencia sísmica de la red completa de salud de urgencia. Este cálculo integra los resultados de todas las etapas anteriores en el marco probabilístico anteriormente descrito, pero adiciona el desarrollo de un modelo dinámico de la red capaz de simular la asignación óptima de recursos (lógica de derivación de pacientes) a medida que se producen atochamientos en distintos nodos debido a un exceso de demanda de atención y/o pérdida de funcionalidad a consecuencia del evento sísmico. En el caso de un escenario sísmico, se determina la distribución de víctimas por nivel de severidad y la demanda esperada sobre cada centro de atención, la que se sobrepone a la demanda de base correspondiente en el momento de ocurrencia del evento. El modelo dinámico considera el nivel esperado de funcionalidad de cada unidad junto a su tasa de recuperación en el tiempo. Si la capacidad de un determinado nodo de la red se ve superada, la demanda de pacientes es traspasada a otros nodos de la red con capacidad disponible, de acuerdo a los protocolos de derivación de pacientes existentes en la red de salud. De esta manera, el nivel de desempeño del *sistema* puede ser evaluado por ejemplo en términos del tiempo de espera máximo de un paciente, o bien los tiempos adicionales acumulados a través de todos los nodos la red. Esta cantidad evoluciona en el tiempo desde la ocurrencia del terremoto hasta alcanzar un nuevo estado de régimen cuando el sistema recupera su funcionalidad. La simulación se repite para cada uno de los escenarios del terremoto, obteniendo así distribuciones probabilísticas sobre los tiempos adicionales acumulados de espera, los que se relacionan directamente con los tiempos de sobrevivencia de las personas afectadas. En resumen, la evaluación del riesgo sísmico de la red de salud de urgencia entrega las tasas anuales promedio de excedencia de ciertos niveles de horas adicionales de espera a causa del desastre.

SECCIÓN 5:
RESILIENCIA EN EL 27 F, 2010

EL TERREMOTO DEL 27-F Y SUS CONSECUENCIAS

El 27 de febrero de 2010, un terremoto que alcanzó una magnitud de momento[10] MW 8,8 azotó la zona centro-sur del país a las 3:34 de la madrugada, hora local. El evento resultó ser, a la fecha de hoy, el sexto terremoto más grande registrado en el mundo, y desencadenó un tsunami que, en conjunto con el sismo, son una de las catástrofes más importantes en la historia de Chile, afectando a más de 12 millones de personas (75% de la población del país) a lo largo de aproximadamente 1.000 km de territorio. El terremoto del 27-F se originó en la zona de subducción entre las placas continentales de Nazca por debajo de la Sudamericana, las que convergen a una tasa aproximada de 68 mm cada año, a una distancia aproximada de 150 km de la costa chilena (Ruegg et al. 2009). El evento movilizó una sección de la placa de Nazca de aproximadamente 540 x 200 km2 (ver Figura 36), produciendo aceleraciones que superaron la aceleración de gravedad (g) en Concepción y Constitución, y superaron 80% de g en Santiago, a cientos de kilómetros del epicentro[11] (USGS 2019). Adicionalmente, el terremoto gatilló un tsunami que azotó cerca de 600 km del borde costero del país con devastadoras consecuencias en ciudades y localidades costeras como Talcahuano, Constitución, Iloca, Dichato, Pichilemu, y Cartagena, y en el territorio insular chileno, como el Archipiélago de Juan Fernández y la Isla Mocha.

El acelerado desarrollo y urbanización de la zona central chilena en las últimas décadas llevó a que una gran cantidad de personas, edificios, e infraestructura crítica estuviera expuesta al terremoto y tsunami del 27-F. Las muertes asociadas al desastre de 2010 ascienden a 575 personas, de las cuales distintos reportes cifran entre 124 y 181 las vidas perdidas producto del tsunami gatillado por el movimiento sísmico (Contreras and Winckler, 2013; Sehnbruch, 2017). Por otro lado, las consecuencias más importantes en la infraestructura del país fueron evidentes en las tres áreas metropolitanas de Chile, el Gran Concepción, el Gran Santiago, y el Gran Valparaíso. Las pérdidas asociadas al evento fueron estimadas en $30 billones de dólares, equivalentes el 18% del Producto Interno Bruto del país en 2010. Los sectores económicos más fuertemente afectados fueron la industria, pesca, turismo, y educación, además de la infraestructura residencial. Del total de pérdidas, sólo alrededor de un cuarto estaban aseguradas ($8 billones de USD), de las cuales sólo $11 millones de USD corresponde a cobertura de compañías de seguros locales (SVS, 2012). Sin embargo, es importante considerar que la hora y época del año en que ocurrió el evento—la madrugada de un sábado al final de las vacaciones de verano—son factores que sin duda redujeron los impactos del desastre en la población y la infraestructura.

La Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI) fue la encargada de liderar y coordinar la respuesta a la emergencia activando el Sistema Nacional de Protección Civil (SNPC). El sistema integra distintas organizaciones, servicios e instituciones de los sectores públicos y privados, además de líderes locales y voluntarios. La organización del SNPC se realiza territorialmente a distintas escalas, siendo el líder nacional el Presidente de la República, siguiendo en la cadena de comando el Ministro del Interior y Seguridad Pública, los intendentes regionales, los gobernadores provinciales, y los alcaldes comunales. El SNPC se organiza a través de Comités de Operaciones de Emergencia (COE), que se replican en las distintas escalas territoriales y administrativas. En caso de catástrofes de magnitud como el evento del 27-F, los COE se autoconvocan en instalaciones predefinidas y coordinan la respuesta a la emergencia, incluyendo la centralización de recolección de datos, las comunicaciones hacia los distintos niveles político-administrativos, la evaluación de daños e impactos del evento, y los procesos de recuperación a escala local.

10 La magnitud de momento es una medida en una escala sismológica que permite evaluar un terremoto en función de la energía total liberada por el movimiento.

11 En ingeniería sísmica es tradicional expresar la aceleración que experimenta el suelo (y las estructuras) como una proporción de la aceleración de gravedad, g = 9,81 m/s2. A modo de referencia, la norma NCh433 para el diseño sísmico de estructuras considera una aceleración efectiva Ao en el rango de 20 a 40% de g, dependiendo de la zona sísmica.

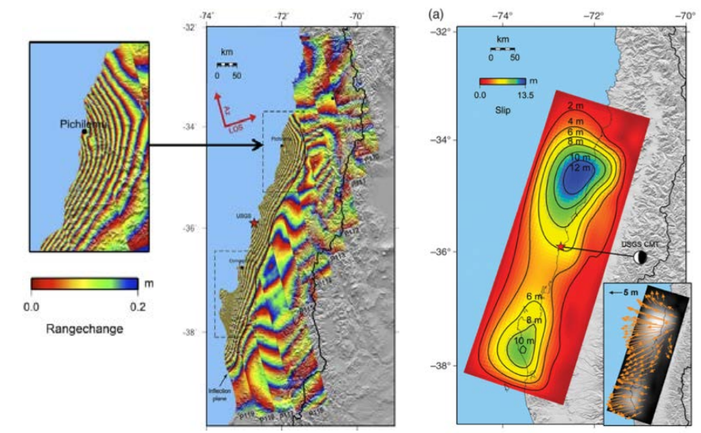


Figura 36: Panel izquierdo: Interferometría realizada para el terremoto de Maule del 27 de febrero de 2010 (Fortuño et al., 2013). La Figura de la derecha muestra franjas que pasan de color rojo a color azul, en que cada franja representa 20 cm de desplazamiento de la corteza en dirección del satélite. La discontinuidad que se observa en las franjas con pérdida de coherencia representa el plano de inflexión asociado al valle central del país. La escala geométrica indicada de 50km permite medir toda la zona mayormente afectada por la deformación generada por el sismo en la corteza. El recuadro de la izquierda muestra la zona de Pichilemu en que se observa claramente una anomalía en el interferograma asociada probablemente a una falla cortical que pasa por la zona. Panel derecho: Modelo de deslizamiento del terremoto de Maule del 27 de febrero de 2010. Se identifica la zona de subducción entre las placas continentales, la sección de la placa de Nazca que se movilizó con el evento, y el epicentro del terremoto (Fortuño et al. 2014).

DESEMPEÑO DE LA EDIFICACIÓN

El terremoto afectó el territorio comprendido entre las regiones de Valparaíso y La Araucanía, donde reside el 75% de la población del país. Los reportes del gobierno central cifraron en 370.051 las viviendas dañadas, de las cuales 22% colapsaron, 29% presentó daños mayores, y 49% daños menores (Gobierno de Chile, 2010). Del total afectado, 37% correspondió a construcción en adobe, 9% a viviendas en el borde costero, 19% a vivienda social, y 35% a vivienda privada. En el caso de edificios habitacionales con departamentos, 46 edificios de hormigón armado (HA) de 9 pisos o más sufrieron daño severo durante el terremoto, lo que representa menos del 3% del inventario estimado de 1.939 edificios de HA de dicha altura construidos al momento del terremoto en las ciudades más densas del país—Santiago, Viña del Mar, y Concepción (Massone et al. 2012). A marzo de 2020, reportes del MINVU indican que la reconstrucción post 27-F aún no ha finalizado completamente, habiendo 151 subsidios habitacionales en ejecución, que corresponden a un 0,07% del total (MINVU 2020).

Durante la fase de emergencia post desastre, uno de los principales problemas fue el proceso de recolección de información para el catastro de daños en vivienda y edificación. Ante la ausencia de protocolos y metodologías preestablecidas, además de una institución coordinadora de los esfuerzos para realizar dicha tarea, este proceso fue realizado en paralelo por diversos actores, tanto voluntarios como funcionarios del sector público y privado. Debido a la complejidad técnica involucrada, el catastro y evaluación de daños difirió para el caso de casas y edificios.

Es importante señalar que, dado el marco legal vigente, la Dirección de Obras Municipales (DOM) es la única entidad con la potestad de firmar un decreto de inhabitabilidad de una vivienda. Si bien esto implicó que el proceso de evaluación de daños tuviera que ejecutarse de manera descentralizada y con participación de los gobiernos locales, también trajo ciertas complejidades. Por ejemplo, dada la premura no se usaron criterios consistentes y uniformes para la inspección de las viviendas en los distintos municipios. Por otro lado, la limitada capacidad técnica en los distintos municipios, la gran cantidad de edificaciones afectadas por el evento, y la presión de realizar el catastro de daños rápido, llevaron a que en muchos casos se condenara estructuras a demolición siendo posible la reparación y reforzamiento estructural mediante técnicas convencionales. Adicionalmente, el sistema de financiamiento para la emergencia y reconstrucción muchas veces produjo incentivos financieros perversos; de este modo, en ocasiones era para un municipio más conveniente declarar ciertas viviendas como inhabitables y así recibir mayor financiamiento externo que les permitiera en parte resolver el déficit habitacional que arrastraban desde antes del 27-F.

VIVIENDAS UNIFAMILIARES (Casas)

Diversas organizaciones participaron en la evaluación de daño en las casas a causa del terremoto. La falta de coordinación de este esfuerzo y consolidación de una base de datos con toda la información recolectada implicó el uso de los más diversos instrumentos y criterios para la evaluación de daños, que presentaron inconsistencias técnicas, ausencia de mecanismos de priorización e implementación de soluciones para la recuperación y reconstrucción, y un traspaso desordenado, confuso, y a veces contradictorio de información a distintas autoridades y a la población.

Desde el estado, las responsabilidades fueron asumidas por el MINVU y los municipios de los territorios afectados por el desastre. Para el MINVU, la primera tarea consistió en armar un catastro de viviendas y personas afectadas junto con sus necesidades inmediatas. Este proceso fue apoyado por los Comités de Operaciones de Emergencia (COE) locales, activados según el protocolo del SNPC. El proceso de recolección de información fue completamente descentralizado, con gran participación de los municipios en equipos que combinaron personal técnico (p.ej., de las direcciones de obras o asesoría urbana) y asistentes sociales. Sin embargo, la dependencia en las capacidades técnicas, humanas, y económicas de los municipios involucrados, a veces muy limitadas, generó incertidumbre respecto de la precisión y del tiempo necesario para producir un catastro nacional exhaustivo de los daños producidos por el terremoto y tsunami, de los sobrevivientes, y de la población desplazada.

La información respecto al número de viviendas de emergencia requeridas en cada comuna fue enviada por el municipio a los COE y oficinas regionales de ONEMI. Esto involucró a los gobiernos locales en los planes de recuperación y reconstrucción en una primera instancia, y acercó los municipios a la población de su comuna (Comerio, 2013). Sin embargo, este formato descentralizado no fue mantenido en las etapas de reconstrucción de largo plazo lo que generó una desconexión con la escala territorial.

La reconstrucción de largo plazo fue encabezada por el MINVU, dividiéndola en tres escalas espaciales: viviendas, barrios, y ciudad-territorio (MINVU 2013). El enfoque del MINVU fue otorgar subsidios con la intención de que la mayoría de las familias pudiera reconstruir en el mismo sitio que habitaban previo al desastre, con resultados disímiles a lo largo del país en parte debido al alza de los precios del suelo urbano y la capacidad e interés de los privados de proveer soluciones habitacionales adecuadas en zonas rurales y en ciudades pequeñas. Para asignar los subsidios, el MINVU interactuó directamente con la ficha de protección social del Ministerio de Planificación (ex MIDEPLAN, renombrado Ministerio de Desarrollo Social en agosto de 2011), y la información disponible en el Servicio de Impuestos Internos y el Registro Civil. Los subsidios fueron asignados por grupo familiar previa presentación del certificado de inhabitabilidad de su vivienda, emitido por la DOM correspondiente. El MINVU implementó un sistema de seguimiento de los proyectos de reconstrucción de vivienda social, de modo de transparentar y facilitar el traspaso de información a la población.

La gran crítica constructiva que merece el proceso de reconstrucción post 27-F es que la apuesta del MINVU fue utilizar los instrumentos y procedimientos institucionales tradicionales para enfrentar la extraordinaria situación generada por el terremoto y tsunami del 27-F. Este enfoque probó ser inapropiado, complicado, e inefectivo, debido a que dichos instrumentos, diseñados para abordar problemáticas de vivienda en tiempos "normales", son incapaces de considerar las nuevas condiciones de vulnerabilidad social y necesidades de vivienda causada por el desastre (Sehnbruch et al., 2017). El MINVU abordó la reconstrucción mediante la entrega de subsidios habitacionales a la población, los que podían ser usados para adquirir eventualmente alguna de las soluciones propuestas por el sector privado. Sin embargo, este enfoque asumió, erróneamente, una voluntad y capacidad del mercado de responder a una demanda extraordinaria, urgente, y diversa (Cociña Varas and Boano, 2013).

EDIFICIOS RESIDENCIALES

El daño observado luego del terremoto en los edificios residenciales estructurados en base a muros de corte de hormigón armado fue sorpresivo, especialmente dado el impecable desempeño que dichos edificios presentaron en el terremoto de Algarrobo del 3 de marzo de 1985. Además del emblemático colapso del edificio Alto Río en la ciudad de Concepción, causante de la muerte de 8 personas, al menos otros 46 edificios de hormigón armado sufrieron similares patrones de daño frágil en las ciudades de Santiago, Viña del Mar, Curicó, Talca, Chillán, Concepción, y sus alrededores. Debido a la condición de inestabilidad en la que quedaron luego del terremoto, algunos de estos edificios tuvieron que ser rápidamente estabilizados de modo de evitar su colapso, protegiendo a los peatones, y permitiendo una posterior evaluación detallada de los daños producidos por el sismo. Se estima que estos 46 edificios representan alrededor del 2% al 3% del total de edificios de muros de 9 pisos o más existentes para el 27-F (Jünemann et al., 2015).

A diferencia de lo observado en la evaluación de daños en el caso de viviendas unifamiliares, los edificios fueron evaluados de manera detallada principalmente por especialistas, quienes en muchos casos fueron los mismos ingenieros involucrados en el diseño del edificio. Esta práctica de autoinspección es bastante única y típica de nuestro país, y se debe a la alta frecuencia con la que experimentamos terremotos destructivos, encontrándose aún activos para evaluar en terreno el desempeño sísmico de estos edificios, los profesionales que los diseñaron. Obedeciendo a la iniciativa propia, la información recopilada no fue consolidada por alguna institución en una base de datos común. Cuando se observó daño importante, al menos dos estudios detallados independientes fueron solicitados tanto por las empresas constructoras o los dueños, o por la respectiva administración municipal.

Finalizada la emergencia, distintos estudios e investigaciones estadísticas, analíticas, y experimentales se realizaron con el objeto de mejorar la comprensión del desempeño sísmico de los edificios altos del país en aquellos casos en que hubo daños severos. Las observaciones en terreno, además de la investigación gatillada luego de las observaciones de daño causados por el terremoto el 27-F, condujeron a la rápida modificación de los códigos de diseño sísmico de estructuras (NCh 433) y de diseño de estructuras de hormigón armado (NCh 430) mediante los decretos supremos DS 118 y 117, respectivamente, a fines

de 2010, los que luego fueron reemplazados por nuevas versiones actualizadas mediante los decretos supremos DS 61 y DS 60 de noviembre de 2011. A la fecha, estos decretos acompañan a las normas NCh 433 y NCh 430 para guiar el diseño de estructuras en Chile.

Los resultados de estas investigaciones y estudios concluyeron que el comportamiento de la mayoría de estos edificios fue particularmente frágil producto de que los muros de HA fueron sometidos a altas tensiones axiales por el efecto dinámico del sismo y a la falta de enfierraduras de corte y confinamiento en las cabezas de estos muros. La importante redundancia de muros en la planta de estos edificios contribuyó sin duda a evitar su colapso, gracias especialmente a los muros longitudinales que habitualmente corren a lo largo del pasillo central de estos edificios de vivienda. Mirado desde una perspectiva macro, el resultado para los edificios de vivienda fue favorable; sin embargo, el daño observado en alguno de ellos reveló una falencia grave en las normativas locales y mundiales en el tema. El resultado de la incorporación de los DS 60 y 61 es que los edificios actualmente son diseñados en un estándar superior al que tenían previo al 2010. Ello conlleva una mejor respuesta y, finalmente, mayor resiliencia para este importante grupo de estructuras a nivel nacional.

DESEMPEÑO DE LÍNEAS VITALES: ELÉCTRICO, TRANSPORTE, AGUA POTABLE Y SALUD

El funcionamiento de las líneas vitales y el suministro de servicios críticos fueron bruscamente interrumpidos como consecuencia del terremoto del 27-F (de la Llera et al., 2017). Servicios públicos y privados fueron afectados a lo largo del territorio en un colapso generalizado que afectó, entre otros, la conectividad vial, la disponibilidad de atención de salud, la distribución de energía, el acceso a agua potable urbana y rural, las telecomunicaciones, y la telefonía. La Figura 37 muestra gráficamente la recuperación que experimentaron los servicios de distintas líneas vitales (servicios críticos) en la región del Biobío durante la primera quincena después del terremoto.

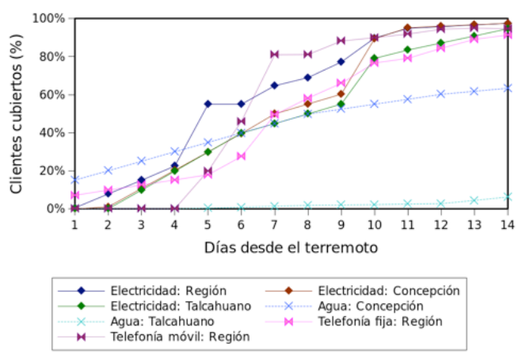


Figura 37: Ejemplo de las funciones de recuperación de los servicios de electricidad, telefonía y agua en las ciudades de Talcahuano, Concepción, y la región del Biobío.

La evaluación y recuperación de la infraestructura pública del país fue liderada por el Ministerio de Obras Públicas. El catastro final del MOP identificó 1.701 puntos dañados en las redes, de los cuales 748 estaban asociados a problemas en la red de agua potable rural (APR), 717 a la red vial nacional, 54 a defensas de ríos, y 21 a colectores de aguas lluvia (Almonacid, 2012).

El daño a la red vial constituyó un caso sensible debido a que, además de los daños en la infraestructura, implicó que varios pueblos y localidades rurales quedaran desconectadas del resto del país, dificultando las labores de restitución de servicios y el acceso de ayuda humanitaria externa. Por esto, la prioridad del MOP fue puesta en restablecer la conectividad. Profesionales de la Dirección Nacional de Vialidad fueron enviados a las regiones más afectadas a evaluar los daños y la operatividad de cada ruta, junto con la facultad de cerrar caminos, instalar *bandereros*, limitar el peso del tránsito, o solicitar la instalación de puentes mecano temporales.

Una de las fallas observadas del sistema más comunes, tuvo relación con la importancia de los detalles estructurales en puentes y la forma en que éstos podían condicionar la resiliencia de la red vial completa. La conectividad, tanto en las carreteras urbanas de Santiago como a lo largo de la Ruta 5 Sur fue interrumpida por reiteradas fallas en los puentes, pasos inferiores y superiores, además de la caída de pasarelas peatonales sobre las autopistas (Toro et al., 2014). A partir de mediados de los años 90, la concesión de la infraestructura vial en Chile modificó el diseño histórico de puentes. El cambio consistió en reemplazar el diseño tradicional, que consideraba una losa de hormigón armado (HA) montada sobre vigas simplemente apoyadas de hormigón pretensado, pero que se unían mediante un diafragma transversal. Adicionalmente, los puentes contaban con topes laterales de concreto que restringían el desplazamiento transversal de la superestructura y existían barras sísmicas para controlar el movimiento vertical de las vigas (Figura 38a). Tanto el diafragma, como las barras sísmicas y los topes fueron eliminados por la mayoría de los nuevos diseños. Esta eliminación causó gran parte de los daños observados tras el 27-F (Figura 38).

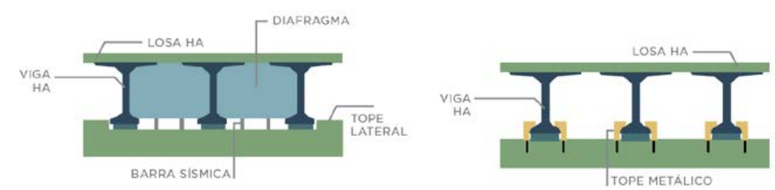


Figura 38: Diagrama esquemático de la sección transversal de un puente: (a) previa al desarrollo de proyectos concesionados; y (b) solución clásica de los puentes concesionados. La solución de diseño en (b) elimina las barras sísmicas, lo topes laterales, y el diafragma de HA.

Por otro lado, el suministro de electricidad fue fuertemente afectado por el terremoto, que golpeó la zona cubierta por el Sistema Interconectado Central de Chile (SIC), responsable de proveer electricidad a más del 90% de la población del país. El SIC sufrió daños en sus componentes de generación, transmisión y distribución, por lo que resultó en un apagón que retiró de la red aproximadamente 4.522 MW de su capacidad de generación, un 74% de su demanda máxima y de los cuales un 15% correspondió a una planta de energía que tuvo que cerrar para ejecutar reparaciones mayores.

El terremoto también afectó varias partes del sistema de transmisión de energía, incluidos daños a 12 de las 46 subestaciones de transmisión (26%) y a 1,6 km de los 7.280 km de líneas de transmisión (0,02%). A pesar del daño, la red fue capaz de operar y restablecer el suministro unas pocas horas después del sismo. Las principales consecuencias del terremoto fueron más que nada en graves daños a la red de distribución, donde las reparaciones tomaron varios días y, en algunos casos, semanas en completarse. En general, el

sistema de energía eléctrica respondió como era esperado y se restableció el servicio a la mayoría de los clientes dentro de 48 horas (ver Figura 39).

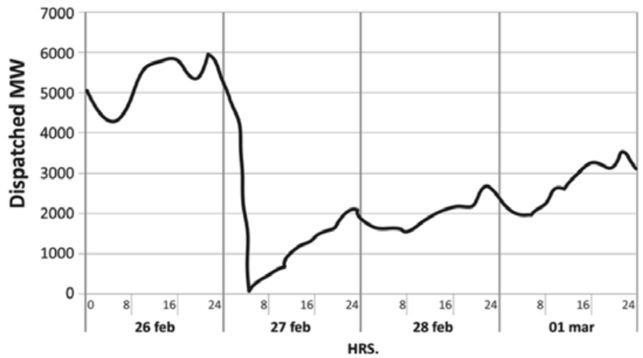


Figura 39: Situación de Potencia despachada durante los días en torno al 27-F (reproducida de de la Llera et al., 2017).

Una de las primeras consecuencias de la pérdida de energía eléctrica post 27-F fue el colapso de la mayor parte de los medios de comunicación (radio y televisión). Los sistemas de telecomunicaciones sufrieron una pérdida prácticamente total de funcionalidad, pese a que solo una cantidad menor de torres sufrió daño estructural. La gran cantidad de llamadas personales durante la emergencia provocó el colapso de la red de telefonía móvil y una severa congestión de la red de telefonía fija poco después del terremoto, lo que resultó en una baja en el grado de servicio y en muy pocos éxitos entre los intentos de llamada. La falla de energía eléctrica afectó el funcionamiento de algunas partes vitales de la red de telefonía móvil, incluyendo las estaciones base transceptoras (BTS, por su sigla en inglés). De todas las BTS que fallaron después del terremoto, solo el 2% fueron dañadas por el terremoto, mientras que el 34% falló a menos de 20 minutos de la falla de energía eléctrica, principalmente porque los sistemas de respaldo de energía no funcionaron. El 64% restante duró entre 2 y 8 horas antes de colapsar. Antenas desalineadas, baterías sueltas, caídas en la distribución eléctrica y congestión fueron problemas comunes en los sistemas de telecomunicaciones. La mayoría de los sistemas de comunicación celular recobraron funcionalidad recién dos días después del terremoto. El 27-F también puso en evidencia la fragilidad del sistema de comunicaciones de emergencia, que colapsó principalmente por su dependencia de servicios públicos que colapsaron por la falta de energía, o por la congestión.

En un entorno de post desastre, la red de salud desempeña un papel clave en el manejo de la emergencia al proveer asistencia médica y psicológica. El 27-F afectó a 130 hospitales públicos, de los cuales 4 quedaron inutilizados, 12 tuvieron pérdidas de funcionalidad mayor a un 75%, y 62% requirió reparaciones o reemplazo, por lo que disminuyeron un 18% las camas disponibles en el país hasta un mes después del terremoto. Un estudio evaluó integralmente el desempeño de la infraestructura de salud en la provincia del Biobío, incluyendo a los 7 hospitales públicos de la zona y considerando daños estructurales y no estructurales en la infraestructura, además del daño en los sistemas mecánicos, eléctricos, e instalaciones (Mitrani-Reiser et al., 2012). El daño no estructural (caída de cielos falsos, colapso de tabiquerías, caída de equipos, daño en elevadores) fue generalizado y se observó en casi todos los hospitales. Hubo serios problemas con los servicios vitales, ya que todos los hospitales perdieron el suministro de electricidad por varios días, y cinco de los siete perdieron el suministro de agua potable, lo que mostró gran fragilidad y baja capacidad de sus sistemas de emergencia. Esto fue más crítico aún en el caso de los sistemas de telecomunicaciones, que no contaban con redundancia y sufrieron el colapso generalizado de dichas redes en toda la zona afectada por el terremoto, y perjudicaron la coordinación y solicitud de ayuda hacia instituciones externas (Mitrani-Reiser et al., 2012). Observaciones similares fueron realizadas en la red de salud de las regiones de Tarapacá y Coquimbo luego de los terremotos de 2014 y 2015, respectivamente (Favier et al., 2017; Vásquez et al., 2017).

El sistema de agua potable es esencial para mantener las actividades básicas y es uno de los primeros servicios que debe funcionar durante el proceso de recuperación después de un desastre. Después del sismo del 27-F, 114 sistemas urbanos y 730 sistemas rurales sufrieron daño a nivel nacional. Las regiones de Maule y Biobío, con cuatro millones de usuarios atendidos por dos compañías privadas, fueron las más afectadas. El daño fue causado principalmente por desplazamiento lateral y deformaciones permanentes inducidas por licuación e impactó tuberías enterradas, tuberías de gran diámetro, plantas de tratamiento y tanques de almacenamiento. Aproximadamente 150.000 km de tuberías se rompieron o tuvieron fugas en las áreas de Pichilemu, Iloca, Constitución, Dichato, Talcahuano y Arauco. Una de las plantas de tratamiento en el Gran Concepción dejó de funcionar debido a la combinación de desplazamiento lateral y movimiento severo, produciendo daño interno a los clarificadores y sedimentadores. Cerca de 73 tanques elevados colapsaron y se reportaron 72 fugas en tuberías de gran diámetro. La falla eléctrica tuvo el efecto más grande en la recuperación debido a que las compañías tenían generadores de emergencia, pero la capacidad no era suficiente para el tiempo de suspensión. Tres semanas después del desastre, el suministro de agua en Gran Concepción fue restaurado al 85% de la población y en las regiones de O'Higgins y Maule se alcanzó un 98% de reconexión, respectivamente. Para la quinta semana después del sismo, el servicio había sido restaurado al 95% en las tres regiones (Alberto et al., 2020). La reconstrucción en la zona más afectada se realizó con ayuda de otras compañías aledañas y del gobierno, y al mismo tiempo se procuró el servicio de agua con camiones aljibe. Después del evento, una de las prioridades fue actualizar planes de emergencia y redundancia en la red.

LAS GRANDES LECCIONES DEL 27-F

Fortalecimiento institucional

Como fue descrito en la introducción de este capítulo, el desastre del 27-F gatilló importantes aprendizajes institucionales. Respecto al monitoreo de la amenaza sísmica, el desastre de 2010 generó la transformación del Servicio Sismológico Nacional (SSN) en el renovado Centro Sismológico Nacional (CSN). A 10 años del 27-F, el CSN cuenta hoy con más del triple de personal que su predecesor para un monitoreo continuo 24/7 de los sismos en nuestro país, y mejoró sustancialmente la red de monitoreo del SSN de 70 a más de 500 instrumentos para medición de velocidad, aceleración y desplazamientos (CSN 2020). Similarmente, las capacidades de monitorear y predecir la ocurrencia de tsunamis en la costa chilena fueron fortalecidas con el desarrollo del nuevo Sistema Integrado de Predicción y Alarma de Tsunamis (SIPAT), producto de una colaboración científica-tecnológica entre diversos organismos públicos y universidades (CIGIDEN). El SIPAT es manejado dentro del Sistema Nacional de Alarma de Maremotos (SNAM) y es operado por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA).

Una de las instituciones de mayor transformación en los 10 años desde el desastre del 27-F ha sido, sin duda, la ONEMI. Para el momento del evento, la ONEMI se encontraba completamente sub-equipada y sub-preparada para enfrentar un evento de tal magnitud (Sehnbruch, 2017). Desde entonces, ONEMI ha sabido identificar sus debilidades y fortalecer su organización. Entre las tantas medidas tomadas, destacan la construcción del nuevo edificio institucional con tecnología de aislamiento sísmico, el desarrollo de planes

nacionales estratégicos para la gestión del riesgo de desastres para los periodos 2015-2018 y 2019-2023, el fortalecimiento de sus oficinas regionales, y el liderazgo en la modernización institucional mediante el proyecto de ley que crea el nuevo Sistema Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias que reemplazará a la ONEMI y que proveerá al país de una nueva institucionalidad para supervisar y coordinar el desarrollo e implementación de los planes estratégicos de reducción de riesgo de desastres en los distintos sectores y niveles administrativos del territorio.

Estos son solo dos ejemplos de cómo, institucionalmente, Chile se encuentra mejor preparado para enfrentar un nuevo evento natural extremo. Dichos aprendizajes fueron puestos a prueba en la forma de abordar los desastres asociados a los terremotos y tsunamis de Pisagua (2014) e Illapel (2015). Si bien estos eventos fueron significativamente menores al 27-F, la disponibilidad de información sobre el evento, la reacción institucional, el manejo de la emergencia, y la comunicación de la alerta a la población son sólo algunas de las dimensiones que muestran de qué manera nuestro país ha ido incorporando las lecciones aprendidas en el desastre del 2010.

Datos e información perecible

Uno de los principales aprendizajes del desastre del 2010 tiene relación con el levantamiento, consolidación, y distribución de datos e información perecible asociada al desastre en distintas dimensiones. En el caso de la infraestructura pública y privada, muchos de los actores responsables de los daños observados tendieron a actuar rápidamente para resolver la contingencia y evitar mayores complicaciones a causa de la cobertura en medios y noticias y daño reputacional a la imagen corporativa.

Lamentablemente, diversos errores se cometieron al reparar edificios de manera urgente, sin dar espacio a un estudio de las mejores alternativas de reparación, o a estudios detallados que evaluaran las causas de dichos problemas. Todo esto impidió avanzar más rápido en el entendimiento de cómo funciona nuestra infraestructura, y evitar que estos problemas se repitan en el futuro. Así, las consideraciones prácticas muchas veces se contrapusieron al ideal de un proceso abierto y transparente para aprender de nuestros supuestos habituales y prácticas profesionales aceptadas. En la gran mayoría de los casos, no hubo errores profesionales, sino el reflejo de un descuido de la normativa vigente que no previó el efecto pernicioso de las altas tensiones axiales inducidas por el sismo en los muros de edificios (Junemann). Una de las dificultades iniciales fue la imposibilidad de acceder a la totalidad de la información obtenida de los registros sísmicos, aspecto que luego se corrigió por parte de la autoridad, ya que gracias a la triste experiencia del 27-F, la autoridad decretó el acceso público a dicha información en el futuro.

Finalmente, es importante mencionar también el limitado aprendizaje institucional respecto a la evaluación de daños y recolección de datos perecibles. Por ejemplo, en 2010, el MOP desarrolló un sistema web que le permitió identificar y georreferenciar los puntos críticos, y monitorear el progreso de la implementación de soluciones para la recuperación y reconstrucción de la infraestructura pública. Dicho sistema fue muy útil para apoyar la toma de decisiones y la implementación de soluciones a lo largo del territorio. Sin embargo, a pesar de esta experiencia, la emergencia asociada al terremoto de Illapel en 2015 fue abordada tal como aquella de 2010, sin protocolos ni formularios preestablecidos para la inspección, evaluación, y recolección de datos durante la emergencia. Para avanzar, es realmente crítico contar con estándares preestablecidos y validados que permitan caracterizar adecuadamente la situación de terreno. Los instrumentos utilizados durante las emergencias deben permitir consolidar, curar y disponibilizar los datos recogidos para priorizar y resolver tanto operaciones de gestión del mismo desastre, como apoyar el avance en el conocimiento de la profesión mediante investigaciones profundas y el consecuente desarrollo tecnológico de nuestras normas.

Normativa de construcción

El desastre del 27-F permitió profundizar el conocimiento y mejorar la comprensión del desempeño sísmico de estructuras residenciales, industriales, y obras civiles. La materialización de dicho aprendizaje ocurrió a través de la actualización de algunas normas de diseño estructural, así como en la creación de nuevas normas donde destaca la actualización de la norma de diseño sísmico de estructuras NCh 433. Tal como los registros sísmicos y las observaciones del desempeño de las estructuras en el terremoto del 3 de marzo de 1985 fueron la base para la actualización de la norma NCh 433—oficializado en 1996—, la experiencia del 27-F permitió mejorar la norma y mejorar la seguridad sísmica de nuestro país. Mediante el decreto supremo DS 117 de noviembre de 2010, la norma NCh 433 fue complementada y mejorada para incluir una nueva clasificación de los suelos de fundación, y nuevos métodos para evaluar las fuerzas y desplazamientos de diseño. Luego de un año de vigencia de este decreto, éste fue actualizado para incorporar las observaciones de profesionales y académicos del área mediante el decreto supremo DS 61 de noviembre de 2011, aún vigente a la espera de una nueva versión completa de la norma NCh 433. Similarmente, la norma NCh 430 dedicada al diseño de estructuras de HA vigente desde 2008, fue modificada por el decreto DS 118 en noviembre de 2010, y finalmente por el DS 60 en noviembre de 2011.

Otro caso importante fue el extraordinario comportamiento de las 14 estructuras existentes en el país para el 27-F que incorporaban dispositivos de protección sísmica (aislación sísmica y disipación de energía). La emblemática Torre Titanium de 54 pisos, el Hospital Militar en Santiago, y el puerto de Coronel son tres ejemplos de estructuras que se mantuvieron completamente operativas después del terremoto. Esta exitosa experiencia llevó a la actualización de la norma de diseño de estructuras con aislación sísmica, NCh 2745, en 2013. Este buen comportamiento también influyó al Ministerio de Salud a pedir aislamiento sísmico de base a la gran mayoría de los nuevos hospitales públicos construidos desde 2012 en adelante.

Adicionalmente, la experiencia del terremoto y la articulación de distintos actores públicos y privados permitió la discusión y publicación de distintas normas oficiales entre 2013 y 2015, abordando, por ejemplo, la intervención y reforzamiento de estructuras construidas con tierra cruda (NCh 3332 de 2013), el diseño sísmico de componentes y sistemas no estructurales (NCh 3357 de 2015), y recomendaciones para el diseño de edificios en áreas con peligro de inundación por tsunami (NCh 3363 de 2015).

Respuesta de las comunidades

Quizás uno de los aprendizajes más importantes para la comunidad fue la manera de comportarse frente a la amenaza de tsunami, la que hasta la fecha parecía ser sólo un recuerdo histórico del Gran Terremoto de Valdivia de 1960. Cerca de un tercio de las muertes producidas por el evento del 27-F están directamente asociadas a la inundación del tsunami y a la fallida reacción del SNPC para proveer información correcta respecto a arribo de las sucesivas olas y la instrucción de evacuar. Junto con el fortalecimiento institucional descrito previamente, la amenaza de tsunami se volvió un tema relevante en la agenda en términos de investigación, información, y entrenamiento de la comunidad. ONEMI ha sido el principal actor en socializar este tema con las comunidades, organizando masivos simulacros de evacuación por tsunami a nivel regional e incluso internacionalmente en colaboración con Japón. Este aprendizaje fue patente en la forma en que las instituciones y comunidades respondieron frente a los tsunamis gatillados por los terremotos de Pisagua (2014) e Illapel (2015), donde se pudo observar auto-evacuación junto con un manejo superior por parte de la institucionalidad en términos de alerta, información a la comunidad, y manejo del proceso de evacuación y retorno.

Por otro lado, la experiencia del 27-F muestra cómo la filosofía de diseño estructural parece estar siendo ampliamente cuestionada por la sociedad. De acuerdo con la norma de diseño sísmico (NCh 433), las estructuras están diseñadas para prevenir el colapso y proteger la vida de sus ocupantes en caso de un

sismo con intensidad excepcionalmente alta, como fue el caso de 2010. Sin embargo, la reacción inmediata de las comunidades fue la de rechazar cualquier tipo de daño observado en la infraestructura, fuera este de carácter estructural, o incluso no estructural. Así, la experiencia de 2010 tiene una marcada diferencia con respecto a la de 1985; esta vez, la sociedad chilena ya no estuvo dispuesta a aceptar un estándar de seguridad sísmica que sólo prevenga el colapso, sino que demanda uno que asegure la habitabilidad de los recintos y la continuidad operativa de los servicios críticos y las industrias, e incluso de la vivienda. Este cambio de paradigma plantea un gran desafío a la arquitectura y la ingeniería estructural, desde donde se deben implementar nuevos criterios y estándares para el diseño de las futuras estructuras en Chile, así como también del desarrollo de mayor conocimiento y nuevas capacidades técnicas y tecnológicas para enfrentar dicho desafío.

SECCIÓN 6: CIUDADES RESILIENTES

Es interesante observar y comprender cómo los distintos conceptos de riesgo y resiliencia que se han introducido con anterioridad a esta sección para estructuras individuales o redes de líneas vitales, se replican en el contexto urbano. Esta sección describe en primer lugar qué es particular del ambiente urbano en términos de evaluar su riesgo y resiliencia frente a amenazas naturales, para luego describir algunos conceptos relevantes en términos de entender cómo se produce la construcción y generación del riesgo en mega ciudades. Uno de los procesos más relevantes para lograr estándares de resiliencia altos, que es la evacuación de personas de ciudades costeras, se describe en algún detalle, junto al avance de algunas herramientas de simulación de este proceso. Por último, esta sección cierra con el caso de la ciudad de Iquique que sirve como integrador de las distintas miradas que confluyen en el contexto urbano.

CUANTIFICACIÓN A GRAN ESCALA DEL RIESGO Y LA RESILIENCIA

Por razones de extensión, el principal foco de esta sección no está en la evaluación del riesgo en el entorno físico, ya que este aspecto puede ser evaluado con mucho detalle siguiendo los procedimientos descritos en las secciones anteriores (ver Figura 7). El estado del arte de las metodologías y el conocimiento actual de los inventarios de edificaciones existentes en el país, permiten utilizar herramientas como Hazus o OpenQuake para calcular el riesgo de grandes portafolios de estructuras de ciudades completas, y por ende este es un tema que está prácticamente resuelto, dentro, por supuesto, de los niveles de aproximación considerados en todas las evaluaciones del estado del arte en la disciplina.

Cuando los portafolios de activos físicos son muy grandes en número, es imposible manejar cualquier cálculo de riesgo y resiliencia manualmente. Se requieren entonces plataformas computacionales que han sido especialmente diseñadas y desarrolladas para este propósito. Estas plataformas pueden ser comerciales o abiertas, estas últimas de libre disposición e incluso algunas con código abierto.[12]

Una de las herramientas hoy disponibles para avanzar en la construcción de ciudades más resilientes consiste en el estudio de casos de eventos extremos y potenciales desastres. Estos estudios no sólo permiten una discusión científica-técnica de las potenciales consecuencias de posibles eventos futuros, sino que entregan insumos para la elaboración de planes y políticas para la preparación de las comunidades, y la mitigación del riesgo a distintos niveles espaciales y administrativos. En un reporte generado por CIGIDEN (2017), se analiza en profundidad y desde una mirada interdisciplinaria el caso de la ciudad de Iquique y las posibles consecuencias que generarían en la ciudad la acción conjunta de un potencial terremoto de magnitud Mw8,9 y el tsunami que dicho movimiento sísmico gatillaría.

---

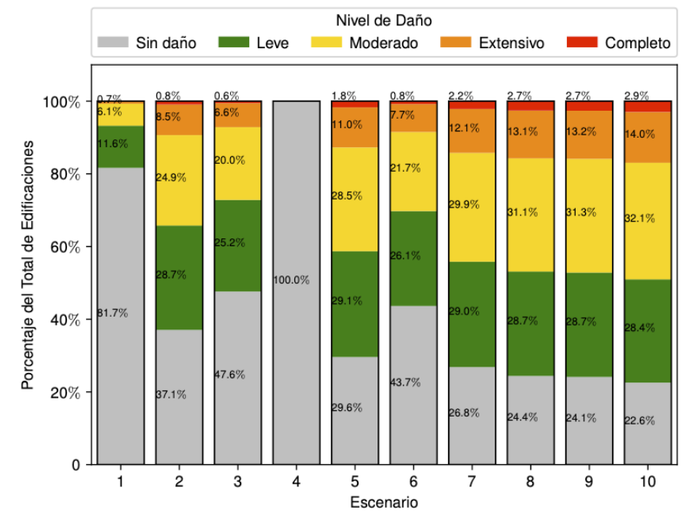
12 Entre las plataformas comerciales más reconocidas para la evaluación del riesgo frente a desastres de origen natural se encuentran por ejemplo las provistas por las empresas RMS (Risk Managemente Solutions), ERN (R-Plus, https://ern.com.mx/), ImageCat (http://www.imagecatinc.com) y RedRisk (www.redrisk.com). Estas plataformas son ampliamente utilizadas por las empresas de seguros y reaseguros a nivel mundial y constituyen referentes a nivel profesional.
Para un conjunto inicial de 82 plataformas abiertas disponibles, el Banco Mundial realizó en el año 2014 un análisis comparado entre plataformas mediante la evaluación de su desempeño en la estimación del riesgo asociado a distintas amenazas naturales. Las plataformas finales fueron: (i) Sismo: CAPRA Earthquake; EQRM, Hazus-MH Earthquake Module; InaSafe-Earthquake; MAEviz/mHARP; OpenQuake; RiskScape-Earthquake; SELENA; (ii) Inundación: Basement; CAPRA-Flood Model; Delft-3D-FLOW; Hazus-MH Flood Module; HEC-RAS/HEC-HMS/HEC-FDA/HEC-FIA HEC Suite; InaSAFE Flood; Kalypso; NoFDP IDSS; RiskScape-Flood; Sobek Suite 1D/2D with HIS-SSM; TELEMAC-MASCARET; (iii) Viento/Huracán/Tormentas: CAPRA-Hurricane; Hazus-MH Hurricane Model; RiskScape-Storm/Wind; TCRM; y (iv) Tsunami/Marejadas Ciclónicas/Oleaje: CAPRA-Tsunami and Storm Surge; Delft-3D-WAVE (SWAN); InsaSAFE-Tsunami; OsGEO Tsunami (R.Tsunami); RiskScape-Tsunami; SLOSH; TOMAWAC Wave; y TsuDAT using ANUGA.

Para estimar los efectos de un escenario sísmico se requiere de un inventario georreferenciado de los elementos en riesgo. En Iquique se estimaron 33.400 edificaciones, de las cuales 88,4% son del tipo residencial y 10,2% del tipo comercial. Adicionalmente se caracterizó la red de salud, los centros educacionales, carabineros y los centros de gendarmería. Respecto a la caracterización demográfica se estimó una población diurna en Iquique de 186.000 habitantes y se estimaron mapas de vulnerabilidad social.

Un posible escenario sísmico de magnitud de momento Mw8,9 se estimó mediante un análisis de sismicidad histórica, modelos de acoplamiento geodésicos y modelos de acoplamiento obtenidos mediante anomalías de gravedad. El área de ruptura de este terremoto es 108.000 km², el centroide se ubicaría al sur de la ciudad de Iquique y la profundidad del foco sería 21 km. La duración del terremoto se estimó en 200 segundos y la aceleración máxima del suelo (PGA) en Iquique variaría entre 0,38 g y 0,62 g dependiendo de las características locales del suelo. Este escenario sísmico generaría un tsunami cuya máxima onda de 5,5 metros de altura se generaría luego de 110 minutos después de ocurrido el evento. Sin embargo, las simulaciones numéricas estiman que sectores bajos de la zona norte de la ciudad serían inundados por una primera onda antes de 20 minutos después de ocurrido el evento. Adicionalmente, los mapas de inundación generados permiten predecir la infraestructura crítica que sería inundada.

El movimiento del suelo generaría un impacto significativo en las edificaciones de la ciudad. Se estima que el 40% de las viviendas residenciales experimentaría una pérdida total y que el 58% de los centros educacionales y de salud sufriría pérdida de funcionalidad. El daño en establecimientos educacionales dejaría a aproximadamente 6.500 estudiantes sin acceso a la educación y a otros servicios prestados por las escuelas públicas. Estas estimaciones se pueden utilizar para tomar decisiones respecto al mejoramiento estructural de infraestructura, de modo de disminuir el posible impacto ante eventos sísmicos futuros.

La Figura 40 extiende el análisis descrito a las edificaciones de la ciudad de Iquique para a un conjunto de escenarios, entre los cuales está considerado el Mw 8,9. El análisis fue realizado para la ciudad de Iquique y Alto Hospicio utilizando la plataforma Hazus. Este resultado considera la aplicación de la plataforma en un modelo de exposición detallado que fue desarrollado para ambas ciudades (Aguirre et al. 2018).



Escenario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Mw	8,55	8,40	8,71	8,58	8,68	8,85	8,79	8,90	8,91	8,98
Profundidad (km)	28,9	41,2	31,9	34,5	29,7	22,6	30,9	25,9	32,2	22,7

Figura 40: Síntesis de la evaluación del daño sísmico de para diez escenarios sísmicos en las ciudades de Iquique utilizando la plataforma Hazus. En el gráfico superior de muestra la distribución de edificaciones por nivel de daño para casa escenario simulado, y en la tabla inferior se detalla la magnitud de momento (Mw) y la profundidad epicentral de cada escenario. En el caso más extremo (Escenario 10), un 2,9% de las edificaciones de Iquique sufre daño completo, un 14% daño extensivo y 32,1% daño moderado.

Por otra parte, las simulaciones de procesos de evacuación para una ciudad permiten estimar el tiempo requerido por la población en estos procesos. Para el escenario Mw 8,9 se simularon procesos de evacuación a tres escalas diferentes, desde una escala macro de evacuación de la ciudad completa hasta una escala micro de evacuación de un colegio. El resultado del modelo macro de la ciudad estima que la tasa de evacuación hacia el perímetro seguro sería cercana al 90% de la población durante los primeros 20 minutos. Se concluye que las simulaciones realizadas son una herramienta relevante para la toma de decisiones respecto a procesos de evacuación. Estas simulaciones permitirían, por ejemplo, estimar el impacto que tendría tener vías más despejadas, o el impacto que tendría colocar una escalera adicional en un colegio en los tiempos de evacuación (ver subsección específica más abajo).

CARACTERÍSTICAS ESPECIALES DEL AMBIENTE URBANO EN TÉRMINOS DEL RIESGO Y LA RESILIENCIA

Los eventos de origen natural aumentan en todo el mundo. A su vez, aumentan las tendencias de urbanización a nivel mundial, por lo que las consecuencias han cambiado de entornos rurales a urbanos. Esto es especialmente relevante para el caso chileno, donde la población urbana alcanza un 89,7%, y un 61,5% vive en ciudades mayores a 300.000 habitantes, lo que requiere poner el foco en la alerta temprana y la respuesta a los eventos.

El riesgo de desastres en las ciudades se compone de dos factores: amenaza y vulnerabilidad. La primera puede definirse como una amenaza externa (de origen natural o antrópico) a las condiciones sociales, económicas, de infraestructura y ambientales, dentro de un contexto y un período de tiempo definidos. La vulnerabilidad ha sido definida como el pre-evento, características inherentes o cualidades de los sistemas sociales que crean el potencial de daño (Cutter et al., 2008). Estas características de vulnerabilidad pueden descomponerse en tres factores: (1) exposición (quién o qué está en riesgo), (2) susceptibilidad (es decir, el grado en que el sistema se ve afectado por perturbaciones) y (3) resiliencia / capacidad de adaptación o adaptación (es decir, la capacidad del sistema para evolucionar y acomodar perturbaciones) (Birkmann et al. 2010, Turner et al. 2003).

Para avanzar hacia ciudades resilientes es necesario gestionar adecuadamente estos factores, tanto para reducir la vulnerabilidad antes de que ocurra un desastre, como para mejorar la capacidad de respuesta (Birkmann, 2006). Una gestión del riesgo sostenible y asequible requiere marcos específicos, como por ejemplo, la reducción de la exposición, alerta temprana y respuesta, ayuda de emergencia, y recuperación. Promover la alerta temprana y la respuesta al desastre en contextos urbanos es pertinente para un país en desarrollo como Chile, donde medidas como la relocalización de poblaciones y la construcción de grandes defensas estructurales parecen inviables en el corto plazo. Por ejemplo, Chile está expuesto a tsunamis de campo cercano con tiempos de llegada cortos (incluso menos de 15 minutos) y, por lo tanto, la evacuación sigue siendo un método crítico para salvar vidas humanas.

La prevención y mitigación del riesgo en las ciudades requiere comprender en profundidad las transformaciones del espacio urbano y cómo inciden en la vulnerabilidad de la población, infraestructuras y equipamientos. Esto es particularmente crítico en las ciudades que experimentan procesos de rápido crecimiento, donde los instrumentos de planificación no alcanzan a conducir oportunamente las dinámicas de urbanización y renovación urbana.

En este contexto, el ordenamiento territorial y la planificación urbana cumplen un rol fundamental en la prevención y mitigación del riesgo, en los procesos de reconstrucción post-desastre y, en definitiva, en la resiliencia urbana. Así lo plantea el Marco de Acción de Sendai (2015), el cual promueve la inclusión de la prevención y gestión de desastres en los mecanismos de ordenamiento territorial y planificación urbana, para que aseguren altos niveles de seguridad de la población y guíen los procesos de relocalización post-desastre. El ordenamiento de las distintas actividades humanas en los entornos urbanos y su relación con el territorio, la distribución de las infraestructuras, espacios abiertos y equipamientos, así como la planificación de las densidades máximas, solo por nombrar algunos ámbitos, inciden significativamente en la mitigación o exacerbación de los riesgos de origen natural.

Por ejemplo, la creciente densificación residencial de las áreas expuestas a tsunami en las ciudades costeras del país, disminuye las capacidades de respuesta de las comunidades, particularmente su potencial de evacuación, al ubicar más población en áreas peligrosas. Esto puede conllevar una significativa extensión del proceso de evacuación, debido a tiempos de desplazamiento más largos debido a la congestión espacial, a la distribución por edad y género de la población (Klüpfel y Schreckenberg 2003; Post et al. 2009) y a comportamientos imprevisibles que surgen en grandes aglomeraciones de personas. Si bien las Naciones Unidas (UN-HABITAT, 2016) han promovido la ciudad compacta y densa como un modelo de crecimiento urbano sostenible, lo anterior aparentemente plantea una paradoja, ya que las altas densidades también pueden aumentar la exposición al riesgo de personas y activos (Allan et al., 2013), especialmente en contextos urbanos no planificados (Irajifar et al., 2016). Las ciudades con altas densidades de población y largas distancias a las rutas de evacuación son menos resilientes que aquellas áreas urbanas con más espacios abiertos y rutas de evacuación por habitante (Villagra et al., 2016).

MITIGACIÓN Y POLÍTICAS PÚBLICAS

En Chile, el marco conceptual y metodológico de la gestión del riesgo de desastres en Chile está contenido en el Sistema Nacional de Protección Civil (SNPC), coordinado por la Oficina Nacional de Emergencia (ONEMI). Por otro lado, la planificación urbana y territorial es principalmente de carácter normativo, lo que da cuenta del rol predominantemente regulatorio que le compete al Estado en el desarrollo urbano. Los desafíos que presentan estos instrumentos, en términos de la mitigación y adaptación al riesgo, son múltiples. La ONU destaca como un área prioritaria la reducción de los factores subyacentes de riesgo, debiendo, por ende, incorporarse "en los criterios de planificación territorial el enfoque de reducción de riesgos a desastres [sic]" (UNISDR, 2018). La Política Nacional de Desarrollo Urbano establece que "nuestras ciudades y sistemas de centros poblados deben ser capaces de sobreponerse a las adversidades, a los desastres naturales y a las crisis económicas" (MINVU, 2014). En la misma línea, la Política Nacional de Desarrollo Rural promueve "la existencia de estudios específicos y apoyo técnico para que las instituciones públicas involucradas puedan avanzar en un proceso de ordenamiento del territorio por condiciones, (…) reconociendo la importancia y valor de los distintos ecosistemas, los riesgos naturales y antrópicos" (ODEPA, 2014).

El SNPC está integrado por un conjunto de organizaciones, servicios e instituciones que pertenecen a los sectores público y privado, incluyendo líderes comunitarios y voluntarios que aportan desde distintos ámbitos a la gestión de emergencias. Este sistema se desarrolla en los siguientes niveles jurisdiccionales: nacional, regional, provincial y comunal, y es liderado en cada uno de ellos por la respectiva autoridad política. La estructura de gestión para la protección civil de cada nivel jurisdiccional se configura a través de un Comité de Protección Civil (CPC) y un Comité de Operaciones de Emergencia (COE). Mientras el CPC es el agente encargado de la prevención, mitigación y preparación para los desastres, el COE es el agente encargado de coordinar la respuesta y recuperación una vez que ocurre el desastre.

Adicionalmente, y para fortalecer la gestión de riesgo de desastres (GRD) en Chile, en el año 2015 se elaboró el primer Plan Estratégico Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (PENGRD), documento técnico que tiene como objetivo principal operativizar la Política Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, la cual contiene los principios y lineamientos para la GRD en Chile. El PENGRD 2015-2018 plantea 5 ejes prioritarios: (i) fortalecimiento institucional; (ii) fortalecimiento de los sistemas de monitoreo y alerta temprana; (iii) fomento de la cultura de la prevención y el auto aseguramiento; (iv) reducción de los factores subyacentes del riesgo; y (v) fortalecimiento de la preparación ante los desastres para lograr una respuesta eficaz.

Por otro lado, prontamente se lanzará el nuevo plan PENGRD, el cual está basado en el Marco de Sendai para la reducción del riesgo de desastres, documento firmado en 2015 por países miembros de la ONU en el marco de la Tercera Conferencia Mundial de las Naciones Unidas sobre la Reducción del Riesgo de Desastres. El nuevo PENGRD considera 5 áreas prioritarias: (i) comprender el riesgo de desastres; (ii) fortalecer la gobernanza de la GRD; (iii) planificar e invertir en la reducción del riesgo de desastres (RRD); (iv) proporcionar una respuesta eficiente y eficaz; y (v) fomentar una recuperación sostenible.

Lo anterior indica que en los últimos años Chile ha avanzado significativamente en el desarrollo de un marco conceptual y de herramientas administrativas para la GRD. Sin embargo, existe aún una brecha relacionada con la provisión de información técnica oportuna y de calidad, para apoyar en forma eficiente y estandarizada los procesos de toma de decisiones en el ámbito de planes orientados a la reducción y gestión del riesgo de desastres. Esto se hace especialmente crítico en las áreas urbanas del país, especialmente las áreas metropolitanas.

Como parte de la gestión del riesgo de desastres, las municipalidades son responsables de la elaboración de un Plan Comunal de Protección Civil, instrumento que permite coordinar capacidades humanas, técnicas y materiales para manejar situaciones de riesgo y emergencia. Sin embargo, frecuentemente estos planes están basados en experiencias pasadas, sin información precisa sobre escenarios de amenazas naturales, exposición y vulnerabilidad, todos elementos indispensables para realizar una estimación de los potenciales impactos sobre infraestructura, edificaciones y personas, que orienten adecuadamente la priorización de acciones orientadas a la mitigación del riesgo. En el caso de un terremoto, por ejemplo, si bien ONEMI recibe información sobre las características geofísicas del evento con gran celeridad desde el Centro Sismológico Nacional (CSN), se desconoce totalmente el daño esperado en una determinada localidad debido al evento registrado. En definitiva, para poder diseñar mejores planes de gestión de riesgo de desastres, es necesario realizar adecuadas estimaciones del riesgo en una ciudad.

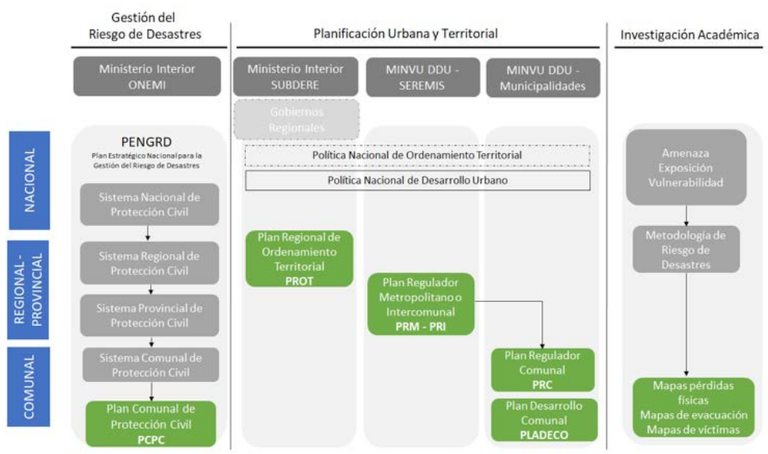


Figura 41: Esquema del ordenamiento de la gestión del riesgo de desastres y la planificación urbana y territorial. Fuente: elaboración propia.

Desde otro ámbito institucional, los instrumentos de planificación urbana y territorial, particularmente los Planes Regionales de Ordenamiento Territorial (PROT) y los Planes Reguladores Metropolitanos (PRM), Intercomunales (PRI) y Comunales (PRC), no tienen relación con los planes orientados a la reducción y gestión del riesgo de desastres, ni tampoco incorporan una metodología estandarizada de evaluación de riesgos (Ver Figura 34). Por una parte, el PROT es un instrumento elaborado por el Gobierno Regional, que orienta la utilización del territorio de la región para lograr su desarrollo sustentable a través de lineamientos estratégicos y una macro zonificación territorial. Hasta ahora, la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE) ha sido la entidad encargada de financiar y dar los lineamientos metodológicos para la elaboración de los PROT.

En la escala municipal podemos agregar también el Plan de Desarrollo Comunal (PLADECO), instrumento que, junto al PRC y el presupuesto municipal anual, constituyen las principales herramientas para guiar y direccionar el desarrollo de las comunas del país. El PLADECO se actualiza cada 4 años, y en el marco de la cuenta pública municipal anual, el alcalde debe informar las acciones realizadas para el cumplimiento del PLADECO, así como los estados de avance de los programas de mediano y largo plazo, las metas cumplidas y los objetivos alcanzados. Cabe señalar que la SUBDERE, a través de la Unidad de Acciones de Apoyo para el Fortalecimiento Institucional dependiente de la División de Municipalidades, apoya con orientación técnica a los municipios que no han actualizado sus PLADECO. Este apoyo incluye la asistencia en el proceso de postulación, la entrega de información y materiales tales como términos de referencia tipo para licitar un plan y manual de referencia para su elaboración.

Por su parte, los PRM y PRI son elaborados por la SEREMI de Vivienda y Urbanismo y los PRC por los municipios. En gran parte de los casos, la elaboración de estos instrumentos de planificación comunal es realizada por consultoras privadas que se adjudican los estudios mediante licitación pública. La División de Desarrollo Urbano (DDU) del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, está encargada de definir las competencias, atribuciones y procesos de elaboración de los instrumentos de planificación territorial mediante la Ley y Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones. El grupo de instrumentos normativos vinculantes (PRM, PRI y PRC) constituyen los instrumentos de planificación territorial (IPT).

En el proceso de elaboración tanto de los PRM y PRI como de los PRC debe realizarse un Estudio de Riesgos, documento técnico elaborado por uno o más profesionales especialistas, cuyo objetivo es definir peligros reales o potenciales para el emplazamiento de asentamientos humanos. Cabe precisar que el riesgo no se encuentra definido como tal en la legislación urbanística, y, en consecuencia, para la definición de áreas de riesgo no se exige un análisis de exposición ni de vulnerabilidad. De esta manera, se genera a nivel institucional otra brecha importante pues dichas áreas constituyen más bien una zonificación de amenazas y no de riesgos.

El Estudio de Riesgos permite fundamentar la definición de Áreas de Riesgo en los instrumentos de planificación territorial, en las cuales se limita "determinado tipo de construcciones por razones de seguridad contra desastres naturales u otros semejantes, que requieran para su utilización la incorporación de obras de ingeniería o de otra índole suficientes para subsanar o mitigar tales efectos". Dichas áreas deben contemplar normas urbanísticas para que resulten aplicables a las edificaciones localizadas en zonas inundables, zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas (remociones en masa), zonas de actividad volcánica y/o fallas geológicas, y franjas de protección de obras de infraestructura peligrosa (riesgo de origen antrópico). A su vez, los PRC deben cautelar distancias mínimas de la vialidad a la línea de más alta marea en las zonas de protección de borde costero, "fijando las vías de penetración hacia la costa de acuerdo a las condiciones geográficas que presente cada sector". Los planes reguladores que establecen zonas de protección costera, deben contemplar a lo largo de toda la zona una faja no edificable de 20 metros de ancho mínimo, medida tierra adentro a partir de la línea de más alta marea, para ser destinada exclusivamente a la circulación peatonal.

La institucionalidad chilena no ofrece una metodología básica estandarizada para la elaboración de los Estudios de Riesgo. No se establecen estándares mínimos de espacialización de los riesgos analizados, así como de parámetros para la restricción de la ocupación y manejo de dichas áreas. Tampoco se establecen definiciones ni estándares mínimos respecto de los datos y contenidos a desarrollar, ni de la cartografía a incorporar. Consecuentemente, la calidad y actualización de los Estudios de Riesgo es muy heterogénea a lo largo del país.

La DDU del Ministerio de Vivienda y Urbanismo se encuentra realizando una "Guía Metodológica para la Elaboración de Estudios de Riesgo", con el fin de estandarizar la definición y contenidos mínimos de los Estudios de Riesgos para los PRM, PRI y PRC, su conceptualización y secuencia metodológica para la definición de áreas de riesgo.

A su vez, la DDU se encuentra evaluando cómo incorporar el potencial de evacuación en los instrumentos de planificación territorial, los cuales no consideran de manera explícita el potencial de evacuación de las comunidades costeras. En efecto, dicho potencial de evacuación debe ser evaluado y planificado caso a caso, muchas veces sin contar con los recursos técnicos, administrativos y monetarios para esta tarea. Por ejemplo, luego del terremoto y tsunami del 27 de febrero de 2010, el Gobierno de Chile en conjunto con los municipios afectados, universidades e instituciones privadas desarrolló 25 planes de reconstrucción del borde costero (PRES), todos los cuales incluían propuestas destinadas a desarrollar o mejorar las vías de evacuación de estas localidades. Sin embargo, estos instrumentos constituían planes maestros no vinculantes con los IPT, por lo que su ejecución en este aspecto varió significativamente entre municipios. En relación a esto, la Guía de Referencia para Sistemas de Evacuación Comunales por Tsunami sugiere incorporar el diseño de evacuación dentro del marco normativo existente del Plan Regulador Comunal (PRC), a través de su vialidad planificada o bien como nuevos espacios públicos, junto con presentar programas gubernamentales de nivel nacional (programas de Prevención y Mitigación de Riesgos y de Mejoramiento Urbano de la SUBDERE) que permitirían financiar su implementación y/o mejora.

Existe consenso entre los distintos agentes en que la planificación urbana y territorial no está todavía adecuadamente integrada a los procesos de reducción del riesgo de desastres, en parte debido a que son actividades administrativamente separadas en la mayoría de los niveles de gobernanza, con procesos distintos y equipos profesionales y técnicos de orígenes educacionales disímiles. A esto se agrega la dificultad de proveer los procesos de planificación con información actualizada, exhaustiva y precisa acerca de las amenazas y vulnerabilidades existentes en el territorio. También contribuyen la gran inercia al cambio de los patrones de propiedad y usos del suelo, incluso en zonas expuestas a amenazas. Es por esto que la integración de la gestión del riesgo en los IPT debe contemplar mecanismos de monitoreo y revisión de sus resultados, en especial durante el proceso de actualización de los instrumentos y también a la luz de las consecuencias de un desastre. El monitoreo y revisión de los IPT puede desarrollarse a través de indicadores que recopilen información objetiva acerca del territorio y puedan combinarse en índices y criterios transferibles tanto a tomadores de decisiones como a la población general.

De esta manera, pareciera evidente que para gestionar y reducir el riesgo de desastres y poder abordar las acciones prioritarias propuestas por el Marco Sendai, se requiere que los agentes tomadores de decisión en las distintas escalas del territorio, puedan contar con la información necesaria y precisa para ser incorporadas efectivamente en los procesos de elaboración de los instrumentos de gestión de riesgo de desastres y los instrumentos de planificación territorial. Esta información debe estar basada en estudios robustos, no sólo para identificar amenazas naturales, sino sobre todo para evaluar escenarios de riesgo y sus potenciales impactos socioeconómicos en una región, ciudad o comuna.

En resumen, ha existido a nivel institucional una aproximación hacia la gestión del riesgo centrada en el monitoreo y caracterización de las amenazas naturales sin abordar adecuadamente las dimensiones de exposición y vulnerabilidad; elementos indispensables para la evaluación de las potenciales consecuencias en la sociedad. Esto ha dificultado los procesos de toma de decisiones orientados a la mitigación de largo plazo del riesgo de desastres, en particular en relación a los ámbitos de competencia de los instrumentos de planificación territorial.

PROCESOS DE EVACUACIÓN EN CIUDADES COSTERAS

Tal como se mencionó en la sección anterior, el desarrollo de planes avanzados de evacuación en caso de la amenaza de tsunami es una tarea importante por incorporar en los planes de diseño de ciudades. En la actualidad, muchas de las rutas simplemente se basan en el concepto de la "ruta más simple" para llegar a una zona segura definida en 30 m.s.n.m. (ONEMI, 2011), tal como lo muestran los mapas que ofrece ONEMI disponibles en su sitio web. Estos mapas son muy útiles, pero no consideran el cambio de las condiciones de demanda y el daño presente en una ciudad después de un terremoto.

Por ello, distintos métodos se han desarrollado para realizar este tipo de planes, como los de menor costo-distancia basados en capas georreferenciadas para representar la rugosidad del suelo (pavimento, pasto, tierra) y ver cómo afectan a los tiempos de evacuación de una persona promedio. Sin embargo, en los últimos años ha empezado a cobrar mucho más interés el uso de modelos que sean capaces de simular individualmente la respuesta de las personas. Este tipo de modelos se conocen usualmente como modelos basados en agentes. Aquí, un agente puede representar tanto una persona como un grupo de personas con características comunes. El objetivo de estos modelos es que a partir del comportamiento individual (de un agente) se pueda inferir el comportamiento global del sistema, que en este caso sería la evacuación completa de una ciudad hacia una zona segura.

Hoy ya existen trabajos que han mostrado la utilidad del uso de los modelos basados en agentes. En particular, es interesante presentar un análisis integrado que se ha desarrollado desde hace unos años en el marco del proyecto CIGIDEN. En primer lugar, uno de los grandes desafíos al momento de simular el comportamiento de las personas durante una evacuación es poder estimar de forma realista el efecto que tiene la congestión en la velocidad en que se mueven. Para ello, el modelo desarrollado por Poulos et al. (2018) introdujo una metodología de movimiento que evita las colisiones entre las personas (los agentes). Mientras que cada agente posee una velocidad de evacuación que depende del género, edad y factores aleatorios, todos cumplen con la regla común de no chocar entre sí. Esto implica que cada uno de los agentes debe reducir su velocidad al acercase a otro agente, capturando así de forma natural el problema de la congestión.

Con el modelo de agentes definido, es posible estudiar el proceso de evacuación en distintas escalas. Primeramente, se considera el caso de la evacuación dentro de los edificios. Un ejemplo de cómo se visualiza esta evacuación se puede ver en la Figura 42, correspondiente a un edificio de oficinas típico de Santiago. Muchos de estos edificios cuentan con elementos como tabiques y cielos falsos que en caso de movimiento sísmico pueden caer o dañarse, interrumpiendo el flujo de las personas. La simulación nos permite además obtener una estimación de los heridos durante distintos instantes del terremoto junto al tiempo de evacuación de cada agente.

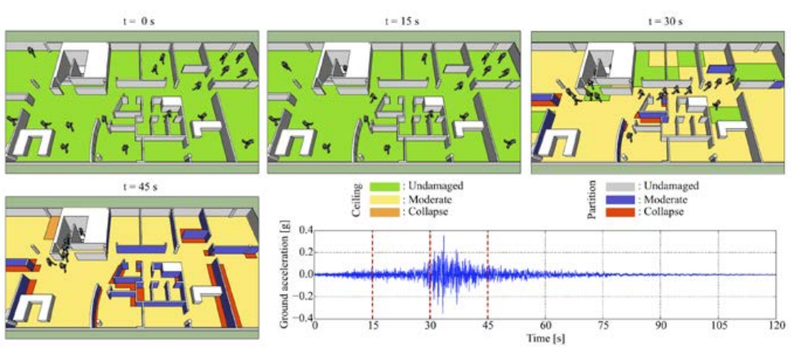


Figura 42: Simulación basada en agentes de una evacuación en un edificio de oficinas típico chileno.

La continuación natural de este análisis es la evacuación de una ciudad completa para el caso por ejemplo de la amenaza de tsunami. Este modelo y análisis permite evaluar las rutas sugeridas por las autoridades y proponer, en caso de ser necesario, mejoras a éstas. La utilización de modelos de agentes en esta escala sigue siendo muy beneficiosa, pues permite realizar análisis desde muy detallados a otros de mayor escala (menor resolución). Adicionalmente, la existencia de modelos de exposición en algunas ciudades costeras permite introducir además complejidades que no habían sido consideradas previamente, como es la generación de escombros en las calles, los que pueden obstruir parcial o completamente estas vías de evacuación. El efecto que pueden tener escombros en los tiempos de evacuación, junto a los efectos del tránsito en las calles, ha sido estudiado recientemente en Castro et al. (2019). El estudio mostró aumentos de hasta 10 minutos en los tiempos de evacuación debido a la congestión que podrían producir estos escombros.

Un grupo interdisciplinario de investigadores del centro CIGIDEN se ha dedicado recientemente a modelar el proceso de evacuación en dos ciudades costeras de Chile: Iquique y Viña del Mar. Mientras la primera de ellas destaca por la importancia de su puerto en el norte de Chile, la segunda es una de las más visitadas por turistas en Chile, especialmente en el periodo estival. Resultados de ambos análisis muestran la relevancia de considerar nuevas metodologías en el desarrollo de los planes de emergencia.

En el caso de Iquique, un trabajo integrado desde la generación estocástica de terremotos y tsunamis, combinado con el daño en estructuras tanto en su interior como su caída al exterior, fue presentado por Castro et al. (2018). Uno de los resultados más llamativos del análisis fue observar la implicancia de la alta tasa de vehículos presentes en Iquique en horarios diurnos, generando así una gran cantidad de obstrucciones que pueden impactar a un número elevado de personas afectadas por la llegada de las primeras olas del tsunami. Pese a que el modelo todavía tiene una serie de limitaciones con respecto al modelamiento de ciertos comportamientos de las personas; sin duda es un buen predictor de cuáles son los principales problemas que se pueden presentar en la evacuación de una ciudad como Iquique, ayudando a definir estrategias que los corrijan.

Por otro lado, León et al. (2020) ha realizado análisis a diferentes escalas para una evacuación en Viña del Mar bajo el escenario de un tsunami de similares características al producido por el terremoto de 1730, el más destructivo que ha afectado a la zona central de Chile. En dicho trabajo es posible ver que los resultados de modelos macroscópicos pueden subestimar considerablemente los tiempos de evacuación, dejando en evidencia la importancia de los supuestos y propiedades escogidas para los modelos. Eso queda reflejado en los resultados presentado en la Tabla 4

Tabla 4: Resultados de modelos de evacuación en Viña del Mar

Tiempos de evacuación en 7 Norte, Viña del Mar (segundos)				
	LCD-macro	LCD-micro	Modelo meso de agentes	Modelo micro de agentes
Tiempo máximo	1.555,5	1.614,9	1.596,0	1.792,2
Tiempo mínimo	6,0	6,8	7,4	5,3
Promedio	812,2	811,4	809,7	883,7

EL CASO DE ESTUDIO DE LA CIUDAD DE IQUIQUE

Una de las herramientas hoy disponibles para avanzar en la construcción de ciudades más resilientes consiste en el estudio de casos de eventos extremos y potenciales desastres. Estos estudios no sólo permiten una discusión científica-técnica de las potenciales consecuencias de posibles eventos futuros, sino que entregan insumos para la elaboración de planes y políticas para la preparación de las comunidades, y la mitigación del riesgo a distintos niveles espaciales y administrativos. En un reporte generado por CIGIDEN (2017), se analiza en profundidad y desde una mirada interdisciplinaria el caso de la ciudad de Iquique y las posibles consecuencias que generarían en la ciudad la acción conjunta de un potencial terremoto de magnitud MW 8,9 y el tsunami que dicho movimiento sísmico gatillaría.

Para estimar los efectos de un escenario sísmico se requiere de un inventario georreferenciado de los elementos en riesgo. En Iquique se estimaron 33.400 edificaciones, de las cuales 88,4% son del tipo residencial y 10,2% del tipo comercial. Adicionalmente se caracterizó la red de salud, los centros educacionales, carabineros y los centros gendarmería. Respecto a la caracterización demográfica se estimó una población diurna en Iquique de 186.000 habitantes y se estimaron mapas de vulnerabilidad social.

El posible escenario sísmico de magnitud de momento de 8,9 se estimó mediante el análisis de la sismicidad histórica, modelos de acoplamiento geodésicos y modelos de acoplamiento obtenidos mediante anomalías de gravedad. El área de ruptura de este terremoto es 108.000 km2, el centroide se ubicaría al sur de la ciudad de Iquique y la profundidad del foco sería 21 km. La duración del terremoto se estimó en 200 segundos y la aceleración máxima del suelo (PGA) en Iquique variaría entre 0,38 g y 0,62 g dependiendo de las características locales del suelo. Este escenario sísmico generaría un tsunami cuya máxima onda de 5,5 metros de altura se generaría luego de 110 minutos después de ocurrido el evento. Sin embargo, las simulaciones numéricas estiman que sectores bajos de la zona norte de la ciudad serían inundados por una primera onda antes de 20 minutos después de ocurrido el evento. Adicionalmente, los mapas de inundación generados permiten predecir la infraestructura crítica que sería inundada.

El movimiento del suelo generaría un impacto significativo en las edificaciones de la ciudad. Se estima que el 40% de las viviendas residenciales experimentaría una pérdida total y que el 58% de los centros educacionales y de salud sufriría pérdida de funcionalidad. El daño en establecimientos educacionales dejaría a aproximadamente 6.500 estudiantes sin acceso a la educación y a otros servicios prestados por las escuelas públicas. Estas estimaciones se pueden utilizar para tomar decisiones respecto al mejoramiento estructural de infraestructura, de modo de disminuir el posible impacto ante eventos sísmicos futuros.

Las simulaciones de procesos de evacuación permiten estimar el tiempo requerido por la población en estos procesos. En este documento se simulan procesos de evacuación a tres escalas diferentes, desde una escala macro de evacuación de la ciudad completa hasta una escala micro de evacuación de un colegio. El resultado del modelo macro de la ciudad estima que la tasa de evacuación hacia el perímetro seguro sería cercana al 90% de la población durante los primeros 20 minutos. Se concluye que las simulaciones realizadas son una herramienta relevante para la toma de decisiones respecto a procesos de evacuación. Estas simulaciones permitirían, por ejemplo, estimar el impacto que tendría tener vías más despejadas, o el impacto que tendría colocar una escalera adicional en un colegio en los tiempos de evacuación.

SECCIÓN 7: TRATAMIENTO PARA LA REDUCCIÓN DEL RIESGO

El tratamiento del riesgo es la etapa final de un proceso de gestión de riesgos. Constituye la respuesta de un sistema ante el efecto de las amenazas naturales o antrópicas. Para identificar y aplicar medidas eficaces de tratamiento de riesgo, es necesario aplicar sistemáticamente el ciclo completo de gestión de riesgo: identificar amenazas, analizar, evaluar y comunicar los riesgos, hasta llegar al criterio de decisión que activa el tratamiento de riesgos: evitar, reducir, transferir y aceptar. Con posterioridad a la aplicación de medidas de tratamiento de riesgos, es necesario aplicar un proceso de monitorización y seguimiento de la efectividad de las medidas en función de las amenazas y aplicar, si es necesario, medidas correctivas. Un aspecto esencial del tratamiento son los umbrales o niveles de aceptación. Cuando el umbral de aceptación no es tolerable se activan las medidas de tratamiento del riesgo. Bajo este enfoque, en este capítulo se discuten un enfoque de tratamiento del riesgo y los diversos instrumentos de política disponibles.

ENFOQUE PARA EL TRATAMIENTO DEL RIESGO

El enfoque general de tratamiento del riesgo considera cuatro tipos de acciones secuenciales: evitar, reducir, transferir y retener. Evitar implica eliminar las amenazas naturales o bien lograr que las consecuencias de los eventos naturales sean nulas.

- Eliminar las amenazas no resulta posible y anular las consecuencias puede no ser costo eficiente.
- Reducir implica esencialmente actuar sobre las consecuencias, lo cual es asimilable a mitigar el riesgo. Las actuaciones sobre las consecuencias pueden desagregarse en dos tipos de intervenciones: reducir la vulnerabilidad de los sistemas o infraestructuras (actuación de ingeniería), y reducir la exposición de los sistemas (actuación de planificación, legislación y fiscalización).
- Transferir implica en la práctica asegurar las infraestructuras o los sistemas (actuación financiera), lo cual implica reducir las consecuencias de los eventos naturales en términos de reducir el tiempo de recuperación mediante la disponibilidad (cuasi) inmediata de recursos económicos.
- Retener consiste en aceptar la ocurrencia de daño, dimensionar las consecuencias e invertir en recuperación de desempeño de la infraestructura o sistemas cada vez que esta se ve afectada por un evento natural. Como se mencionó al inicio, estas cuatro actuaciones son secuenciales, de tal suerte que la primera decisión es siempre evitar. Si no se puede evitar se actúa para reducir. Si no se puede reducir se actúa transfiriendo y reteniendo el riesgo.

Este proceso decisional involucra costos y beneficios, por lo cual es siempre necesario aplicar criterios económicos para diseñar las actuaciones necesarias para tratar el riesgo. El balance adecuado entre beneficios y costos de invertir en tratar el riesgo en un caso en particular y a lo largo del tiempo se ilustra en las Figuras 43 y 44.

La Figura 43 muestra el trade-off entre las medidas de tratamiento que reducen la vulnerabilidad de un sistema o infraestructura, y por tanto incrementan su confiabilidad. En la medida que la vulnerabilidad se reduce, los costos ocasionados por la interrupción del servicio prestado se reducen, pero a la vez se incrementan los costos incurridos en la reducción de la vulnerabilidad. Esto implica que existe un óptimo económico en el cual se minimiza el costo total para un nivel de vulnerabilidad determinado. Este óptimo puede corresponder a cualquiera de las decisiones de tratamiento de riesgo visto anteriormente.

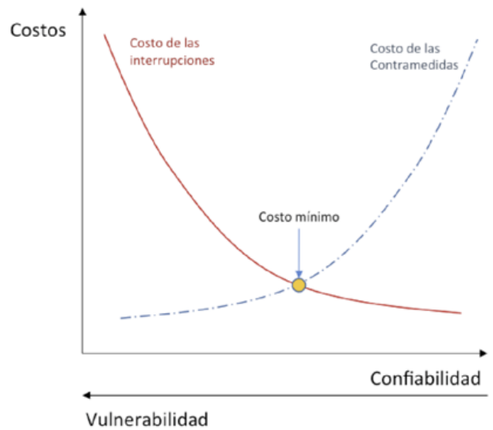


Figura 43: Balance entre beneficios y costos del tratamiento del riesgo en situaciones individuales (Husdal, 2005).

La Figura 44 muestra la progresión del servicio de una infraestructura o sistema a lo largo del tiempo en presencia de pérdidas bruscas de desempeño producto de un evento natural cualquiera. La Figura 44a muestra el caso en que las decisiones de tratamiento de riesgo incrementan el desempeño, reducen el daño y reducen el tiempo de recuperación; la Figura 44b muestra el caso en que las decisiones de tratamiento mantienen el desempeño estable a lo largo del tiempo; y la Figura 44c muestra el caso en que las decisiones de tratamiento redundan en una degradación progresiva del desempeño. Estas tres consecuencias se derivan de una decisión económica en la que está involucrado el costo y beneficio de incrementar la robustez (o reducir la vulnerabilidad), acelerar la recuperación, e incrementar el desempeño futuro de la infraestructura o sistema.

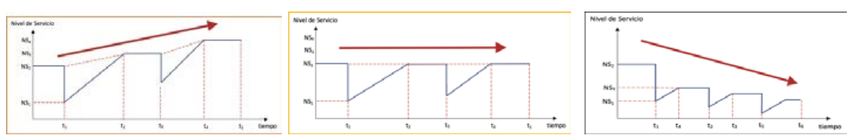


Figura 40: Efecto de las decisiones de tratamiento de riesgo en el nivel de servicio ofrecido por un sistema o infraestructura (Elaboración Propia).

Algunos ejemplos de medidas de mitigación (ex-ante) y restauración (ex-post) se muestran en la Tabla 5, para diferentes tipos de infraestructuras. Las medidas son de carácter genérico, pero en la práctica, deben asociarse al tipo de amenaza.

Tabla 5: Ejemplos de tratamientos de riesgo para diversos tipos de infraestructura

Infraestructura	Tipo de tratamiento	Descripción
Infraestructura vial	Mitigación	Mejora de estándar de rutas alternativas (redundancia en la red) Disposición de obras de protección ribereña Refuerzo de taludes Levantamiento de rasante
	Restauración	Reconstrucción de infraestructura dañada Despeje de calzada
Hospitales	Mitigación	Sistemas de disipación de energía
	Restauración	Rehabilitación de muros dañados
Redes de conducción y distribución (agua, gas, energía)	Mitigación	Aumentar grosor de tuberías (Nair & Dash, 2015) Reemplazo de tuberías previo a su fatiga
	Restauración	Reposición de tuberías dañadas
Red de distribución eléctrica	Mitigación	Retensado de conductores para amenaza de incendios (Mitchel, 2013)
	Restauración	Reposición de elementos dañados
Plantas de tratamiento de agua potable	Mitigación	Refuerzo de estanques de almacenamiento (Panico et al., 2013)
	Restauración	Sellado de grietas en elementos dañados

Las decisiones de tratamiento de riesgo se pueden adoptar durante el diseño, durante la operación o en ambos. Durante el diseño, el tratamiento del riesgo es ex – ante, es decir, se proyectan las infraestructuras o sistemas de manera de optimizar en términos de costos su confiabilidad asegurando así que su desempeño se mantenga estable a lo largo de su vida útil. Para ello se requiere contar con herramientas predictivas de desempeño a lo largo del tiempo que vinculen la degradación propia del sistema debido a solicitaciones recurrentes, con el efecto de pérdida de desempeño debido a amenazas naturales (solicitaciones no recurrentes). Este proceso es similar cuando se trata el riesgo en infraestructuras existentes (actuación ex – post). Sin embargo, existen mayores restricciones para reducir la vulnerabilidad, ya sea debido a la materialidad de los sistemas, a restricciones de espacio, a regulaciones especiales, a incertidumbre social, política o financiera, a la falta de herramientas tecnológicas o normativas, etc.

Uno de los enfoques más conocidos de tratamiento del riesgo es el enfoque ALARP (*As Low as Reasonable Practicable*) desarrollado en Gran Bretaña. La Figura 45 muestra dicho enfoque. ALARP establece umbrales de aceptabilidad para tratar el riesgo de manera integral, definiendo niveles inaceptables, aceptables y despreciable de riesgo.

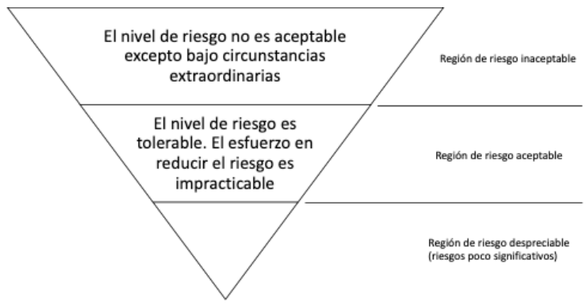


Figura 45: enfoque ALARP de tratamiento de riesgo (Alkazraji, 2008).

Este enfoque de análisis está acompañado de un proceso de evaluación cuantitativa del riesgo, en términos de la frecuencia de falla de un sistema y las consecuencias de la falla, como se muestra en la Figura 46.

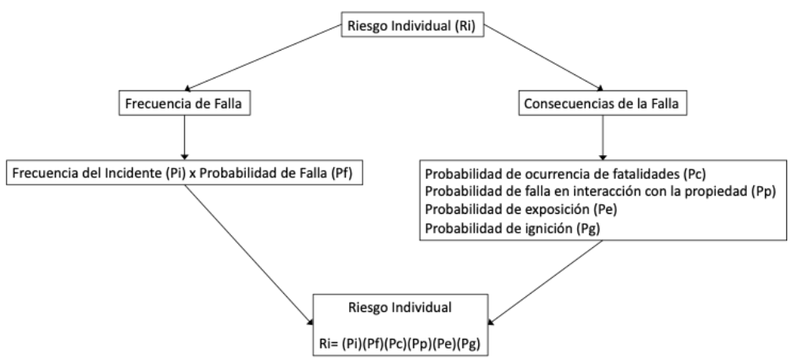


Figura 46: Evaluación cuantitativa del riesgo (Alkazraji, 2008).

Bajo el enfoque ALARP, las medidas de tratamiento del riesgo se ubican en un rango intermedio de riesgo en el cual existe un balance entre el daño y la frecuencia de falla. Asimismo, desde el punto de vista del riesgo, los objetivos del tratamiento del riesgo bajo este enfoque son: reducir las consecuencias o reducir la probabilidad de ocurrencia. Este aspecto ya se ha discutido previamente en el capítulo. De este modo, el enfoque ALARP establece los siguientes principios de acción: ¿Se pueden eliminar las consecuencias? Si esto no es posible, ¿pueden mitigarse? ¿Cuáles son las posibles medidas de mitigación? ¿Las medidas de mitigación son desarrollables o aplicables desde el punto de vista de la ingeniería? ¿Cuáles son los beneficios de la reducción del riesgo?

INSTRUMENTOS DE POLITICA PARA EL TRATAMIENTO DEL RIESGO

El tratamiento del riesgo se puede clasificar en tres grupos: a) tratamiento estructural, que consiste en fortalecer las obras físicas expuestas a las amenazas, lo que en términos de reducción de riesgo significa reducir su vulnerabilidad; b) tratamiento no estructural destinado a reducir el impacto de una amenaza generando obras de protección, como por ejemplo áreas inundables; y c), tratamiento no estructural destinado a evitar la ocupación de áreas de riesgo, lo cual está estrechamente vinculado a la planificación del territorio.

Cada grupo da origen a actuaciones diferentes: Por ejemplo, el tratamiento estructural tiene directa relación con los diseños de ingeniería, las normativas de diseño de sistemas de infraestructura; la legislación relativa al diseño y construcción y las regulaciones y prácticas sectoriales sobre mantenimiento y actuación en emergencias. El tratamiento no estructural tiene relación con la legislación y planificación del territorio a nivel nacional, regional, y comunal. A continuación, se desarrollan a nivel general algunos de estos aspectos con ejemplos a nivel nacional.

Ámbito de gestión comunal

En el ámbito de gestión comunal, la subsecretaría de desarrollo regional y administrativo (SUBDERE) dependiente del Ministerio del Interior, promulgó mediante Resolución Exenta N° 8.513 de 2018, el Programa de Prevención y Mitigación de Riesgos. Este programa tiene por finalidad contribuir a que los municipios y a las asociaciones de municipios implementen medidas para prevenir y mitigar riesgos, fortaleciendo la gestión de riesgos de desastres a nivel local. Es por tanto un instrumento de política pública orientado al tratamiento de riesgos. Sus objetivos específicos son:

- Incorporar la Gestión del Riesgo de Desastres en los gobiernos locales,
- fortalecer las capacidades locales en prevenir situaciones de riesgo y de actuar ante eventuales emergencias y/o catástrofes,
- fortalecer la preparación para una respuesta oportuna y coordinada,
- gestionar la incorporación de la reducción de riesgo en la planificación comunal,
- generar estudios de riesgo, coherentes con política de protección civil,

En términos operativos, este instrumento utiliza la "Guía Práctica para Municipios: Elaboración de un Plan Comunal de Gestión de Riesgo de Desastres". Una de las comunas que se encuentra en proceso de aplicación de esta política Pública es San Pedro de la Paz, comuna que finalizó en el año 2018 el estudio "Actualización del Estudio de Riesgos Naturales y Antrópicos de San Pedro de la Paz". En dicho estudio se realizó un análisis multidimensional de riesgos y se propusieron medidas de mitigación para tsunami, inundaciones fluviales y anegamiento, erosión costera, remociones en masa, sismos, sequías o diversas amenazas antrópicas. Se calculó el nivel de vulnerabilidad y de exposición para posteriormente proponer medidas de mitigación clasificadas en:

- Medidas de carácter legislativo, relacionadas con propuestas de modificación al marco legal vigente en materia de ordenación del territorio y con ordenanzas municipales;
- medidas de gestión municipal y estudios, en materia de elaboración de estudios específicos como por ejemplo definición de zonas seguras, definición de vías de evacuación, conectividad vial durante emergencias, definición de estándares mínimos para albergues, formación de comités de protección civil, entre otras;

- medidas de educación y comunicación de riesgo tales como instrumentos de difusión de riesgos, capacitación comunitaria, cooperación con universidades, planes de simulacros; y
- medidas estructurales, tales como prevención de anegamientos, mejoramiento de alumbrado público, tratamiento de laderas, construcción de helipuertos, protección de riberas, sistemas de alerta meteorológica, entre otras.

Todas estas medidas de mitigación se traducen en iniciativas de inversión destinadas a mitigar el riesgo e incrementar la resiliencia de la comuna.

Evaluación de proyectos de infraestructura publica

Los proyectos de infraestructura pública, cualquiera sea su tipo y naturaleza, se evalúan económicamente para determinar su rentabilidad social. El Sistema Nacional de Inversiones del Ministerio de Desarrollo Social y Familia (MDS), utiliza metodologías de análisis beneficio - costo que permiten calcular dicha rentabilidad. Considerando los diversos tratados internacionales a los que está adscrito Chile y a la Política Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres del año 2016, el MDS publicó el año 2017 una "Metodología complementaria para la Evaluación de Riesgo de Desastre de Proyectos de Infraestructura Pública", de manera de internalizar los beneficios y costos de desarrollar infraestructuras más robustas. Es decir, permite determinar el beneficio social de mitigar el riesgo mediante diseños que involucran una mayor inversión, pero a su vez, reducen la vulnerabilidad de la infraestructura desde el diseño, al mismo tiempo que disminuyen las consecuencias de los potenciales daños. El marco conceptual de la metodología considera además el efecto de la resiliencia de la adopción de medidas de mitigación, como lo muestra la Figura 47.

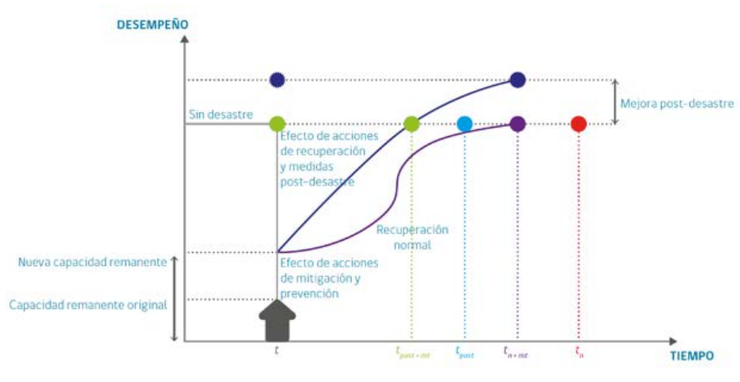


Figura 47: Efecto de las medidas de mitigación sobre el desempeño de una infraestructura (MDS, 2017).

La metodología de MDS (2017) selecciona en primer lugar diversas opciones de tratamiento de riesgos clasificadas en medidas de adaptación de infraestructura, de mitigación, y de relocalización. Posteriormente cada una de ellas las valora desde el punto de vista del efecto sobre la resiliencia aplicando modelos de cálculo multi-criterio. Luego las rankea, estima la magnitud de la inversión, y posteriormente aplica los análisis tradicionales de costo-eficiencia, costo anual equivalente y/o costo-beneficio según los modelos de análisis económico específicos para cada tipo de infraestructura en estudio.

La metodología de MDS es aplicable a evaluaciones de proyectos individuales a nivel de perfil, por lo cual posee limitaciones al momento de evaluar redes de infraestructura, infraestructuras lineales, grupos de infraestructuras de igual o diferente tipo interconectadas. Por lo tanto, no permite evaluar efectos de interacciones, sinergias en los costos y beneficios ni efectos cascada. En este sentido, una oportunidad de mejora relevante de esta metodología consiste en incrementar sus capacidades para capturar beneficios por intervenciones en territorios más que en proyectos de infraestructura uno a uno. Estos aspectos se encuentran declarados en los alcances de la metodología de MDS.

En cuanto a las amenazas, la metodología admite el análisis de amenazas hidro-meteorológicas, incendios forestales, tsunami, erupciones volcánicas y remociones en masa. La metodología plantea en sus alcances que en el caso de otras amenazas es tarea del analista estudiarlas e incluirlas caso a caso. Sin embargo, se debe considerar que de no existir procedimientos aproximadamente estandarizados para el estudio de amenazas o para definir umbrales de riesgo tolerables, es posible que los resultados no sean comparables.

Un aspecto a considerar también es la recurrencia disímil de cada tipo de amenaza. Esto plantea la necesidad de discriminar cual es el período de retorno (o recurrencia) que se utilizará para elaborar los diseños y cuantificación de los costos de cada medida de mitigación o recuperación. En la medida que los períodos de retorno son mayores, la magnitud de la amenaza se incrementa, el daño potencial aumenta y el costo de mitigación también, lo cual puede en algunos casos hacer inviable la inversión desde el punto de vista costo – beneficio. En este sentido, no basta definir umbrales de tolerancia de riesgo, sino que más bien debe existir una adecuada relación entre las medidas posibles de aplicar considerando su efecto físico sobre la reducción de vulnerabilidad y el costo /duración de mitigar.

Asimismo, un aspecto sensible en este tipo de evaluaciones es el horizonte de evaluación. Si bien en los proyectos tradicionales los horizontes de evaluación oscilan entre los 10 y 20 años, al analizar de manera inter-temporal los riesgos surge el inconveniente científico y práctico de predecir en el horizonte de evaluación cuándo se activará un evento natural. Este aspecto es crucial para evaluar la rentabilidad social, puesto que los flujos de costos y beneficios cambian sustancialmente si ocurre un evento al inicio del período de evaluación, al final, o si existe superposición. Una forma de atenuar el efecto de esta incertidumbre es aplicar un enfoque probabilístico al análisis beneficio costo.

ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO DEL TRATAMIENTO DE RIESGO

El análisis costos beneficio del tratamiento del riesgo tiene por objetivo determinar las medidas de intervención que minimicen el riesgo y maximicen la resiliencia de una infraestructura. Particularmente, en el ámbito de los tratamientos estructurales, existen dos posibles opciones: medidas de recuperación, que buscan mantener estable el nivel de riesgo actuando sobre la estabilización de la vulnerabilidad y de los costos de ocasionados por daños y de manera de mantener estable a lo largo del tiempo el desempeño de la infraestructura o sistemas. Las medidas de recuperación son de tipo expost. Es decir, se aplican una vez ocurrido un evento natural. Otra opción son las medidas de robustecimiento, que actúan también de manera ex post, pero reducen la vulnerabilidad de la infraestructura, reduciendo el riesgo, y permite al mismo tiempo una recuperación más rápida. En general, las medidas de re robustecimiento actúan como medidas de mitigación ante la ocurrencia de eventos futuros. Una tercera opción son las medidas de mitigación, que se aplican ex ante y cumplen la misma función que las medidas de robustecimiento. La elección de una u otra medida es materia de análisis económico, tomando en cuenta las condiciones de contexto de la infraestructura y las características locales de las amenazas a las cuales están expuestas.

La evaluación del beneficio de maximizar la resiliencia (o minimizar el riesgo) se conoce como economía de la resiliencia. Estudia el beneficio económico que implica invertir en robustecer la infraestructura, de manera

de lograr que ante un evento disruptor, la pérdida de desempeño sea lo más baja posible y el tiempo de recuperación lo más corto posible (Rose, 2004). Estudia además la habilidad de un sistema para mantenerse operando después de un evento disruptor y su velocidad de recuperación (Rose and Kraussman, 2013). Desde el punto de vista de la gestión del mantenimiento, permite seleccionar alternativas de recuperación, de robustecimiento y de aumento de estándar de desempeño, sujetas a restricción presupuestaria o a niveles de daño mínimos aceptables (Youn et al., 2011). Las decisiones pueden ser de tipo micro-económico, meso-económico o macro-económico (Rose, 2004).

Las últimas dos se refieren al impacto sobre sectores económicos específicos o sobre la economía en general de un país. El primer enfoque en tanto, se refiere específicamente al comportamiento de agentes individuales, y los usuarios directos y el impacto sobre ellos. En este ámbito se analiza el impacto económico de las decisiones de mantenimiento destinadas a recuperar una infraestructura dañada, mitigar el daño aumentando la robustez o reduciendo la probabilidad de falla (Rose, 2004).

Las decisiones de ingeniería que producen impacto económico son (Rose and Kraussman, 2013): robustecimiento de la infraestructura, redundancia de infraestructura, rapidez de recuperación y capacidad de intervención. Los costos asociados a la pérdida de resiliencia se clasifican en costos directos de recuperación, de operación y costos adicionales por externalidades.

El beneficio de las estrategias de recuperación de desempeño es el ahorro de estos costos. Un aspecto central en la evaluación del impacto económico de estas decisiones es la determinación del valor esperado de resiliencia, costos y beneficios de diversas estrategias de recuperación, sujetas al estándar de desempeño deseado. La resiliencia se define como la capacidad de un sistema para soportar el efecto de eventos disruptores de su operación y de recuperar rápidamente su desempeño luego de ocurrido un evento disruptor, con un costo mínimo (o beneficio máximo).

La resiliencia consolida los conceptos de robustez y tiempo de recuperación en un solo indicador, por lo cual resulta adecuada como criterio adicional al de beneficio económico para definir estrategias de recuperación de la infraestructura. Para ello se requiere una métrica que permita cuantificarla en términos determinísticos o probabilísticos o en términos de resiliencia estática o dinámica (Rose and Kraussman, 2013).

El análisis costo- beneficio del tratamiento del riesgo en la práctica, consiste en contrastar un escenario base de tratamiento (mitigación o recuperación) con un escenario alternativo. Para ello se calcula en cada escenario el costo anual equivalente en función de los costos operacionales, externalidades y costos de oportunidad. El horizonte de evaluación recomendado es variable, pero es recomendable utilizar períodos cortos de tiempo para sobrellevar la problemática de falta de capacidad predictiva de la ocurrencia de eventos disruptores.

Para el escenario base el costo anual equivalente (CAE) se calcula llevando a valor presente los costos de operación (COP), de la agencia encargada de operar la infraestructura (CAV) y de la comunidad (CS) para una tasa de descuento determinada. Para el escenario alternativo el cálculo es similar, pero considera los costos asociados a un nivel de servicio de la infraestructura superior a aquel asociado a la situación base.

El beneficio social se calcula como la diferencia entre el costo anual equivalente de la situación base respecto de cada escenario alternativo. Para ello se utiliza como indicados el valor social actual neto (VSAN). Si el VSAN es positivo, la aplicación de medidas destinadas a reducir la vulnerabilidad de la vía es socialmente rentable. En caso contrario, no lo es.

Las recomendaciones que surgen de esta evaluación son dos: (a) mantener las operaciones de emergencia año a año o (b) reforzar la infraestructura para reducir su vulnerabilidad. El primer caso se da cuando el beneficio social es negativo, independientemente de la reducción del índice de riesgo. El segundo caso se da cuando el VSAN es positivo. Si existe sólo una alternativa de tratamiento, la decisión es invertir. Por el contrario, si existe más de una alternativa técnica de intervención, se adopta el siguiente criterio, basado en el concepto de frontera de eficiencia para el caso de dos alternativas:

Caso 1: $VSAN_1 \approx VSAN_2$; En este caso se selecciona la alternativa de inversión que proporcione el mayor aumento en el índice de resiliencia.

Caso 2: $VSAN_1 \neq VSAN_2$; En este caso se debe dividir el beneficio social por el CAE asociado a cada una de las alternativas. Posteriormente se calculan las variaciones en los índices de resiliencia restando el índice de resiliencia de la situación base respecto del escenario alternativo "j".

En ambos casos el índice de resiliencia corresponde al inverso del área formada entre la curva de desempeño normal de la infraestructura y la curva de desempeño afectada por un evento natural La Figura 44 ilustra el índice de resiliencia para una situación base (Figura 48a) y para una alternativa de tratamiento de riesgo (Figura 48b). La diferencia entre índices de resiliencia corresponde a la diferencia de áreas (Figura 48c). De este modo, una alternativa será técnicamente factible cuando el incremento en IR es > 1. En caso contrario la alternativa no se evalúa económicamente puesto que no produce el efecto deseado.

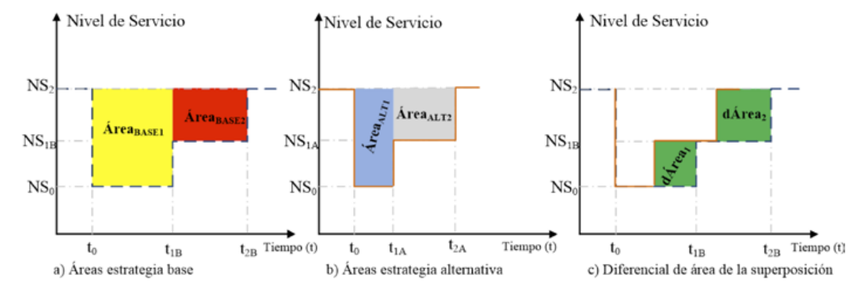


Figura 48: Modelo conceptual de evaluación técnica de alternativas (Echaveguren y Cartes, 2017).

En la Figura 48a NS_2 corresponde al nivel de servicio (NS) antes del evento; NS_0 es la caída en el NS cuando ocurre el evento; NS_{1B} es el NS recuperado una vez finalizadas obras de recuperación iniciales. En las Figuras 48b y 48c, los términos NS_k tienen el mismo significado. Por su parte, t_0 corresponde al instante de tiempo en el que ocurre el evento natural, t_{1B} corresponde al instante de tiempo en el que finaliza la obra de recuperación inicial; t_{2B} corresponde al instante de tiempo en el que finaliza totalmente la recuperación del NS. En las Figuras 48b y 48c, las variables t_k tienen el mismo significado.

La Figura 49 ilustra el modelo genérico de análisis costo – beneficio. La parte a) muestra dos escenarios de intervención (base y alternativo) con distintos resultados en el desempeño de una infraestructura. La figura b) ilustra el efecto en reducción de vulnerabilidad al aplicar el escenario alternativo y la figura c) ilustra el comportamiento de los costos de operación (COP), de la agencia (CAV) y de la comunidad (CS) en este caso se aprecia que implementar la medida de tratamiento de riesgos significa un ahorro en costos de operación y de la comunidad a pesar del incremento en gasto.

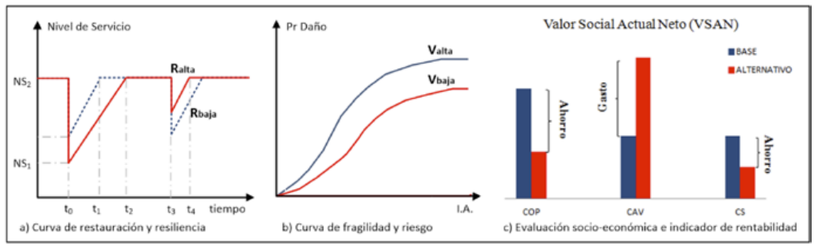


Figura 49: Relación entre desempeño, reducción de vulnerabilidad y costos (Echaveguren y Cartes, 2017).

CASO DE ESTUDIO: TRATAMIENTO DE RIESGO Y RESILIENCIA EN LA INFRAESTRUCTURA VIAL

El concepto de las medidas de mitigación y tratamiento del riesgo se puede adaptar al campo de la gestión de riesgos naturales que afecten el sistema de transporte de la siguiente manera: una medida de mitigación se define como una acción o grupo de acciones emprendida por una agencia vial destinada a: (a) recuperar o mejorar el nivel de servicio de una vía o red vial afectada por un evento natural una vez que se produce y modifica las condiciones de operación; (b) incrementar la robustez de la infraestructura para mejorar su desempeño en caso en que un evento natural la afecte, y (c), incrementar sistemática, programada y progresivamente la robustez de la infraestructura vial para adaptarla a condiciones ambientales progresivamente adversas, derivadas por ejemplo del cambio climático combinado con anomalías climáticas, lagunas sísmicas o efectos de cascada debido a peligros geológicos.

MODELO CONCEPTUAL DE MITIGACIÓN DE EVENTOS NATURALES SOBRE LA INFRAESTRUCTURA VIAL

El modelo general de mitigación para infraestructura vial consta de los siguientes componentes:

- Módulo de Daño Potencial, en el cual se determina el nivel de daño potencial en términos del número de pistas afectadas, de la longitud afectada y de la magnitud de dicho daño.
- Módulo de Estándares, en términos de las estrategias, operaciones y partidas de obra técnicamente factibles, caracterizadas por su curva de restauración.
- Módulo de Cálculo de Curvas de Restauración, en términos del nivel de servicio y del tiempo de recuperación.
- Módulo de Selección Técnica de Estándares y Estrategias, en términos de las que efectivamente incrementan la resiliencia en función del daño.
- Módulo de Evaluación Socio-económica en términos de la estimación de la rentabilidad social de las estrategias a aplicar y su efecto en la reducción de la resiliencia.

La Figura 50 ilustra la interacción de estos cinco módulos.

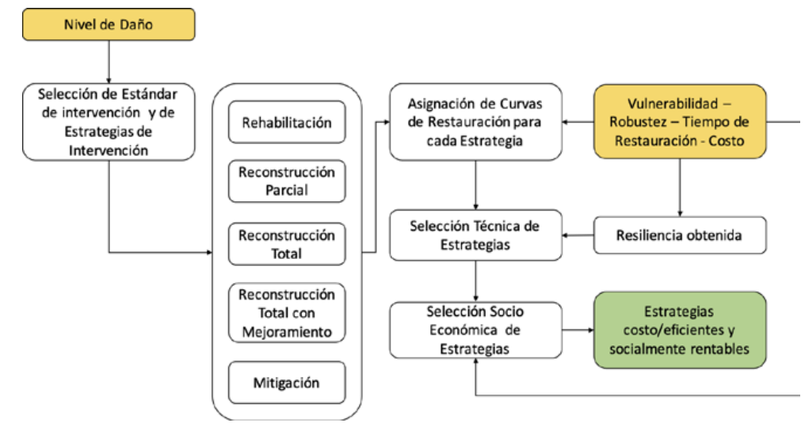


Figura 50: Esquema de componentes del modelo de mitigación (Echaveguren y Cartes, 2017).

ESCENARIOS DE ANALISIS DE MEDIDAS DE MITIGACION

Los escenarios de evaluación son las condiciones que permiten construir un perfil de proyecto y realizar la evaluación social de las alternativas. Se definen 2 escenarios: base y alternativo.

- Escenario base: Aplicación repetitiva de planes de contingencia, correspondientes a obras de rehabilitación de transitabilidad del tramo. Se considera una aplicación por año, por un horizonte de evaluación de 5 años.
- Escenario alternativo: Obras de reposición para mantener operando la ruta sin aumentar significativamente los costos de operación de los usuarios. El período de evaluación es también de 5 años. Dependiendo del caso, puede considerar un mantenimiento diferido o concentrado, por lo cual este escenario puede expandirse a diversas opciones de mantenimiento.

Los impactos sobre los usuarios de la ruta afectada, asociados a ambos escenarios, son los que permiten cuantificar los costos. Dependen de la condición de operación por la ruta afectada durante la emergencia. Estos son:

- Corte de camino: En este caso es obligatoria la circulación por una ruta alternativa que puede tener o no restricciones de operación, debido a las características de los puentes y/o a la calidad de la carpeta de rodadura. Este impacto se manifiesta en el escenario base o bien cuando es necesario implementar rutas alternativas mientras duren acciones de mantenimiento destinados a reducir la vulnerabilidad.
- Condiciones funcionales deficientes: En este caso el camino no se corta, pero el paso por la zona afectada se realiza con Restricción de Peso o de Ancho debido a las condiciones de las pistas habilitadas o a la presencia de desvíos. En este caso, al no necesitarse una ruta alternativa los costos de la comunidad se pueden soslayar. Este impacto se evalúa en la situación base mientras se ejecuten los trabajos de apertura del tramo. También se evalúa en el escenario alternativo

cuando las obras de mantenimiento destinadas a reducir la vulnerabilidad obligan a implementar desvíos.

- Operación normal: En este caso el camino o segmento de camino presenta una condición de operación sin interrupciones debido a condiciones distintas de aquellas debidas a la condición del camino en ausencia de eventos naturales y asociadas al diseño geométrico. Esta condición de operación se relaciona con el escenario alternativo, asumiendo que las obras ya están ejecutadas.

INDICADORES ECONOMICOS

Los indicadores para la evaluación de escenarios son el índice de resiliencia (IR) y el Valor Social Actual Neto (VSAN). Este último valor se deduce del costo anual equivalente (CAE), el cual a su vez incluye en el cálculo los costos de los usuarios (COP), los costos de la Dirección de Vialidad (CAV) y de la comunidad (CS).

El IR se calcula de acuerdo al modelo descrito en el capítulo anterior, teniendo en cuenta los diversos escenarios de evaluación. Para el escenario base el IR detallado considera el efecto acumulativo de 5 eventos al año durante 5 años. Este valor puede ajustarse dependiendo de los registros históricos de eventos naturales disponibles. En el escenario alternativo se consideran medidas de mitigación que reducen la vulnerabilidad, manteniendo la importancia estratégica constante. Las medidas de mitigación pueden ser rediseño de taludes, aplicación de elementos de estabilización o aplicación de elementos de protección.

La evaluación de los costos de los usuarios, se realiza en base a Echaveguren et al. (2000), que, si bien es una metodología elaborada para puentes, es extrapolable a la infraestructura vial. De acuerdo con esto, las opciones de costos sobre los usuarios asociados a los efectos relacionados con cada escenario son los indicados en la Tabla 5.

Tabla 5 Caracterización de costos a los usuarios asignados por tipo de efecto (Echaveguren *et al.*, 2012)

Efecto		Costo Asignado	Designación
Demoras (C_D)	Demoras por Reducción de Velocidad	Costo de Demoras RV	C_{RV}
	Demoras por Regulación de Paso	Costo de Demoras RP	C_{RP}
	Demoras por Detención	Costo de Demoras D	C_{DD}
Operación	Mayor Consumo de Insumos	Costo de Operación	C_{OP}
Tiempo de Viaje	Aumento de Tiempo de Viaje	Costo de Tiempo de Viaje	C_{TV}
Accidentes	Riesgo de Accidentes	Costo por Accidentes	C_{RA}
Re-ruteo	Restricción de Paso Vehículos Pesados	Costo de Operación + Costo de Tiempo de Viaje	$C_{OPR\text{-}VP}$ $C_{TVR\text{-}VP}$
	Restricción de Paso a Vehículos Livianos	Costo de Operación + Costo de Tiempo de Viaje	$C_{OPR\text{-}VL}$ $C_{TVR\text{-}VL}$
Sin Viaje	No se realiza el viaje	Costo de la comunidad	C_O

Los Costos de la Agencia Vial corresponden a: aquellos incurridos en la recuperación del nivel de servicio de la infraestructura afectada, a los costos de actuación en la emergencia o bien a los costos de aplicar planes de contingencia. Por último, los costos de la comunidad se calculan mediante indicadores cualitativos para cada escenario de evaluación. Cuando la operación de la ruta no es interrumpida en su totalidad, no representa una pérdida significativa de productividad para las actividades económicas, caso en el cual este costo no se evalúa. En caso contrario, es necesario determinar el costo de mantener productos en inventario, lo cual depende del negocio afectado, de la gestión de inventarios y de la naturaleza del producto (perecible / no perecible).

EVALUACIÓN DE ESCENARIOS

La evaluación de escenarios consiste en contrastar el escenario base con el escenario alternativo. Para ello se calcula en cada escenario el costo anual equivalente en función de los costos asociados a demoras, operación, accidentes, tiempo de viaje y costo de oportunidad. El horizonte de evaluación recomendado es de 5 años y la tasa social de descuento recomendada es del 6%.

Echaveguren ***et al.*** (2000) proponen una metodología para puentes extrapolable a infraestructura vial, donde caracterizan los costos a los usuarios asignados por tipo de efecto. Los costos de los usuarios (COP), correspondientes a aquellos incurridos por operación deficiente, en términos de los tiempos de viaje y consumo de insumos, son la suma de: los costos por demoras de reducción de velocidad (C_{RV}), por regulación de paso (C_{RP}), por aumento del tiempo de viaje por re ruteo (C_{TV}) y por aumento de insumos por re ruteo (C_{OP}).

a) Costos de demoras por reducción de velocidad:

$$C_{RV} = \left(\frac{L}{Vi} - \frac{L}{Vr}\right) V_h t_{RV} \sum VST_{TipoVeh}\, \%_{TipoVeh} \qquad (17)$$

donde, L es la longitud de zona de trabajo en km; Vi y Vr son la velocidad inicial y reducida en km/h; V_h es el volumen horario en veh/h, t_{RV} es el tiempo de reducción de velocidad en horas, $VST_{TipoVeh}$ es el valor social del tiempo de viaje de cada tipo de vehículo en $/veh-h, y $\%_{TipoVeh}$ es el porcentaje de cada tipo de vehículo.

b) Costos de demoras por regulación de paso:

$$C_{RP} = D_{RP} t_{RP} \sum VST_{TipoVeh}\, \%_{TipoVeh} \qquad (18)$$

donde, D_{RP} son las demoras totales por reducción de velocidad en veh-h/h, obtenidas de SIDRA INTERSECTIONS 5.1, t_{RP} es el tiempo de regulación de paso en horas, $VST_{TipoVeh}$ es el valor social del tiempo de viaje de cada tipo de vehículo en $/veh-h, y $\%_{TipoVeh}$ es el porcentaje de cada tipo de vehículo.

c) Costos de aumento de tiempo de viaje por re ruteo:

$$C_{TV} = \left(\frac{L_{ao}}{V_{ao}} - \frac{L_d}{V_d}\right) V_h t_{TV} \sum VST_{TipoVeh}\, \%_{TipoVeh} \qquad (19)$$

donde, L_{ao} y L_d son la longitud del arco original y desvío en km, V_{ao} y V_d son la velocidad de operación en arco original y desvío en km/h, V_h es el volumen horario en veh/h, t_{TV} es el tiempo de necesidad de re ruteo en horas, $VST_{TipoVeh}$ es el valor social del tiempo de viaje de cada tipo de vehículo en $/veh-h, y $\%_{TipoVeh}$ es el porcentaje de cada tipo de vehículo.

d) Costos de operación por mayor consumo de insumos por re ruteo:

$$C_{TV} = (L_{ao} - L_d)V_h t_{OP} \sum \frac{VSC_{TipoVeh}}{\eta_{TipoVeh}} \%_{TipoVeh} \quad (20)$$

donde, L_{ao} y L_d son la longitud del arco original y desvío en km, V_h es el volumen horario en veh/h, t_{OP} es el tiempo de necesidad de re ruteo en horas, $VSC_{TipoVeh}$ es el valor social del combustible de cada tipo de vehículo en $/litro, $\eta_{TipoVeh}$ es el rendimiento de cada tipo de vehículo en km/litro, y $\%_{TipoVeh}$ es el porcentaje de cada tipo de vehículo.

Los costos de la agencia vial (CAV) corresponden a los incurridos en la aplicación de las estrategias en evaluación, los que dependen de los costos unitarios de las operaciones y partidas que componen la estrategia y de la magnitud de obra requerida. El cálculo del CAV para un año es mostrado en la Ecuación 21.

$$CAV = \sum_{i=1}^{n} CU_i CO_i \quad (21)$$

donde, CU_i es el costo unitario de la partida i y CO_i es la cantidad de obra asociada a la partida i. Por último, la selección de estrategias de mitigación se realiza de acuerdo a lo descrito en el capítulo.

Para ejemplificar la evaluación de escenarios a través de los costos de usuarios y agencia vial, se analiza un tramo de la ruta de la madera (Ruta 156) de la Provincia de Concepción, el cual conecta las comunas de San Pedro de la Paz con Santa Juana y posee la característica de bordear el río Biobío, con alta presencia de taludes de cortes adyacentes a la calzada y la existencia de una sola ruta alternativa cercana.

Para el análisis de la amenaza, se considera un evento hidrometeoro-lógico que impide el tránsito en un tramo de 800 metros y se manifiesta cada 3 años. El evento ocurre a 24,5 km de San Pedro de la Paz y se muestra con una X en color rojo en la Figura 51. En la misma figura, se muestra la ruta de la madera (color amarillo), la cual tiene una extensión de análisis de 26,8 km y la ruta alternativa (color rojo) que tiene una extensión de 43,4 km.

Las consecuencias del evento corresponden a crecidas y deslizamientos. Las primeras producen una inundación de 300 metros de calzada, lo que produce el corte total del tránsito y el consecuente re ruteo por una duración de 6 horas. Por otro lado, el evento produce deslizamientos de suelo que provocan un corte en 500 metros de longitud en el camino, produciendo la inhabilitación de una de las pistas y la necesidad de regulación del paso a través de bandereros. La duración de esto último depende de la duración de la remoción de derrumbes

Figura 51: Tramo de la ruta 156 afectado por eventos hidrometeorológicos (Fuente: Google Maps).

Para la evaluación de diferentes escenarios se formulan cuatro estrategias de intervención, de las cuales una corresponde a un estándar de rehabilitación reactiva (estrategia base), dos que combinan aumento de robustez preventivo con rehabilitación reactiva y una de aumento de robustez preventiva, es decir de mitigación total. El periodo de análisis es de 5 años y los eventos ocurren en el año uno, tres y cinco. Las estrategias de intervención se resumen en la tabla 6.

Tabla 6: Estrategias de intervención ejemplo (Fuente: Cartes, 2017)

Estrategia	Estándar	Procedimientos, Operaciones y Partidas	Recurrencia	Efectos sobre la operación
Base (EB)	Rehabilitación	1.Esperar la inundación	1 vez cada 3 años	Interrupción total
		2. Remoción de derrumbes	1 vez cada 3 años	Regulación de paso
		3. Limpieza de sistemas de drenaje	1 vez cada 3 años	Sin efectos
1 (E1)	Aumento de robustez	1. Construcción de 300 metros de gaviones	1 vez el primer año	Regulación de paso y reducción de velocidad
	Rehabilitación	1. Remoción de derrumbes	1 vez cada 3 años	Regulación de paso
		2. Limpieza de sistemas de drenaje	1 vez cada 3 años	Sin efectos
2 (E2)	Aumento de robustez	1. Construcción de 500 metros de rejas de contención	1 vez al primer año	Regulación de paso y reducción de velocidada
	Rehabilitación	1. Esperar la inundación	1 vez cada 3 años	Interrupción total
		2. Limpieza de sistemas de drenaje	1 vez cada 3 años	Sin efectos
3 (E3)	Mitigación	1. Construcción de 300 metros de gaviones	1 vez al primer año	Regulación de paso y reducción de velocidad
		2. Construcción de 500 metros de rejas de contención	1 vez al primer año	Regulación de paso y reducción de velocidad
	Rehabilitación	Limpieza de sistemas de drenaje	1 vez cada 3 años	Sin efectos

Para cada una de las estrategias mencionadas anteriormente se calcula los costos anuales de la agencia vial (CAV), los costos operacionales de los usuarios (COP) y posteriormente se puede obtener el costo anual equivalente y decidir la estrategia más rentable. Por otro lado, para cada una de las estrategias de se calcula la curva de restauración y por lo tanto, la resiliencia esperada. Los datos de tránsito son obtenidos del censo de vialidad del año 2014, actualizado al año 2016 se obtuvo que el tramo de análisis posee un Tránsito Medio Diario anual (TMDA) de 11.775 veh/día-año, con un porcentaje de vehículos pesados de 15,6%. Por otro lado, la ruta alternativa tiene un TMDA de 1.460 veh/día-año en el sector de la ruta O-852 y 43.909 veh/día-año para el sector de la ruta 160.

Por último, una vez obtenido los costos de cada estrategia y la resiliencia esperada, se puede analizar el beneficio-costo de cada una y decidir de acuerdo a la metodología mencionada. La tabla 7 resume los valores de cada una de las estrategias en comparación con la estrategia base (EB).

Tabla 7: Resumen de costos y beneficio para estrategias de intervención (Cartes, 2017)

Estrategia de intervención	VSAN (Ei - EB) ($)	CAE (Ei) ($)	VixdRj
E1	36.725.235	379.552.741	0,12
E2	136.110.335	280.167.640	2,43
E3	199.567.054	216.710.922	Máxima

Por lo tanto, en este caso de estudio, la estrategia de intervención Nº 3 presenta el mayor beneficio en términos de resiliencia por costo.

SECCIÓN 8: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Este documento hace un recorrido completo por distintos aspectos conceptuales y de cuantificación del riesgo y la resiliencia del entorno construido, cubriendo principalmente desde el caso de edificaciones individuales, pasando por infraestructuras críticas, hasta escalas más grandes de ciudades completas. En la Sección 1, se introducen los principales conceptos de la disciplina del riesgo a amenazas naturales de ocurrencia eventual. Estos conceptos incluyen la descripción básica de algunas amenazas, modelos de exposición, funciones de fragilidad y vulnerabilidad, y la resiliencia y el riesgo. Luego, la Sección 2 está dedicada a explicar de la forma más sencilla posible en que consiste cuantificar el riesgo y la resiliencia en un sistema físico, e incluye un ejemplo sencillo para permitir al lector más interesado en los detalles, comprender algunos de los aspectos centrales que comprende dicha evaluación. La Sección 3 se dedica explícitamente a presentar los conceptos y realidad del cambio climático en Chile y los efectos más relevantes en relación al riesgo y resiliencia de la infraestructura en Chile. Incluye algunas ideas sobre la infraestructura para la provisión de agua, y los servicios de infraestructura para la protección frente a amenazas derivadas del cambio climático. La Sección 4 se enfoca en la descripción, bajo el prisma del riesgo y la resiliencia, el comportamiento de las redes críticas, en particular cuatro de ellas que son claves a la hora de entender la resiliencia de una sociedad, como son la red eléctrica, de agua, de transporte y de salud de urgencia. Para estas redes se presentan aspectos de su modelamiento y análisis y se describen diferentes métricas de resiliencia y riesgo en ellas. La Sección 5 es un repaso histórico de lo que ocurrió hace diez años con el gran terremoto del 27-F en el 2010, pero bajo poniendo un énfasis en el riesgo y la resiliencia de los distintos sistemas e infraestructuras. La Sección 6 presenta el escalamiento al contexto de ciudades, un aspecto que no solo introduce una escala dimensional mayor, sino una serie de complejidades debido a las múltiples dimensiones que condicionan tanto el riesgo como la resiliencia en un sistema integrado físico-social. La Sección 7, presenta el concepto de tratamiento del riesgo y su mitigación, y entra en mayor profundidad usando la aplicación de las redes de transporte. Finalmente, la Sección 8 describe las principales conclusiones de este Capítulo.

Tal vez uno de los aspectos centrales de este capítulo busca llamar la atención de los tomadores de decisión y a los equipos profesionales encargados del diseño de un proyecto, sobre la necesidad de considerar la resiliencia y el riesgo a amenazas naturales como una variable de diseño en sus proyectos. En este sentido es fundamental que se incorporen los conceptos de riesgo y resiliencia en el ciclo de vida de los proyectos, desde una primera etapa de conceptualización (etapas de desarrollo de idea, perfil y prefactibilidad), etapas críticas como la de diseño definitivo, hasta la fase de operación. Si bien se han hecho esfuerzos importantes en actualizar normativas e instrumentos regulatorios como consecuencia de eventos extremos, en la actualidad sigue existiendo una brecha importante entre proyectos nuevos y aquella infraestructura en operación.

El costo de no hacerlo, o hacerlo implícitamente a través de la ordenanza y normas vigentes, es conocido por todos y alcanza esencialmente a un gasto equivalente anual del orden 1,2% del PIB. Cualquier liberación de estos recursos va en ayuda y crecimiento directo de nuestro país, pero evidentemente requiere de inversión para que ello ocurra. Estudios económicos hechos por la Comisión de Resiliencia CREDEN muestran un retorno de la inversión en este aspecto del orden de 2,3 veces. Así y todo, parte importante de los estudios desarrollados a la fecha dan cuenta del costo directo asociado a las consecuencias de eventos extremos, siendo un desafío abordar las externalidades y costos intangibles debidos a consecuencias socio-económicas de mediano y largo plazo.

La inversión pública para lograr niveles adecuados de resiliencia y riesgo en las infraestructuras del país frente a amenazas naturales extremas debe ser considerada explícitamente en los modelos de evaluación económico-social que promueve el Ministerio de Desarrollo Social, los cuales deben ser aplicados por las entidades técnicas a cargo de los proyectos bajo evaluación. La metodología propuesta por el MDS en 2017 es un interesante punto de partida para incluir en el Sistema Nacional de Inversiones los conceptos de riesgo y resiliencia. Sin embargo, se debe aclarar que esta metodología considera la evaluación de proyectos individuales a nivel de perfil, perdiendo la relevancia que requiere la evaluación del riesgo a nivel de red, especialmente crítico en infraestructuras lineales y redes interdependientes emplazadas en contextos espaciales, territoriales y sociales diversos. Por lo mismo, se requiere la consolidación de una metodología debidamente validada por evidencia científica que permita a la autoridad comparar proyectos y los efectos de distintas alternativas de mitigación sobre redes emplazadas en contextos diversos, y así considerar consistentemente el beneficio social que tiene una mayor resiliencia para el país. En este sentido es fundamental que los Ministerios a cargo de la operación y regulación de líneas vitales e infraestructura crítica incorporen la gestión del riesgo y el tratamiento de éste en sus procedimientos, metodologías e instrumentos regulatorios.

En cuanto a la inversión privada para lograr niveles de resiliencia mayor en las infraestructuras que se ofrecen al mercado, es imprescindible desarrollar un modelo de negocio, ya sea a través de productos de seguros u otro esquema financiero alternativo, que permita al inversionista recuperar el valor de dicha inversión en resiliencia que, es evidente, le genera mayor valor al usuario. La seguridad tiene un claro valor monetario, y por ende el modelo debe ser capaz de compartir ese valor entre usuarios y desarrolladores.

Los niveles de inversión requeridos para lograr un efecto visible en la resiliencia de la infraestructura pública y privada existente y futura en el país es materia de estudio actualmente, pero es de esperar que en un futuro documento dichos niveles puedan ser expresados al menos con ejemplos concretos en las distintas redes y categorías de infraestructuras, incluido el sector vivienda. Es importante notar que si bien el gasto anual equivalente de 1,2% del PIB es un gasto recurrente, cualquier inversión en resiliencia en un proyecto se hace en general por el ciclo de vida completo del proyecto, lo que permite amortizar dicha inversión en el tiempo. Naturalmente, la inversión en mayor resiliencia debe llegar no solo a las nuevas infraestructuras, sino también a los sistemas existentes, a través de una estrategia y política de mejoramiento estructural y funcional de estos sistemas.

Existe una capacidad instalada en el país entre el estado, la industria y las universidades para cambiar este modelo de desarrollo de la infraestructura nacional hacia una mayor resiliencia. No es razonable, ni ético, que el riesgo a amenazas naturales extremas sea parcialmente considerado y quede implícito en las normativas existentes, ya que existen grandes asimetrías de información entre los distintos actores. A ello se suma la asimetría en el conocimiento de las diversas amenazas y sus efectos en las infraestructuras, como es el caso del cambio climático y la necesidad de revisión de normativas vigentes. Naturalmente una solución es la adecuación de las distintas normas que sean exigidas para el desarrollo de un proyecto, pero otro modelo es a través de incentivar la inversión en resiliencia mediante esquemas en que el mayor costo sea compartido por todas las partes involucradas.

Una mayor resiliencia en la infraestructura del país frente a grandes amenazas naturales es una herencia muy positiva que la generación actual puede dejar a las generaciones futuras. La capacidad de anticipar los devastadores efectos de las grandes amenazas que con certeza ocurrirán en nuestro territorio en el futuro, tiene una solución muy concreta hoy, y en esto no hay incertidumbre porque vivimos en una tierra que está expuesta continuamente a estas grandes amenazas naturales. Además, siendo Chile un país reconocido mundialmente por su cuidado en las normativas constructivas, esta es un área donde el país puede mostrar un gran liderazgo a nivel mundial, lo que más allá de crear un sano orgullo y una meta a nivel nacional, va

a significar concretamente la atracción de una mayor inversión pública y privada para la modernización del país. En esto, cada proyecto y cada actor es relevante, ya que la resiliencia del entorno construido depende de todos estos actores como en una gran cadena secuencial de factores.

REFERENCIAS

SECCIÓN 1

Alcántara-Ayala, I (2002). Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. Geomorphology, 47, 107 – 124.

Cashina, P., Mohaddesb, K. y Raissi, M. 2015. "Fair Weather or Foul? The Macroeconomic Effects of El Niño". WP/15/89 IMF Working Papers. http://www.econ.cam.ac.uk/people/cto/km418/GVAR_El_Nino.pdf último acceso 20 enero 2018.

Chen, H.X. and Zhang, L.M. (2015). EDDA 1.0: integrated simulation of debris flow erosion, deposition and property changes. Geosci. Model Dev., 8, 829–844.

Ciencia para el Desarrollo (Comisión Presidencial Ciencia para el Desarrollo de Chile). 2015. Un sueño compartido para el futuro de Chile. Informe a la Presidenta de la República Michelle Bachelet.

CNID (Consejo Nacional de Innovación para el Desarrollo). 2017. "Ciencias, Tecnología e Innovación para un nuevo pacto de desarrollo sostenible e inclusivo". http://www.cnid.cl/wp-content/uploads/2017/05/CTI-para-un-nuevo-pacto-de-desarrollo-CNID-2a-edicion.pdf último acceso 20 enero 2018.

Consultora de Educación Superior Verde Limitada. 2013. Estudio de Formación y Desarrollo de Capital Humano, Informe Final. Estudio encargado por el Ministerio de Educación a través de la Licitación Pública No 592-130-LP11.

CREDEN (Comisión de Resiliencia Frente a Desastres de Origen Natural). 2016. Hacia un Chile Resiliente frente a Desastres. Una Oportunidad. Informe a la Presidenta de la República Michelle Bachelet. http://www.cnid.cl/wp-content/uploads/2016/12/CREDEN-27122016-2.pdf último acceso 20 enero 2018.

de la Llera, J.C., Rivera, F., Mitrani-Reiser, J., Jünemann, R., Fortuño, C., Ríos, M., Hube, M., Santa María, H. y Cienfuegos, R. 2017. "Data collection after the 2010 Maule earthquake in Chile". Bulletin of Earthquake Engineering 15(2):555-588.

Dilley, M., Chen, R.S., Deichmann, U., Lerner-Lam, A.L., Arnold, M., Agwe, J., Buys, P., Kjevstad, O., Lyon, B., Yetman, G. 2005. "Natural disaster hotspots: A global risk analysis". Report No. 34423. The World Bank. http://documents.worldbank.org/curated/en/621711468175150317/Natural-disaster-hotspots-A-global-risk-analysis último acceso 20 enero 2018.

Frenken, K., Oort, F. V. y Verburg, T. 2007. Related variety, unrelated variety and regional economic growth. Regional Studies 41(5), 685–697.

G20/OECD. 2012. "G20/OECD methodological framework on disaster risk assessment and risk financing – OECD". http://www.oecd.org/gov/risk/g20oecdframeworkfordisasterriskmanagement.htm último acceso 20 enero 2018.

Gil, M. 2016. Catastrophe and State Building: Lesson´s from Chile´s Seismic History. Tesis para optar al grado de Doctor en Sociología. Universidad de Columbia, EE.UU.

Gobierno de Chile. Sin fecha. Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2017-2022. http://portal.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/07/plan_nacional_climatico_2017_2.pdf último acceso 20 enero 2018.

Hartmann, D. 2014. "Economic Complexity and Human Development: How Economic Diversification and Social Networks Affect Human Agency and Welfare". New York: Routledge.

Holling, C.S. 1973. "Resilience and Stability of Ecological Systems". Annual Review of Ecology and Systematics 4:1-23.

Instituto Nacional de Hidráulica, INH (2013). Construcción Mitigación Riesgos Volcánicos y Geológicos Asociados, Comunas de Villarrica, Pucón y Curarrehue, Región de la Araucanía. Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas.

Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, Resultados Preliminares IV Encuesta Nacional sobre Gasto y Personal en I+D, enero 2015. Presentación disponible en http://www.economia.gob.cl/wp-content/uploads/2015/01/Presentaci%C3%B3n-I-D-2013p_prensa.pdf

MMC (Multihazard Mitigation Council). 2005. "Natural Hazard Mitigation Saves: An Independent Study to Assess the Future Savings from Mitigation Activities". National Institute of Building Sciences. Washington, D.C. https://www.floods.org/PDF/MMC_Volume1_FindingsConclusionsRecommendations.pdf último acceso 20 enero 2018.

Moreno, H. (2015). El Volcán Villarrica y su actividad. Pucón, Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería.

ONEMI (Oficina Nacional de Emergencia). 2015. "Análisis Multisectorial Eventos 2015. Evento Hidrometeorológico Marzo – Terremoto/Tsunami Septiembre". Comité Científico Técnico ONEMI. http://repositoriodigitalonemi.cl/web/handle/2012/1744 último acceso 20 enero 2018.

ONEMI (Oficina Nacional de Emergencia). 2016a. Política Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. http://repositoriodigitalonemi.cl/web/bitstream/handle/2012/1710/POLITICA_NAC_2016_ESP.pdf?sequence=6 último acceso 19 enero 2018.

ONEMI (Oficina Nacional de Emergencia). 2016b. Plan Estratégico Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres 2015-2018. https://siac.onemi.gov.cl/documentos/PLAN_ESTRATEGICO_BAJA.pdf último acceso 19 enero 2018.

Rose, A. 2017. "Defining Resilience across Disciplines". Defining and Measuring Economic Resilience from a Societal, Environmental and Security Perspective. Págs 19-27. Springer.

Ruegg, J.C., Rudloff, A., Vigny, C., Madariaga, R., de Chabalier, J.B., Campos, J., Kausel, E., Barrientos, S., Dimitrov, D. 2009. "Interseismic strain accumulation measured by GPS in the seismic gap between Constitución and Concepción in Chile". Physics of the Earth and Planetary Interiors 175(1-2):78–85.

SVS (Superintendencia de Valores y Seguros). 2012. Análisis e Impacto del 27-F en el Mercado Asegurador. http://www.cmfchile.cl/portal/publicaciones/610/articles-15031_doc_pdf.pdf último acceso 20 enero 2018.

UNISDR (Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres). 2005. Marco de Acción de Hyogo para 2005-2015: Aumento de la Resiliencia de las Naciones y Comunidades ante los Desastres. Conferencia Mundial sobre la Reducción de los Desastres. Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (UNISDR).

UNISDR (Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres). 2015a. Global assessment report on disaster risk reduction. United Nations. https://www.preventionweb.net/english/hyogo/gar/2015/en/home/GAR_2015/GAR_2015_1.html último acceso 20 enero 2018.

UNISDR (Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres). 2015b. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030. http://www.unisdr.org/files/43291_sendaiframeworkfordrren.pdf último acceso 20 enero 2018.

Waitt, R. B. (2013). Lahar. In Encyclopedia of Natural Hazards (pp. 579-580). Dordrecht, Netherlands: Springer.

Wilson, G., Wilson, T., Deligne, N. & Cole, J. (2014). Volcanic hazard impacts to critical infrastructure: A review. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 286, 148-182.

SECCIÓN 2

Bruneau M, Reinhorn A (2007). Exploring the concept of seismic resilience for acute care facilities. Earthquake Spectra. 23(1):41–62.

Christou, V., Bocchini, P., Miranda, M. J., & Karamlou, A. (2018). Effective sampling of spatially correlated intensity maps using hazard quantization: Application to seismic events. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, 4(1), 04017035.

D'Lima, M., Medda, F. (2015). A new measure of resilience: An application to the London underground. Transportation Research Part A.

Decò A, Frangopol DM (2013). Life-cycle risk assessment of spatially distributed aging bridges under seismic and traffic hazards. Earthquake Spectra. 29(1):1–27.

Espinoza, S., Poulos, A., Rudnick, H., de la Llera, J. C., Panteli, M., Mancarella, P., Sacaan, R., Navarro, A., Moreno, R. (2017). Seismic resilience assessment and adaptation of the Northern Chilean Power System. In 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Chicago, IL.

FEMA (2015). Hazus MH MR5, Multi-hazard Loss Estimation Methodology, Earthquake Model, Technical Manual. Federal Emergency Management Agency, Washington D.C.

Francis, R., Bekera, B. (2014). A metric and frameworks for resilience analysis of angineered and infrastructure systems. Reliability Engineering and System Safety 121, 90-103.

Fu, G., Wilkinson, S., Dawson, R. J., Fowler, H. J., Kilsby, C., Panteli, M., & Mancarella, P. (2018). Integrated Approach to Assess the Resilience of Future Electricity Infrastructure Networks to Climate Hazards. IEEE Systems Journal, 12(4), 3169-3180.

Han, Y., & Davidson, R. A. (2012). Probabilistic seismic hazard analysis for spatially distributed infrastructure. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 41(15), 2141-2158.

Ioannou, I., Aspinall, W., Rush, D., Bisby, L., & Rossetto, T. (2017). Expert judgment-based fragility assessment of reinforced concrete buildings exposed to fire. Reliability Engineering & System Safety, 167, 105-127.

Jayaram, N., & Baker, J. W. (2010). Efficient sampling and data reduction techniques for probabilistic seismic lifeline risk assessment. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 39(10), 1109-1131.

Kiremidjian A. S., Stergiou E., & Lee R. (2007). Issues in Seismic Risk Assessment of Transportation Networks. In K. D. Pitilakis (Ed.), Earthquake Geotechnical Engineering (pp. 461-480). Dordrecht: Springer.

Kong, K., Simonovic, S. (2019). Probabilistic multiple hazard resilience model of an interdependent infrastructure system. Risk Analysis, Vol 39.

LaRocca, S., Johansson, J., Hassel, H., & Guikema, S. (2015). Topological performance measures as surrogates for physical flow models for risk and vulnerability analysis for electric power systems. Risk Analysis, 35(4), 608-623.

Li, Y., Lence, B. (2007). Estimating Resilience of Water Resources Systems. Water Resources.vol. 43.

Ouyang, M., Dueñas-Osorio, L., Min, X. (2012). A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems. Structural Safety 36-37: 23-31.

Poulos, A., Espinoza, S., de la Llera, J. C., & Rudnick, H. (2017, January). Seismic risk assessment of spatially distributed electric power systems. In 16th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile.

Sadeghi, M., Hosseini, M., & Lahiji, N. P. (2012). Developing fragility curves for seismic vulnerability assessment of tubular steel power transmission tower based on incremental dynamic analysis. In 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal.

Shinozuka, M., Feng, M. Q., Lee, J., & Naganuma, T. (2000). Statistical analysis of fragility curves. Journal of engineering mechanics, 126(12), 1224-1231.

Tran, H. T., Balchanos, M., Domerc ant, J., & Mavris, D. N. (2017). A framework for the quantitative assessment of performance- based system resilience. Reliability Engineering & System Safety, 158, 73–84.

Zhao, S., Liu, X., & Zhuo, Y. (2017). Hybrid hidden Markov mod- els for resilience metrics in a dynamic infrastructure system. Re- liability Engineering and System Safety, 164, 84–97.

SECCIÓN 3

Aránguiz R. et al. (2016). The 16 September 2015 Chile Tsunami from the Post-Tsunami Survey and Numerical Modeling Perspectives. In: Braitenberg C., Rabinovich A. (eds) The Chile-2015 (Illapel) Earthquake and Tsunami. Pageoph Topical Volumes. Birkhäuser, Cham.

Arriagada, L., Rojas, O., Arumí, J.L, Munizaga, J., Rojas, C., Farias, L., and Vega, C. (2019). A new method to evaluate the vulnerability of watersheds facing several stressors: A case study in mediterranean Chile. Science of The Total Environment, 651, 1.

Bambach, N., Morales-Moraga, D. & Meza, F. 2019. Tendencias y proyecciones de cambio climático. En Cambio Climático en Chile: Ciencia, Mitigación y Adaptación. Castilla, J. C., Meza, F., Vicuña, S., Marquet, P. A., Montero, J.-P. (eds.). Ediciones UC. Santiago, Chile, 2019, p. 480.

Bozkurt, D., Rojas, M., Boisier, J. P., and Valdivieso, J. (2018). Projected hydroclimate changes over Andean basins in central Chile from downscaled CMIP5 models under the low and high emission scenarios. Climatic Change 150, 131–147. https://doi.org/10.1007/s10584-018-2246-7

Carrasco, J. F., Casassa, G., & Quintana, J. (2005). Changes of the 0 °C isotherm and the equilibrium line altitude in central Chile during the last quarter of the 20th century. Hydrological Sciences Journal, 50(6), 933-948.

Carvajal, M., Contreras-López, M., Winckler, P. et al. (2017) Meteotsunamis Occurring Along the Southwest Coast of South America During an Intense Storm. Pure Appl. Geophys. 174, 3313–3323.

Castro, L., Gironás, J., Escauriaza, C., Barría, P. & Oberli, C. (2019). Meteorological characterization of floods in a mountainous poorly gauged catchment using principal component analysis. Journal of Hydrologic Engineering, 24(11) 05019027.

Catalán, PA, Aránguiz, R, González, G, Tomita, T, Cienfuegos, R, González, J, Shrivastava, MN, Kumagai, K, Mokrani, C, Cortés, P, and Gubler, A (2015), The 1 April 2014 Pisagua tsunami: Observations and modeling. Geophys. Res. Lett., 42, 2918– 2925.

Demaria, E.M.C., Maurer, E.P., Thrasher, B., Vicuña, S. and Meza, F.J. (2013). Climate change impacts on an alpine watershed in Chile: Do new model projections change the story? Journal of Hydrology 502:128-138.

Di Castri, F., & Hayek, E. (1976). Bioclimatología de Chile. Santiago, Universidad Católica de Chile.

Dussaillant, A., Benito, G., Buytaert, W., Carling, P., Meier, C., & Espinoza, F. (2010). Repeated glacial-lake outburst floods in Patagonia: an increasing hazard? Natural Hazards, 54(2), 469-481.

Fritz, H.M., Petroff, C.M., Catalán, P.A. et al. (2011). Field Survey of the 27 February 2010 Chile Tsunami. Pure Appl. Geophys. 168, 1989–2010.

Garreaud, R. (2013). Warm winter storms in Central Chile. Journal of Hydrometeorology, 14(5), 1515-1534.

Harper, T.G. McLeod, H. N., Davies, M. P (1992). Seismic Assessment of Tailings Dams. Civil Engineering, 62(12), 64.

Iribarren-Anacona, P., Mackintosh, A., & Norton, K. P. (2015). Hazardous processes and events from glacier and permafrost areas: lessons from the Chilean and Argentinean Andes. Earth Surface Processes and Landforms, 40(1), 2-21.

IPCC (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 págs.

Jacquet, J., McCoy, S. W., McGrath, D., Nimick, D. A., Fahey, M., O'kuinghttons, J., Friesen, B. A., & Leidich, J. (2017). Hydrologic and geomorphic changes resulting from episodic glacial lake outburst floods: Rio Colonia, Patagonia, Chile. Geophysical Research Letters, 44(2), 854-864.

Mandujano, F., & Rodríguez, J. C. (2016). La catástrofe del 2008 en la provincia de Palena: Reflexiones sobre sus particularidades e impacto en la patagonia occidental (The 2008 catastrophe in the province of Palena: Reflections on its particularities and impact in western Patagonia). Magallania, 44(2), 69-85.

Martínez, C., Contreras-López, M., Winckler, P., Hidalgo, H., Godoy, E., and Agredano, R. (2018) Coastal erosion in central Chile: A new hazard?. Ocean & Coastal Management, 156.

Mazzorana, B., Picco, L., Rainato, R., Iroumé, A., Ruiz-Villanueva, V., Rojas, C., ... & Melnick, D. (2019). Cascading processes in a changing environment: Disturbances on fluvial ecosystems in Chile and implications for hazard and risk management. Science of the Total Environment, 655, 1089-1103.

Meza, F. J., Vicuña, S., Jelinek, M., Bustos, E., & Bonelli, S. (2014). Assessing water demands and coverage sensitivity to climate change in the urban and rural sectors in central Chile. Journal of Water and Climate Change, 5(2), 192-203.

Ministerio de Medio Ambiente (MMA) (2017). Tercera Comunicación Nacional de Chile ante Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Santiago, Chile.

Ministerio del Medio Ambiente (MMA) (2019). Volumen 1: Amenazas, en "Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile", Documento preparado por: Winckler, P.; Contreras-López, M.; Vicuña, S.; Larraguibel, C.; Mora, J.; Esparza, C.; Salcedo, J.; Gelcich, S.; Fariña, J. M.; Martínez, C.; Agredano, R.; Melo, O.; Bambach, N.; Morales, D., Marinkovic, C.; Pica, A., Santiago, Chile. Recuperado de: https://cambioglobal.uc.cl/proyectos/272-determinacion-del-riesgo-de-los-impactos-del-cambio-climatico-en-las-costas-de-chile

Ministerio de Obras Públicas (MOP) (2018). Diagnóstico de la vulnerabilidad de las obras del MOP y medidas de adaptación al cambio climático. Preparado por DEUMAN. [Documento en línea]. Recuperado de: http://www.dgop.cl/centro_documental/Documents/VulnerabilidadObrasMOPyMedidasdeAdaptacionalCCMOP.pdf

Montecino, H.D., de Freitas, S.R.C., Báez, J.C., and Ferreira, V.G. (2017). Effects on Chilean Vertical Reference Frame due to the Maule Earthquake co-seismic and post-seismic effects, Journal of Geodynamics, 112.

Muñoz, A.A., Klock-Barría, K., Alvarez-Garreton, C., Aguilera-Betti, I., González-Reyes, Á., Lastra, J.A., Chávez, R.O., Barría, P., Christie, D., Rojas-Badilla, M. y LeQuesne, C. (2020). Water Crisis in Petorca Basin, Chile: The Combined Effects of a Mega-Drought and Water Management. Water, 12(3), 648.

Peña, H., & Escobar, F. (1987). Análisis del Aluvión de Mayo de 1985 del río Manflas: cuenca del río Copiapó (Analysis of the May 1985 Manflas river Flood: Copiapó river basin). Dirección General de Aguas. Santiago, Chile.

http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/2672/DGA045.pdf

Peña, H., & Klohn, W. (1990). Hidrología de desastres en Chile; crecidas catastróficas recientes de origen no meteorológico (Hydrology of disasters in Chile; recent catastrophic floods of non meteorological origin). Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, 5(1), 21-38.

Rojas, O., Mardones, M., Arumí, J. L., & Aguayo, M. (2014). Una revisión de inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: causas, recurrencia y efectos geográficos (A review of fluvial floods in Chile, period 1574-2012: causes, recurrency and geographic effects). Revista de Geografía Norte Grande, (57), 177-192.

Rojas, X., Munizaga, J., Rojas, O., Martínez, C., and Pino, J. (2019). Urban development versus wetland loss in a coastal Latin American city: Lessons for sustainable land use planning. Land Use Policy, 80.

Schneider, W., Donoso, D., Garcés-Vargas, J. y Escribano, R. (2017). Water-column cooling and sea surface salinity increase in the upwelling region off central-south Chile driven by a poleward displacement of the South Pacific High. Progress in oceanography, 151, 38-48.

Soto, M. V., Sarricolea, P., Sepúlveda, S. A., Rodolfi, G., Cabello, M., & Maerker, M. (2017). Assessment of hydro-geomorphological hazard potentials in the Chilean semiarid coastal range and its impacts on La Serena city, Coquimbo Region. Natural Hazards, 88(1), 431-452.

Tockner, K., Lorang, M. S., & Stanford, J. A. (2010). River flood plains are model ecosystems to test general hydrogeomorphic and ecological concepts. River Research and Applications, 26(1), 76-86.

Tonon, A., Iroumé, A., Picco, L., Oss-Cazzador, D., & Lenzi, M. A. (2017). Temporal variations of large wood abundance and mobility in the Blanco River affected by the Chaitén volcanic eruption, southern Chile. Catena, 156, 149-160.

Vicuña, S., McPhee, J., and Garreaud, R. D.,2011. Agriculture vulnerability to climate change in a snowmelt-driven basin in semiarid Chile. Journal of Water Resources Planning and Management, 138(5), 431-441.

Vicuña, S., Gironás, J., Meza, F.J., Cruzat, M.L., Jelinek, M., Bustos, E., Poblete, D. and Bambach, N., 2013. Exploring possible connections between hydrological extreme events and climate change in central south Chile. Hydrological sciences journal, 58(8), pp.1598-1619.

Winckler, P., Contreras-López, M., Campos-Caba, R., Beyá, J., & Molina, M. (2017). The storm of August 8, 2015 in the regions of Valparaíso and Coquimbo, Central Chile. Latin American Journal of Aquatic Research, 45(4), 622-648.

Yáñez-Morroni, G., Gironás, J., Caneo, M., Delgado, R., & Garreaud, R. (2018). Using the weather research and forecasting (WRF) model for precipitation forecasting in an andean region with complex topography. Atmosphere, 9(8), 304.

SECCIÓN 4

Allen, E. (2019). Modelación del riesgo físico de redes viales expuestas a amenazas de origen natural (Master's thesis). Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

Bil, M., Sedonik, J., Kubecek, J., Vodak, R., & Bilova, M. (2014). Road Network Segments At Risk – Vulnerability Analysis and Natural Hazards Assessment, 1–18. Retrieved from http://www.population-protection.eu/prilohy/casopis/eng/20/87.pdf

Caltrans. (1994). The Continuing Challenge: The Northridge Earthquake of January 17, 1994, Seismic Advisory Board Report. Sacramento, Calif.: California Dept. of Transportation.

Javanbarg, M. B.; Takada, S. (2007). Redundancy model for water supply systems under earthquake environments, in Proceedings of 5th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, May 2007, Tehran, Iran, 1–8.

Poulos, A., Monsalve, M., Zamora, N. & de la Llera, J. C (2018). An Updated Recurrence Model for Chilean Subduction Seismicity and Statistical Validation of Its Poisson Nature. Bulletin of the Seismological Society of America; 109 (1): 66-74. Doi: https://doi.org/10.1785/0120170160

(Coordinador, 2019a) www.coordinador.cl/sistema-electrico/ Coordinador Eléctrico Nacional. Last access March 2019.

(Coordinador, 2019b) https://infotecnica.coordinador.cl/ Coordinador Eléctrico Nacional. Last Access March 2019.

(Energía Abierta, 2019) http://energiaabierta.cl/ Energía Abierta. Last access March 2019.

(FEMA, 2003) Hazus-MH 2.1 Technical Manual. Department of Homeland Security, Federal Emergency Management Agency, Mitigation Division Washington, D.C.

(Ferrario et al., 2019) Ferrario E., Poulos A., de la Llera J. C., Lorca A., Oneto A. and Magnere C. Representation and Modeling of the Chilean Electric Power Network for Seismic Resilience Analysis. 29th European Safety and Reliability Conference (ESREL 2019). Hannover, Germany, September 22-26, 2019.

(Gan et al., 2013) Gan L., Li. N., Topcu U. Optimal Power Flow in Tree Networks. 52nd IEEE Conference on Decision and Control, Florence, Italy, December 10-13, 2013.

(Ministerio de Energía, 2019) sig.minenergia.cl/sig-minen/moduloCartografico/composer/ Ministerio de Energía. Last Access March 2019.

MINSAL 2011, "Diseño e implementación de una metodología de evaluación, seguimiento, y acompañamiento de la reforma de salud de Chile".

SECCIÓN 5

Alberto, Y., de la Llera, J.C., Aguirre, P., Monsalve, M. (forthcoming 2020) Damage to the water systems in the Maule (2010), Christchurch (2010-2011), and Tohoku (2011) earthquakes. Journal of Water Resources Planning and Management.

Almonacid M (2012) "Terremoto y tsunami del 27/02/2010 en Chile. Efectos en la infraestructura y lecciones aprendidas". Presentación en seminario Aspectos de planificación, financiamiento e instituciones para la adaptación de la infraestructura al cambio climático. Colombia.

Centro Sismológico Nacional (CSN) (2020) 27/F: los cambios que generó el terremoto de 2010. Prensa CSN. Disponible online en https://www.csn.uchile.cl/27f-los-cambios-que-genero-el-terremoto-de-2010/ (último acceso 24 marzo 2020).

Cociña Varas, C., Boano, C., 2013. Housing and reconstruction in Chile (2010-2012): Institutional and social transformation in post-disaster contexts. International Journal of Architectural Research 7 (3), 57-79.

Contreras, M., Winckler, P., 2013. Pérdidas de vidas, viviendas, infraestructura y embarcaciones por el tsunami del 27 de Febrero de 2010 en la costa central de Chile. Obras y proyectos 14, 6–19.

de la Llera, J.C., Rivera, F., Mitrani-Reiser, J., Jünemann, R., Fortuño, C., Ríos, M., Hube, M., María, H.S., Cienfuegos, R., 2017. Data collection after the 2010 Maule earthquake in Chile. Bulletin of Earthquake Engineering 15, 555–588.

Favier, P., Rivera, F., Poulos, A., Vasquez, J., de la Llera, J.C., Mitrani-Reiser, J., 2017. Impact on Chilean hospitals following the 2015 Illapel earthquake. Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering, Paper 4415. Santiago, 9-13 enero 2017.

Gobierno de Chile (2010) Plan de reconstrucción. Terremoto y maremoto del 27 de febrero de 2010. Disponible online en https://www.preventionweb.net/files/28726_plandereconstruccinagosto2010.pdf (último acceso 24 marzo 2020).

Jünemann, R., de la Llera, J.C., Hube, M.A., Cifuentes, L.A., Kausel, E., 2015. A statistical analysis of reinforced concrete wall buildings damaged during the 2010, Chile earthquake. Engineering Structures 82, 168–185.

Massone LM, Bonelli P, Lagos R, Lüders C, Mohele J, Wallace JW (2012) Seismic design and construction practices for RC structural wall buildings. Earthquake Spectra 28(S1), S245–S256.

Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) (2013) Reconstrucción urbana: Instrumentos de planificación y gestión territorial. Dirección de Reconstrucción, Ministerio de Vivienda y Urbanismo.

Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) (2020) Reporte plan de reconstrucción, terremoto tsunami 27F, 27 febrero 2010. Disponible online en https://www.minvu.cl/wp-content/uploads/2019/05/Reporte-WEB-27F-2010-Febrero-2020.pdf (ultimo acceso 26 marzo 2020).

Mitrani-Reiser J, Mahoney M, Holmes WT, de la Llera JC, Bissell R, Kirsch T (2012) A functional loss assessment of a hospital system in the Bío-Bío Province. Earthquake Spectra 28(S1), S473–S502.

Ruegg JC, Rudloff A, Vigny C, Madariaga R, de Chabalier JB, Campos J, Kausel E, Barrientos S, Dimitrov D (2009) Interseismic strain accumulation measured by GPS in the seismic gap between Constitución and Concepción in Chile. Physics of the Earth and Planetary Interiors 175(1–2), 78–85.

Sehnbruch, K., 2017. The Impact of the Chilean Earthquake of 2010: Challenging the Capabilities of the Neoliberal State. Latin American Perspectives 44, 4–9.

Sehnbruch, K., Agloni, N., Imilan, W., Sanhueza, C., 2017. Social Policy Responses of the Chilean State to the Earthquake and Tsunami of 2010. Latin American Perspectives 44, 24–40.

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

Toro, F., Santa María, H., Hube, M. et al. 2014. "Statistical analysis of pedestrian bridges damaged during 2010 Chile earthquake". Proceedings of the 10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering. Anchorage, Alaska, 21-25 julio 2014.

United States Geological Survey (USGS), 2019. M 8.8 - offshore Bio-Bio, Chile, Shakemap. https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/official20100227063411530_30/shakemap/pga

Vásquez, A., Rivera, F., de la Llera, J.C., Mitrani-Reiser, J., 2017. Healthcare network operation in Iquique after the 2014, Pisagua earthquake. Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering, Paper 3639. Santiago, 9-13 enero 2017.

SECCIÓN 6

Allan P, Bryant M, Wirsching C, Garcia D and Rodriguez M (2013) The influence of urban morphology on the resilience of cities following an earthquake. Journal of Urban Design 18(2): 242-262.

Birkmann J (2006) Measuring vulnerability to promote disaster-resilient societies: Conceptual frameworks and definitions. In Measuring Vulnerability to Natural Hazards: Towards Disaster Resilience Societies. Tokyo: United Nations University Press, pp 9–54.

Birkmann J, Teichman K, Welle T, González M, Olabarrieta M (2010) The unperceived risk to Europe's coasts: tsunamis and the vulnerability of Cadiz, Spain. Natural Hazards and Earth System Science 10(12): 2659–2675.

CIGIDEN, 2017. Elaboración de un escenario sísmico en Iquique. Caracterización de un posible terremoto y sus consecuencias en el entorno físico y social. Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), Santiago, 58pp.

Consejo Nacional de Desarrollo Urbano CNDU (2018) Construcción de Línea de Base del Sistema de Indicadores y Estándares del Desarrollo Urbano. Report, Pontificia Universidad Católica, Chile.

Cutter S, Barnes L, Berry M, Burton C, Evans E, Tate E, Webb J (2008) A place-based model for understanding community resilience to natural disasters. Global Environmental Change 18(4): 598–606.

Klüpfel, H, and Michael Schreckenberg. 2003. "A Cellular Automaton Model for Crowd Movement and Egress Simulation." Duisburg-Essen: University of Duisburg-Essen.

Irajifar L, Sipe N and Alizadeh T (2016) The impact of urban form on disaster resiliency: a case study of Brisbane and Ipswich, Australia. International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment 7(3): 259-275.

Post, J, S Wegscheider, M Mück, K Zosseder, R Kiefl, T Steinmetz, and G Strunz. 2009. "Assessment of Human Immediate Response Capability Related to Tsunami Threats in Indonesia at a Sub-National Scale." Natural Hazards and Earth System Sciences 9 (4): 1075–86.

Turner B, Kasperson R, Matson P, McCarthy J, Corell R, Christensen L, Eckley N, Kasperson J, Luers A, Martello M (2003) A framework for vulnerability analysis in sustainability science. Proceedings of the national academy of sciences 100(14): 8074–8079.

United Nations Human Settlements Programme UN-HABITAT (2016) Implementing the New Urban Agenda. Urban Planning and Design.

Villagra P, Herrmann G, Quintana C, Sepúlveda R (2016) Resilience thinking and urban planning in a coastal environment at risk of tsunamis: the case study of Mehuín, Chile. Revista de geografía Norte Grande 64: 63–82.

Castro, S., Poulos, A., Urrutia, A., Herrera, J. C., Cienfuegos, R., & de la Llera, J. C. (2018). Impact of earthquake magnitude on the estimation of tsunami evacuation casualties. In 11th National US Conference on Earthquake Engineering. June 2018, Los Angeles, California.

Castro, S., Poulos, A., Herrera, J. C., & de la Llera, J. C. (2019). Modeling the Impact of Earthquake-Induced Debris on Tsunami Evacuation Times of Coastal Cities. Earthquake Spectra, 35(1), 137-158.

León, J., Castro, S., Mokrani, C., & Gubler, A. (2020). Tsunami evacuation analysis in the urban built environment: a multi-scale perspective through two modeling approaches in Viña del Mar, Chile. Coastal Engineering Journal, 1-16.

ONEMI, 2011. Protocolo ONEMI-SHOA para evento de tsunami en las costas de Chile [ONEMI-SHOA protocol for tsunami event on the coasts of Chile]. Retrieved from http://www.elmostrador. cl/media/2012/05/Protocolo_SHOA_para_respuesta_Usuarios.pdf

Poulos, A., Tocornal, F., de la Llera, J. C., & Mitrani-Reiser, J. (2018). Validation of an agent-based building evacuation model with a school drill. Transportation research part C: emerging technologies, 97, 82-95.

SECCIÓN 7

Alkazraji, D (2008). A Quick Guide to Pipeline Engineering. 1st. Ed. Woodhead Publishing Limited.

Basoz, N. y Kiremidjian, A.S. (1996). Risk Assessment for Highway Systems, Technical Report 118, John A. Blume Earthquake Engineering Center, Department of Civil Engineering, Stanford University. Estados Unidos.

Buckle, I.G. y Werner, S.D. (2003). Quantifying the seismic resilience of highway networks using a loss-estimation tool. 29th US - Japan Bridge Engineering Workshop. Japón.

Echaveguren, T., Cifuentes, O. y Echaveguren, E. (2000). Costos Directos de los Usuarios en Sistema de Gestión de Puentes MAPRA. 6to Congreso PROVIAL, Chile, 259-274.

Echaveguren, T. Azocar, G. Sanhueza, R: y Félez, J. (2012). Evaluación Social de proyectos de reducción de vulnerabilidad de la red vial ante eventos naturales. 10mo Congreso PROVIAL Chile, 1 – 12.

Echaveguren, T. y Cartes, P. (2016). Definición de Mitigación. Documento Técnico TM-28-2016. Investigación y Desarrollo de Modelos para Cuantificar y Mitigar el Riesgo de Eventos Naturales en la Red Vial Nacional. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago.

Echaveguren, T., Cartes, P. y Jiménez, G. (2016). Desarrollo y Validación de Modelo de Asignación de Estándares de Mitigación y Restauración. Documento Técnico TM-32-2016. Investigación y Desarrollo de Modelos para Cuantificar y Mitigar el Riesgo de Eventos Naturales en la Red Vial Nacional. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago.

Echaveguren, T. y Cartes, P. (2017). Aplicación y ajuste de modelo de Mitigación. Documento Técnico TM-41-2016. Investigación y Desarrollo de Modelos para Cuantificar y Mitigar el Riesgo de Eventos Naturales en la Red Vial Nacional. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago.

EULA(2018). Atlas de riesgos naturales y antrópicos comuna de San Pedro de la Paz. Universidad de Concepción. Chile.

Husdal, J. (2005). The vulnerability of road networks in a cost-benefit perspective. TRB 2005 Annual Meeting, Unites States.

MDS, (2017). Metodología Complementaria para la Evaluación de Riesgo de Desastres de Proyectos de Infraestructura Pública División de Evaluación Social de Inversiones. Ministerio de Desarrollo Social. Chile.

Mitchell, J. (2013). Power line failures and catastrophic wildfires under extreme weather conditions. Engineering Failure Analysis. Vol 1, 627-735.

Nair, G. Dash, S. (2015). Review of seismic mitigation techniques for buried pipelines in fault zones. Structural Engineering Convention, Dheli, 2014.

Panico, A., Lanzano, G., Salzano, E., Santucci de Magistris, F., Fabbrocino, G. (2013). Seismic vulnerability of wastewater treatment plants. Chemical Engineering Transaction, 32, 13-18.

Rose, A. (2004). Defining and measuring economic resilience to disasters. Disaster Prevention and Management, 13(4), 307 – 314.

Rose, A. and Krausmann, E. (2013). An economic framework for the development of a resilience index for business recovery, International Journal of Disaster Risk Reduction, 5, 73 – 83.

Youn, B., Hu, C. and Wang, P. (2011). Resilience-Driven System Design of Complex Engineered Systems, Journal of Mechanical Design, 133(10), 101011.

CAMARA CHILENA DE LA CONSTRUCCION