

Control de riesgo sísmico de redes de salud de emergencia

J.C. de la Llera (1), P. Aguirre (2), A. Cataldo (3), G. Candia (4), J.P. Muñoz (5), L. Enberg (6), F. Bertin (7), M. Monsalve (8), M. Arré (9)

(1) PhD, Pontificia Universidad Católica de Chile & CIGIDEN, jllera@ing.puc.cl

(2) PhD, Pontificia Universidad Católica de Chile & CIGIDEN, paaguirr@ing.puc.cl

(3) PhD, Pontificia Universidad Católica de Chile, aecatald@uc.cl

(4) PhD, Universidad del Desarrollo & CIGIDEN, gcandia@udd.cl

(5) MSc, Pontificia Universidad Católica de Chile & CIGIDEN, jp.munoz@cigiden.cl

(6) Dr., Red de Salud UC Christus, lenberg@ucchristus.cl

(7) Eng, Pontificia Universidad Católica de Chile & CIGIDEN, francisco.bertin@cigiden.cl

(8) PhD, Pontificia Universidad Católica de Chile & CIGIDEN, mauricio.monsalve@cigiden.cl

(9) MSc(c), Pontificia Universidad Católica de Chile & CIGIDEN, macarena.arre@cigiden.cl

Resumen

El desempeño de la red de salud durante y después de un sismo severo es crítico para alcanzar una respuesta resiliente en la sociedad. Este artículo estudia el desempeño sísmico del frente del sistema de atención médica, que corresponde a la red de establecimientos de emergencia. El objetivo es evaluar el impacto que tienen las medidas de mitigación aplicadas en los activos físicos y en la lógica operacional, mirando las variables de decisión más relevantes relacionadas con el paciente y el sistema. Un modelo estructural y operacional integrado es desarrollado para las redes de salud, específicamente del Servicio de Salud Metropolitano Suroriente (SSMSO) de Santiago, Chile, pero se espera que los resultados de este estudio puedan ser aplicados a otros servicios de salud del país. Una vez que ocurre el sismo, un modelo de la ciudad determina el número y ubicación de los heridos, quienes son trasladados a los establecimientos de emergencia de acuerdo a lógicas preestablecidas. El modelo propuesto integra todos los componentes del riesgo y utiliza una caracterización actualizada de la amenaza sísmica y una completa evaluación del desempeño estructural y no-estructural de los distintos establecimientos, quienes se verán afectados por el movimiento del suelo, disminuyendo su capacidad de atención. Distintas medidas de mitigación pueden ser evaluadas, como la implementación de aislamiento elastomérico en algunos activos críticos de la red, para cuantificar su impacto en las variables claves.

Palabras-Clave: Redes de salud de emergencia, análisis de riesgo, modelo integrado, flujo de pacientes.

Abstract

The overall performance of the healthcare network during and after a severe earthquake event is critical in achieving a societal resilient response. This paper studies the seismic performance of the frontend of the healthcare system, which is the network of emergency facilities. The overarching goal is to evaluate the impact of mitigation measures in the physical assets and operational logic, by looking at the most relevant patient and system related decision variables. An integrated structural and operational model is developed for the healthcare networks, specifically for the Southeast Metropolitan Healthcare Service (SEMS) in Santiago, Chile, but results of this study are expected to be generally applicable to other major healthcare services across the country. Once the earthquake occurs, a model of the city determines the number and location of casualties, which are transferred into emergency rooms according to a preestablished system logic. The model proposed integrates all components of risk and uses an updated earthquake hazard characterization and a thorough evaluation of the structural and non-structural performance of the different facilities, which will be affected by the ground shaking, experiencing a reduction in their nominal medical assistance capacity. Different mitigation actions can be evaluated, like the introduction of elastomeric isolation in some of the most critical assets of the network, to quantify its impact on key response variables.

Keywords: Emergency healthcare networks, risk analysis, integrated model, patient flow.

1 Introducción

Una de las características más críticas en ciudades y asentamientos urbanos modernos es la capacidad que tienen de absorber y recuperarse rápida y efectivamente del efecto que un evento natural de gran intensidad pueda causar en todos sus sistemas, minimizando el impacto al normal funcionamiento de la sociedad. Cuando una ciudad reacciona de esta forma, decimos que tiene una resiliencia adecuada frente a grandes amenazas naturales, sea su origen terrestre, oceánico o climático. Distintas experiencias durante sismos pasados alrededor del mundo han demostrado que la red asistencial de emergencia juega un papel muy importante en la respuesta inmediata y en la recuperación efectiva de la sociedad [1][2], facilitando su retorno a la condición de funcionamiento normal y aumentando su resiliencia como sistema complejo. Por esta razón, esta investigación propone una herramienta, llamada SimPlaNeR, para evaluar el riesgo y mejorar la resiliencia de la red de salud de urgencia tras un sismo de gran severidad utilizando el conocimiento de frontera en el tema.

La experiencia con terremotos anteriores ha mostrado que las redes de salud, incluidas las de urgencia, no están preparadas para enfrentar adecuadamente situaciones que generen daño y un aumento repentino de pacientes. Durante el terremoto de Maule 2010, 84 de los 135 recintos de salud localizados en la zona afectada sufrieron daños, perdiéndose más de 4200 camas, lo que representaba el 22% de las disponibles en la zona afectada [3]. Una de las principales causas de esta falta de preparación es que actualmente no existe una plataforma de gestión integrada que permita, en base a modelos validados con experiencias anteriores, evaluar de forma rigurosa el impacto de un evento severo en la condición de funcionamiento normal de la red. Aunque la respuesta de los Servicios de Salud frente a la pandemia ha sido elogiada no solo a nivel nacional, estos Servicios no cuentan actualmente con modelos integrados formales que evalúen el desempeño hipotético de unidades de salud, ni menos la red de urgencia en su conjunto (a escala de un servicio o región), frente a eventos naturales extremos como sismos o tsunamis. Estos eventos pueden ocasionar un alto número de heridos en un muy corto tiempo, sumado al deterioro físico que pueden causar sobre las distintas unidades de la red, lo que redundará en una disminución de su capacidad. Adicionalmente, no existe una forma objetiva de evaluar la resiliencia de la red de urgencia ante amenazas naturales a distintas escalas organizacionales del sistema, ni tampoco para distintos horizontes temporales. Al día de hoy no tenemos la posibilidad de contestar adecuadamente preguntas sobre un abanico de métricas de desempeño y variables de decisión de la red, como puede ser el impacto sobre tiempos de atención, número de víctimas fatales, costos esperados, tiempos de suspensión en la operación, criticidad relativa de distintas componentes de la red, portafolios de intervenciones óptimas, etc. Esto implica que tampoco es posible evaluar el impacto de las distintas posibles medidas de mitigación, tanto físicas como operacionales y de gestión.

Para cuantificar el riesgo de cualquier sistema, y así su resiliencia, el primer paso es contar con un modelo adecuado del sistema que se busca estudiar. En este caso, se ha escogido la red de salud de urgencia por representar la puerta de entrada y primera atención del sistema de salud. La red de urgencia no opera de manera aislada, es parte de un sistema mucho más complejo que requiere de la disponibilidad de otras capacidades hospitalarias para funcionar, como pabellones, imagenología, banco de sangre, unidades de pacientes críticos, capacidad de hospitalización, cadenas logísticas de insumos y la operación de otras redes críticas como electricidad y agua, entre muchos otros. Sin embargo, la hipótesis detrás de esta herramienta es que poder simular en detalle la red de urgencia en sus distintas escalas es un paso sustantivo inicial que abre la posibilidad de ir complejizando gradualmente el modelo hasta alcanzar el sistema completo.

Una de las características más novedosas de SimPlaNeR es su capacidad para apoyar en la planificación. Actualmente, el impacto de las medidas de mitigación introducidas en la red de salud solo puede estimarse de forma cuantitativa a posteriori, o sólo de forma cualitativa antes de un evento. Cuantificar impactos sólo tras la ocurrencia del evento es ineficiente y costoso para la salud de la población y costoso políticamente para los gestores de la red. Disponer de una plataforma que permita anticipar las consecuencias de distintas medidas de mitigación repercutirá en un aumento de eficiencia en los tiempos de atención de los pacientes, disminución en la mortalidad, una mejor calidad del servicio, una mayor resiliencia del sistema ante situaciones de emergencia, y una disminución en los costos de operación de la red al usar los recursos de forma óptima.

2 Metodología

SimPlaNeR, la plataforma desarrollada en esta investigación, abarca el análisis del riesgo y la resiliencia de la red de salud de emergencia desde la amenaza, pasando por el desempeño estructural de cada activo de la red y el movimiento de los heridos y pacientes, hasta la planificación y evaluación de medidas de mitigación. Para poder lograr esto y alcanzar un

impacto en la evaluación del riesgo y resiliencia debemos: (i) ser capaces de evaluar el impacto de las medidas escogidas a nivel de las distintas unidades de atención; (ii) escalar este impacto a nivel de la red completa, en este caso el servicio de salud e idealmente la región; y (iii) disponer de una herramienta especializada cuyo conocimiento de base está muy avanzado, pero que requiere de la interacción con los equipos de salud para que sea una fiel representación de cómo opera el sistema en la práctica.

Debido al amplio espectro de tópicos de investigación que involucra este desarrollo, se estableció una estructura modular para la plataforma computacional integrada que simula la red de urgencia del sistema de salud. Se definieron 8 módulos, uno asociado a cada dimensión del problema a evaluar y a las distintas etapas en la simulación. Es importante destacar que cada módulo tiene valor per-se y corresponde a un gran tema de investigación por sí solo, lo que implica que puede ser aprovechado en múltiples tareas individuales a su vez para esta u otras aplicaciones. Esto hace de la plataforma una que es muy versátil para poder ser adaptada en el futuro a otras redes críticas y sistemas complejos. A continuación se detalla de manera breve el alcance de cada uno de los módulos, sus principales características, objetivos y desarrollos.

2.1 Módulo 1: Amenaza

Este módulo se encarga de simular los movimientos sísmicos que caracterizan a la zona en la que se ubica la respectiva red de salud. A través de distintas herramientas de cálculo se simula su frecuencia e intensidad en distintos puntos de la zona, entregando resultados como distribuciones espaciales de distintas medidas de intensidad como PGA o aceleraciones espectrales, registros de aceleraciones o espectros de respuesta.

La sismicidad en Chile central está controlada en gran medida por terremotos de subducción interplaca y terremotos intraplaca de profundidad intermedia, los cuales ocurren en el contacto entre la placa de Nazca y Sudamericana a profundidades entre 5 km y 200 km. Adicionalmente, la activación de fallas en la placa continental da origen a terremotos superficiales o de corteza con profundidades de hasta 40 km, Fig.1; si bien estos terremotos son menos frecuentes que los eventos de subducción, pueden generar daños importantes en la infraestructura por su proximidad a centros urbanos altamente poblados, como en el caso de Santiago Sur-Oriente. Para simular la distribución espacial de los hipocentros y la distribución temporal de terremotos, la plataforma incorpora el modelo de fuentes sísmicas de subducción y leyes de recurrencia propuestas por Poulos et al [4], el cual corresponde a un conjunto de superficies que describen la forma del contacto entre placas. Asimismo, se incorpora el modelo de fallas corticales del catálogo GEM-SARA con sus respectivas leyes de recurrencia.

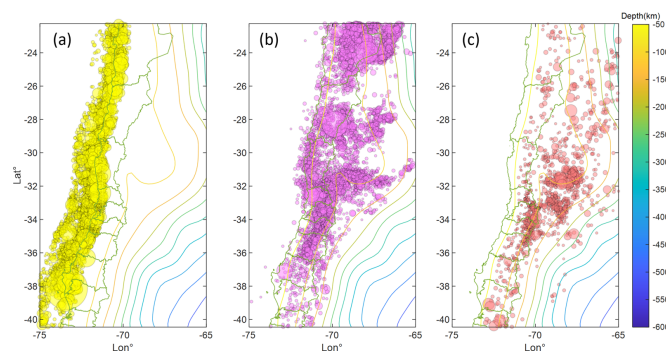


Fig. 1 - Distribución espacial de terremotos en Chile central (22°S-40°S): (a) subducción interplaca, (b) subducción intraplaca de profundidad intermedia, y (c) corticales superficiales. Curvas de contorno representan la profundidad del borde superior de la placa subductante o “slab”.

La intensidad del movimiento sísmico (IM) en un sitio se puede representar como realizaciones de un proceso estocástico. El cálculo de la intensidad se realiza mediante una ecuación predictiva que adopta la forma de Ec. (1).

$$\log IM = \mu(R, M, \theta) + \tau\eta + \phi\varepsilon. \quad (1)$$

R es la distancia entre el sitio y la fuente sísmica, M es la magnitud del terremoto, y θ son parámetros específicos del sitio. En esta ecuación, el primer término $\mu(R, M, \theta)$, representa el logaritmo de la intensidad media del movimiento y corresponde a un objeto determinístico. Por otra parte, la incertidumbre del modelo está representada por el error intra-evento $\tau\eta$ y el error inter-evento $\phi\varepsilon$, los cuales son variables aleatorias normales e independientes. La ecuación anterior se puede extender para evaluar la ocurrencia simultánea de múltiples intensidades en sitios distribuidos geográficamente, como pueden ser los servicios de urgencia de la red de salud o los bloques censales usados en el módulo de generación de heridos. Bajo el supuesto de que las intensidades siguen una distribución normal multivariada, la realización del movimiento sísmico se puede aproximar mediante la formulación matricial extendida según la Ec. (2).

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_{\log IM_1} \\ \mu_{\log IM_2} \\ \vdots \\ \mu_{\log IM_n} \end{bmatrix} + \mathbf{L} \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \vdots \\ Z_n \end{bmatrix}. \quad (2)$$

En esta formulación, los vectores Y_1, Y_2, \dots, Y_n representan campos de intensidades espacialmente distribuidas, cuyos valores medios $\mu_{\log IM_i}$ se obtienen directamente de las ecuaciones predictivas. Los vectores Z_1, Z_2, \dots, Z_n , son realizaciones de una variable normal estándar, y \mathbf{L} es una matriz triangular inferior que contiene las correlaciones espaciales y correlaciones entre medidas de intensidad.

Este módulo corresponde a una traducción al software Python 3 [5] de 42 subrutinas del software SeismicHazard [6], desarrollado previamente en Matlab. Actualmente, esta herramienta cuenta con cuatro ecuaciones predictivas para terremotos de subducción y un modelo para terremotos corticales superficiales. Para terremotos de subducción, se implementó el modelo de Montalva et al. [7] (modelo ergódico) y los tres modelos del proyecto NGA-Sub [8] (modelos parcialmente no-ergódicos). Para terremotos generados en fuentes corticales, se implementó el modelo predictivo de Idriss 2014 [9], del proyecto NGA-West2. Asimismo, se implementó el modelo de correlaciones espaciales de Aldea 2022 [10] y el modelo de correlaciones espectrales de Abrahamson et al. 2016 [11].

2.2 Módulo 2: Exposición, fragilidad y desempeño de la población general

El Módulo 2 de la plataforma contiene cuatro grandes pasos de la simulación. En primer lugar, se tiene la implementación de un modelo de exposición de la población general, el que consiste en la caracterización de los activos físicos de la población, tanto urbana como rural, expuestos a la amenaza sísmica para la zona del análisis. Esto abarca un inventario de edificaciones en el territorio de cada Servicio de Salud, clasificadas por tipología estructural, y un inventario de la población expuesta asociada a cada edificación. Dada la magnitud del problema, en el que hablamos de cientos de miles de edificaciones distribuidas en el territorio, el inventario está hecho de manera de tener la información agregada por manzana censal, para tener cantidades de información que sean posibles de manejar en los cálculos.

En segundo lugar, este módulo tiene la capacidad de estimar el daño físico de cada uno de los activos que tiene en su inventario. En base a la caracterización de cada activo que se tiene en el modelo de exposición, se asocia un grupo de funciones de fragilidad representativas de cada estado de daño a cada agrupación de edificaciones. A través de estas funciones es posible evaluar el nivel de daño de cada activo físico.

En tercer lugar, se realiza una estimación de la cantidad de heridos y su distribución espacial, así como la gravedad que presentan y sus patologías. Existen distintos modelos que se han desarrollado previamente para estimar distribuciones de heridos a partir del estado de daño de las edificaciones donde se encuentra la población, por lo que este módulo emplea dichos modelos y los adecúa a la realidad chilena.

Por último, este módulo calcula los tiempos de traslado de los heridos hacia los recintos asistenciales de urgencia que les corresponden. Este cálculo se hace utilizando herramientas existentes que obtienen tiempos de traslado desde un punto de origen hasta un destino, lo que entrega información de suma relevancia ya que la probabilidad de supervivencia de un paciente depende del tiempo que se tarda en atenderlo. En la Fig. 2 se muestra en detalle todo este flujo.

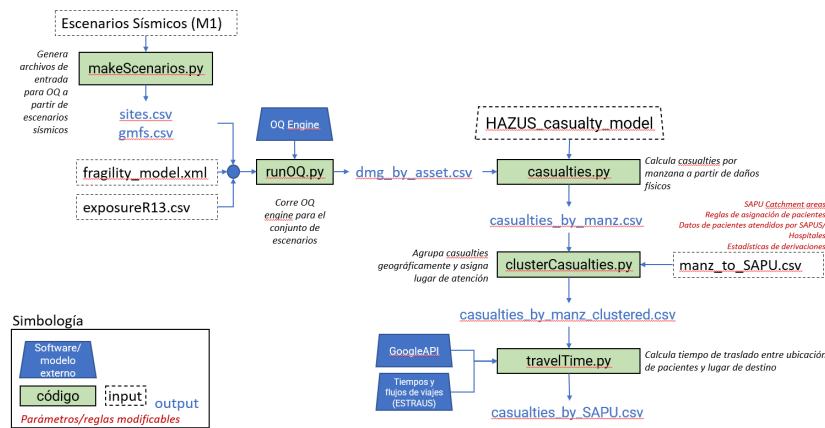


Fig. 2 - Flujo de ejecución del módulo 2.

2.3 Módulo 3: Exposición, fragilidad y recuperación de la red de salud

El Módulo 3 de la plataforma consiste en dos grandes bloques de información. En primer lugar, se tiene el modelo de exposición de los Servicios de Salud estudiados, de forma análoga al Módulo 2, por cuanto indica cuáles son los activos físicos, aunque esto se hace en distintos niveles de resolución. En segundo lugar, contiene una gran base de datos de funciones que describen de manera simplificada el comportamiento sísmico de los distintos activos físicos de la red de salud de urgencia, incluyendo fragilidad y recuperación, con tiempos y costos asociados. La información de ambos bloques se encuentra agrupada en distintos niveles de resolución, desde un nivel micro definiendo cada componente, hasta un nivel macro que establece toda la red. Los niveles de resolución para los cuales se agrupa la información son:

- **Componente:** Mínima unidad del modelo de exposición de alta resolución desarrollado para la red de salud. Corresponde a un recurso físico, que puede ser de tipo estructural (e.g., muro, viga), no-estructural tipo arquitectónico (e.g., cielo falso, tabique, mampara), no-estructural tipo instalaciones (e.g., cañerías de gases clínicos, luces, agua), o contenido médico (e.g., camilla, resonador magnético, carro de paro). Cada componente corresponde a algún elemento necesario para proveer algún proceso médico del servicio de salud.
- **Prestación:** Conjunto de componentes necesarios para llevar a cabo un proceso médico (e.g., “reanimación de un paciente” corresponde a una prestación que comprende una camilla, un carro de paro, oxígeno y un botiquín).
- **Sala:** Mínima unidad correspondiente a un espacio físico empleado para procesos médicos, que contiene un conjunto de componentes, que generan un conjunto de prestaciones disponibles en dicho espacio (e.g., una “sala de observación” es una habitación que se compone de 6 camas, 6 monitores, 6 conexiones a redes, luces, agua y electricidad, lo que genera 6 prestaciones disponibles de “sala de observación”).
- **Establecimiento:** Corresponde esencialmente a un conjunto de salas, que pueden estar agrupadas físicamente en una o más edificaciones (e.g., un SAPU se compone de 3 salas de box, 1 sala de reanimador, 1 sala de espera, 1 sala de observación)
- **Red:** Conjunto de establecimientos de salud de urgencia, que puede definirse a nivel de Servicio de Salud o de Inter-Servicio, donde cada nodo de la red corresponde a un establecimiento (e.g., la red del Servicio de Salud del Maule se compone de 3 hospitales de alta complejidad, 4 de mediana complejidad, 6 de baja complejidad, 10 SAR, 8 SAPU y 28 SUR), y cada arco corresponde a algún tipo de conexión, ya sea física (e.g., calle o carretera) o lógica (e.g., flujo de derivación de pacientes).

En términos generales, el modelo de exposición de la red de salud contempla la ubicación geográfica de cada establecimiento de urgencia, las salas que contiene, la ubicación de éstas en planta y elevación, los componentes de cada sala, y las prestaciones médicas que ofrece el recinto producto de sus recursos físicos. De forma análoga al Módulo 2, el Módulo 3 primero define los activos físicos en un inventario, luego define una base de datos de funciones de fragilidad y

recuperación de distintos tipos, y finalmente asigna a cada elemento del inventario un conjunto de funciones de la base de datos

2.4 Módulo 4: Desempeño de la red de salud

Este módulo estima el desempeño físico de la red de salud de urgencia ante los distintos escenarios de terremoto considerados. Esta estimación de desempeño se hace primero con una evaluación desde baja a alta resolución del modelo de exposición: (i) estimando el comportamiento de cada establecimiento de la red; (ii) estimando respuestas estructurales asociadas a cada sala; y (iii) evaluando con ello el nivel de daño de cada componente. Posteriormente, se evalúa la consecuencia funcional del daño, y los tiempos y costos de recuperación en dirección opuesta, agregando resultados de alta resolución, para construir salidas de menor nivel de resolución, es decir, con el daño generado a los componentes se evalúa las prestaciones y las salas, con las que se puede estimar el nivel general de funcionalidad, y los tiempos y costos de recuperación del establecimiento, para luego hacer lo mismo a nivel de la red. En la Fig. 3 se muestra el flujo de procesos de este módulo.

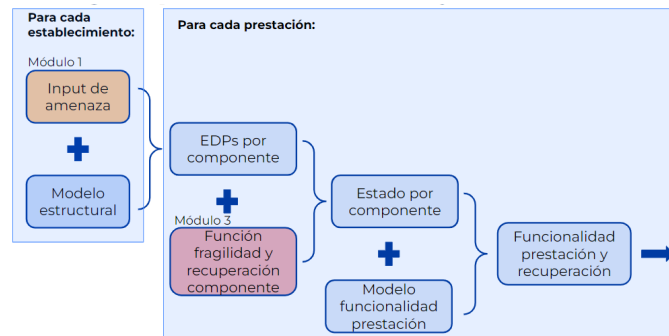


Fig. 3 - Diagrama de flujo para el Módulo 4.

Los pasos que realiza el Módulo 4 se describen a continuación.

1. **Evaluación de colapso del establecimiento:** Dado un escenario sísmico, se evalúa la función de fragilidad de colapso de cada establecimiento de la red, y se muestrea si este colapsa o no. En caso de colapsar, la evaluación de desempeño no continúa en mayor detalle, el establecimiento queda inutilizable, y se deben considerar medidas de reparación global o reconstrucción en lo que resta de la simulación.
2. **Estimación de desempeño físico del establecimiento:** Si la estructura no colapsa, se estima las respuestas estructurales de interés, o EDPs por su nombre en inglés, en las ubicaciones en planta y elevación de la edificación definidas por la distribución de salas y componentes del establecimiento. Las EDPs de drift de entrepiso y aceleración máxima de piso se calculan para cada ubicación del modelo estructural, y luego se asocian estos valores a cada una de las salas del establecimiento, y posteriormente a cada uno de los componentes de cada sala. Este proceso se realiza a través de modelos estructurales simplificados, que permiten estimar la respuesta a partir de los datos de las medidas de intensidad entregadas por el Módulo 1.
3. **Estimación del estado de daño de los componentes:** luego de estimar las EDPs del establecimiento a través de algún modelo estructural, el Módulo 4 asigna valores de EDP a cada sala de acuerdo a su ubicación en la estructura, y dichos valores se asignan luego a los componentes presentes en dicha sala. Posteriormente, para cada componente se evalúa la función de fragilidad en el valor de EDP asignado, y se muestra su estado de daño.
4. **Estimación de tiempo de recuperación y costo de los componentes:** para cada componente dañado, se muestrea el tiempo de recuperación y costo asociado utilizando las funciones de recuperación almacenadas en el Módulo 3.
5. **Generación de curvas de recuperación de las prestaciones (y salas):** una prestación se encuentra disponible solo si todos los componentes que la conforman se encuentran sin daño, por tanto, el tiempo de recuperación de una prestación corresponde al tiempo que tome recuperar todos sus componentes. Al configurar el modelo se puede indicar si las reparaciones de los componentes de una prestación se realizan en serie, en paralelo, o siguiendo algún otro esquema más complejo. Por tanto, se puede construir el tiempo de recuperación de una prestación en

base al tiempo de recuperación de sus componentes. Lo anterior se repite para cada presentación y para establecimiento, y se obtiene como resultado una serie de tiempo que indica cuándo se recupera cada prestación.

2.5 Módulo 5: Flujo de pacientes

Un aspecto fundamental del análisis de riesgo y resiliencia de una red de salud corresponde al manejo de los heridos y pacientes. La eficiencia de estos procesos indicará luego el resultado en términos de la calidad de la atención de salud a las personas, así como el número de heridos y fallecidos. En esta línea, este módulo se encarga del manejo del flujo de los pacientes de la red, tanto en condición normal como posterior a un evento sísmico. Procesa el movimiento de cada paciente una vez que llega a un establecimiento asistencial, pudiendo determinar el tiempo que tarda la atención, los distintos procesos que sigue dentro de la urgencia, los recursos que utiliza en cada uno de estos procesos, los servicios de apoyo que necesita, las posibles derivaciones entre establecimientos y el tipo de salida del paciente de la red (alta médica, hospitalización, hospitalización domiciliaria, otros procedimientos, fallecimiento).

El Módulo 5 toma, en primer lugar, información entregada por el Módulo 2 sobre los heridos generados por el evento sísmico. Recibe el instante en el que cada herido llega a cada establecimiento de la red, así como su nivel de gravedad y categoría médica. Además, del Módulo 4 recibe el estado y nivel de funcionalidad de cada establecimiento, especificado como cantidad y tipos de prestaciones disponibles, lo que entrega la capacidad de atención en cada instante de tiempo. Este módulo contiene toda la información sobre la lógica de operación de cada establecimiento, las priorizaciones para atender pacientes y las decisiones sobre derivaciones, así como también los recursos que se utilizan al atender cada categoría médica de pacientes. De esta manera, se realiza un modelo de eventos discretos que permite simular el flujo de los pacientes una vez llegan al establecimiento, tanto de aquellos generados por el Módulo 2 producto del evento sísmico, como de aquellos que se manejan en condición normal.

2.6 Módulo 6: Riesgo

El Módulo 6 es el encargado de realizar todo el post-procesamiento de la información recopilada de los otros módulos. Aquí se calculan las métricas de riesgo y resiliencia, pudiendo evaluar los resultados de los otros módulos y definiendo parámetros que permitan cuantificar los efectos de un evento sísmico en la funcionalidad de la red y su impacto en la sociedad, así como de las distintas medidas de mitigación que se puedan implementar.

Este motor de cálculo puede cuantificar tiempos de atención, tiempo que tarda cada sala o establecimiento en estar operativo nuevamente, costos de reparación, entre otras medidas.

2.7 Módulo 7: Planificación

Este módulo se enfoca en evaluar el impacto que pueden tener distintas medidas de mitigación en la resiliencia de la red de salud de urgencia. Existen dos grandes tipos de medidas de mitigación definidos. Por una parte, se encuentran aquellas que tienen que ver con un mejoramiento físico de la red, el que se realizaría de manera preventiva. Esto abarca desde reforzar estructuralmente los establecimientos, incorporar aislamiento sísmico, modificar los tipos de componentes como los anclajes de los equipos médicos o los cielos falsos, aumentar la cantidad de camas, entre otros. Por otro lado, están aquellas medidas que se enfocan en el funcionamiento a nivel operacional de los distintos establecimientos de la red. Estas medidas pueden incluir aumento de personal o redistribución de éste, modificaciones en las prioridades de atención de pacientes, en las derivaciones entre establecimientos, el agregar hospitales de campaña durante emergencias, incorporar ambulancias, definir el orden de reparación de establecimientos y salas dañadas, entre otras.

El Módulo 7 generará portafolios con grupos de medidas de mitigación de distintos tipos, para poder cuantificar su impacto en las métricas de riesgo y resiliencia que se obtienen del Módulo 6. Esta evaluación podrá incorporar costos asociados a reparación, reconstrucción o reemplazo de elementos de la red, tiempos de atención, número de fallecidos, tiempos en que cierto establecimiento no se encuentra operativo, entre otras.

2.8 Módulo 8: Interfaz de usuario

Para permitir que la plataforma sea accesible no solo por el equipo investigador experto en cada área, sino también por aquellos usuarios que son los tomadores de decisiones de cada Servicio de Salud, se debe crear una interfaz de usuario

que sea adecuada para el entendimiento e interpretación de los resultados de las simulaciones. Esta interfaz permitirá diferenciar entre tipos de usuarios, otorgando distintos permisos de modificación de datos y parámetros, así como de interacción con los resultados y las métricas que se obtienen. En la Fig. 4 se presentan dos ejemplos de partes de esta interfaz, los que están siendo desarrollados por un equipo que se encarga de los aspectos de visualización y experiencia de usuario, para asegurar un correcto funcionamiento de SimPlaNeR en su conjunto y una forma adecuada de entregar la información a los usuarios finales.

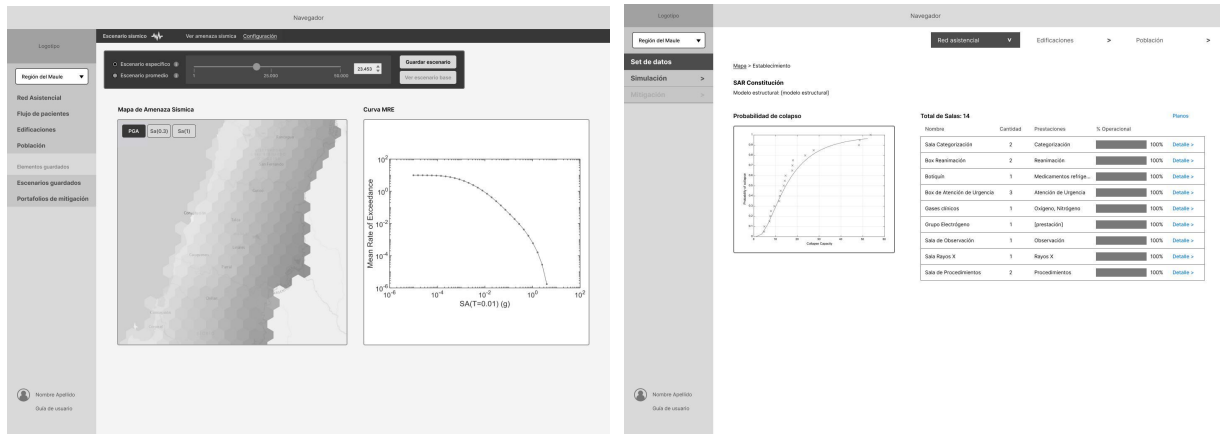


Fig. 4 - Ejemplos de wireframes para la interfaz de usuario, para los módulos 1 y 4.

3 Resultados

Esta plataforma es parte de un proyecto de investigación que se encuentra en desarrollo, por lo que hasta esta primera etapa se tienen resultados del desarrollo de los módulos 1, 2, 3, 4 y 6, mientras que los módulos 5, 7 y 8 están siendo programados en etapas iniciales. A pesar de esto, todos los módulos de esta herramienta siguen en constante evaluación y perfeccionamiento, buscando nuevas formas de llevar a cabo los procesos y cálculos requeridos, así como también optimizando los códigos asociados y las funciones respectivas.

Los resultados obtenidos en esta primera etapa pueden separarse en tres grandes grupos, divididos por temática y módulos. En cuanto al Módulo 1, se tienen como resultado 42 rutinas con códigos Python 3 que realizan los cálculos asociados a la amenaza. Como se mencionó, estas rutinas fueron traducidas desde el software SeismicHazard, por lo que se hicieron pruebas para comprobar que los resultados obtenidos fueran coincidentes con los del software original. En la Fig. 5 se muestra parte del proceso de validación de los nuevos códigos, en que se observa que no existe error entre la simulación hecha por SeismicHazard y aquella obtenida con SimPlaNeR. Una vez hecha esta validación, los resultados de este módulo incluyen mapas de medidas de intensidad como PGA y aceleración espectral, los que pueden ser solicitados para cualquier punto de Chile.

Para el Módulo 2, los resultados pueden agruparse en secciones. En primer lugar, se tiene desarrollado el modelo de exposición de la Región Metropolitana, lo que incluye la distribución de las edificaciones y sus características y tipologías, así como la distribución espacial de la población, todo dividido por manzanas censales. Como ejemplo se ilustra en la Fig. 6 la distribución de la población y la cantidad de edificaciones por manzana censal. En segundo lugar, se tiene asociado a cada tipología estructural un conjunto de funciones de fragilidad que representan cada estado de daño de las estructuras. En tercer lugar, este módulo ejecuta un modelo de generación de heridos basado en el modelo de HAZUS [12]. Por último, se tiene desarrollado el motor de cálculo que obtiene el tiempo de traslado de cada herido desde el lugar en el que se produce la lesión hasta el centro asistencial que le corresponde, lo que se realiza utilizando la API de Google Maps [13]. Se muestra un ejemplo de esto en la Fig. 7.

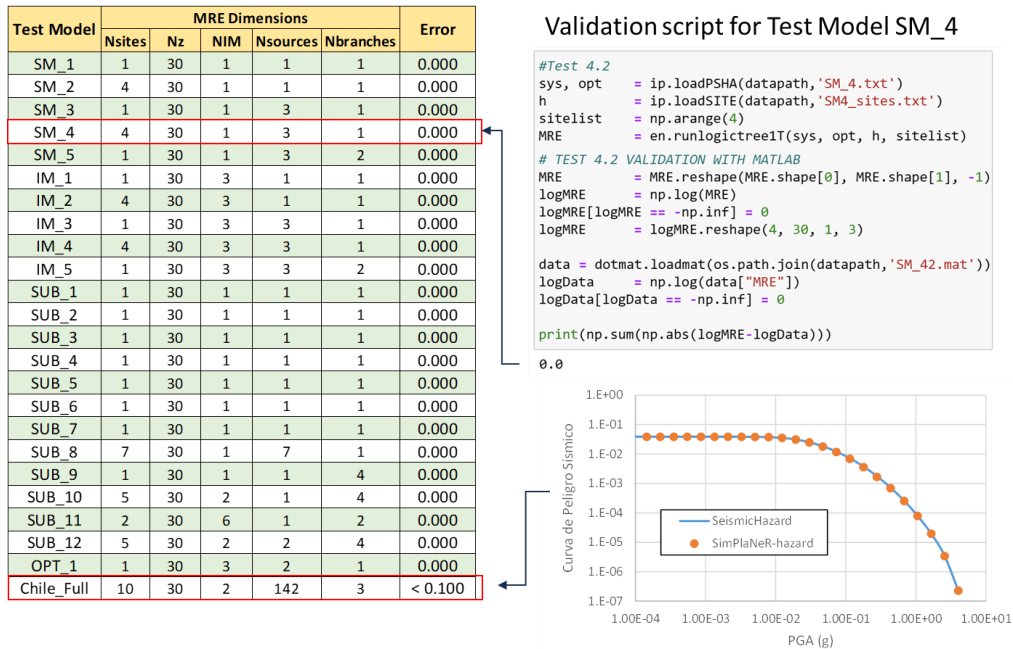


Fig. 5 - Panel izquierdo: resumen de los test de validación y error de cada test. Inserto superior derecho: código Python 3 utilizado para comparar las salidas de SimPlaNer vs SeismicHazard; en este ejemplo, el error total entre ambos códigos es 0.00. Inserto inferior derecho: se muestra una comparación de las curvas de peligro entre ambos módulos para un modelo sísmico de alta complejidad.

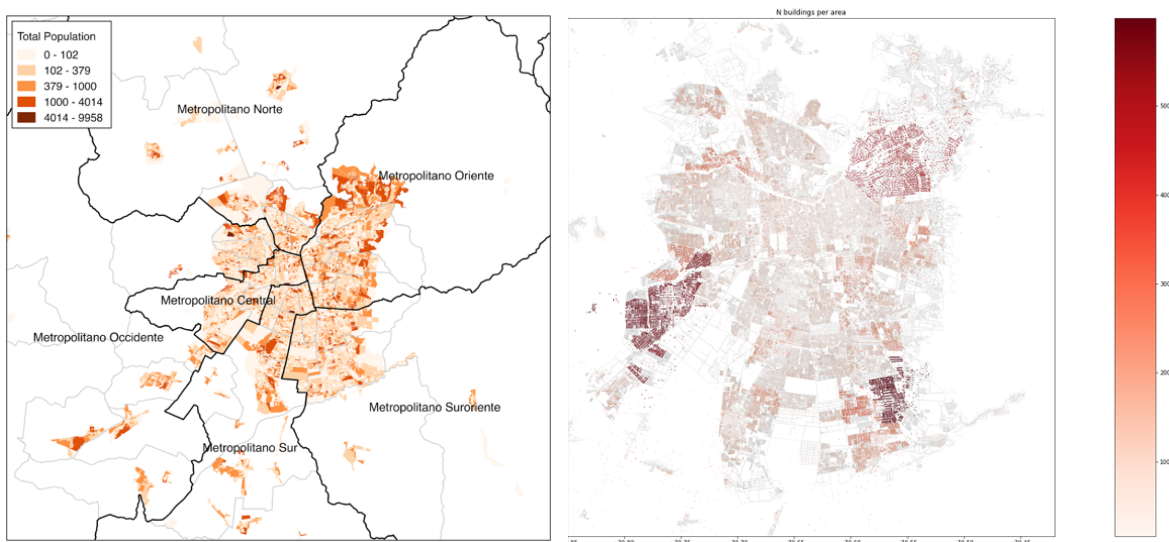


Fig. 6 - Izquierda: distribución de población por manzana censal. Derecha: número de edificaciones por manzana censal.

Para los módulos 3, 4 y 6 se desarrolló un ejemplo de red para poder así evaluar el funcionamiento de los procesos elaborados. Se definieron dos establecimientos ficticios, con sus coordenadas espaciales y contenidos ficticios, cuya base de datos de salas, perteneciente al Módulo 3, se muestra en la Fig. 8. Luego, para cada establecimiento se construyó un modelo estructural simplificado, basado en una de las dos metodologías que se desarrollaron como parte del Módulo 4, las cuales fueron elaboradas a partir de las indicaciones del FEMA-P58 Volumen 1 [14].

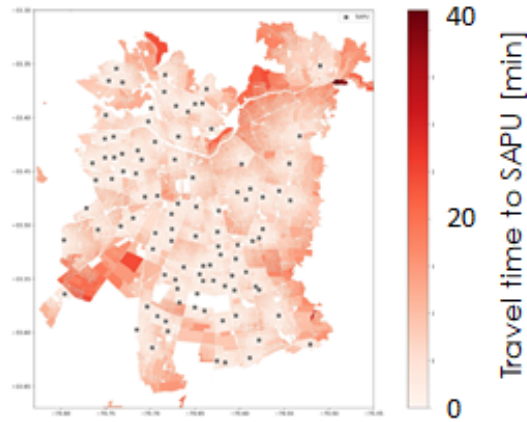


Fig. 7 - Tiempo de viaje desde distintos puntos de la Región Metropolitana a los recintos asistenciales de urgencia asignados.

SAR	X	Y	Piso	SAPU	X	Y	Piso
Sala Categorización	-5.54	-0.75	0	Sala Categorización	-5.54	-0.75	0
Box Reanimación	-5.18	-5.86	0	Box Reanimación	-5.18	-5.86	0
Botiquin	-2.37	-5.86	0	Botiquin	-2.37	-5.86	0
Box Atencion de urgencia	0.44	-5.86	0	Box Atencion de urgencia	0.44	-5.86	0
Gases Clinicos	9.08	-4.79	0	Gases Clinicos	9.08	-4.79	0
Grupo Electrogenero	12.34	-4.79	0	Sala de Observación	6.41	-1.16	0
Sala de Observación	6.41	-1.16	0	Sala de Observación	6.41	-1.16	0
Sala Rayos X	11.03	-2.03	0	Sala de Procedimientos	4.64	4.64	0
Sala de Procedimientos	4.64	4.64	0				

Fig. 8 - Inventario de salas de establecimientos: izquierda un SAR, derecha un SAPU.

El primer modelo corresponde a dos sub-modelos planos lineales, desacoplados entre sí, que representan el comportamiento estimado de la estructura en cada dirección. La metodología permite estimar los drifts de entrepiso a partir del peso de la estructura, la pseudo aceleración espectral respectiva, su período fundamental y ciertos coeficientes que permiten corregir por el comportamiento no lineal teniendo en cuenta la tipología estructural. Esta metodología también entrega las aceleraciones máximas por piso, a partir del PGA y de los parámetros ya mencionados.

El segundo modelo consiste en tres pasos. El primero corresponde a la elaboración de un modelo en tres dimensiones, no-lineal y detallado de la estructura en cuestión. El segundo paso implica definir una medida de intensidad adecuada para caracterizar el futuro modelo, y seleccionar un total de N niveles de intensidad para esta medida (e.g., PGA = 0.05g, 0.1g, ..., 1g). Para cada uno de estos niveles se seleccionan un total de m registros sísmicos, compatibilizados con el nivel de intensidad N_i . El analista debe entonces definir n valores de EDPs de interés que se medirán en cada simulación estructural (e.g., si son 3 pisos, podrían ser 6 valores, es decir, 3 drift de entrepiso máximos, y 3 aceleraciones máximas de piso). Entonces, se toma el modelo estructural no-lineal y se somete a cada uno de m registros sísmicos, para cada uno de los N niveles de intensidad, obteniendo n EDPs en cada caso. Los valores de EDP así obtenidos se ordenan en N matrices de parámetros de demanda \mathbf{X} , cada una de de dimensión $m \times n$. Para cada nivel de intensidad se toma la \mathbf{X} y se calcula el logaritmo natural de sus componentes, obteniéndose la matriz \mathbf{Y} , de dimensión $m \times n$. A cada una de las N matrices de observaciones \mathbf{Y} se le ajusta una distribución lognormal multivariada, obteniéndose el vector fila \mathbf{M}_i de $1 \times n$ que contiene las medias de cada parámetro, y la matriz de covarianzas Σ_{Y_i} de $n \times n$. El modelo subrogado puede entonces emplearse para simular de forma rápida respuestas estructurales en la EDPs (debidamente correlacionadas) seleccionadas por el analista. Una realización \mathbf{Z} puede obtenerse como se muestra en la Ec. (3).

$$\mathbf{Z} = \mathbf{L}_{np} \mathbf{D}_{pp} \mathbf{U} + \mathbf{M}_Y. \tag{3}$$

En la Ec. (3), \mathbf{U} es un vector de n variables aleatorias normales estándar no correlacionadas, p es el rango de la matriz Σ_{YY} , \mathbf{L}_{np} es una matriz con los vectores propios de Σ_{YY} y \mathbf{D}_{pp} es una matriz diagonal con las raíces cuadradas de los valores propios de Σ_{YY} . Una vez obtenido \mathbf{Z} , se aplica la exponencial a cada valor y se obtienen así estimaciones de las EDPs requeridas en la estructura.

Teniendo definida la red de salud y los modelos estructurales, se procedió a simular el desempeño físico para un escenario sísmico en particular, lo que corresponde a la ejecución completa del Módulo 4, tomando datos de entrada de los Módulos 1 y 3. Al seguir la metodología de evaluación de daño ya explicada, se puede construir la línea de tiempo completa para cada prestación y para cada establecimiento, mostrando cómo el sismo disminuye la capacidad al producir daño, y cómo esta se recupera en el tiempo. Lo anterior se ilustra en la Fig. 9, que muestra las curvas de recuperación de cada establecimiento, de forma agregada y desagregada.

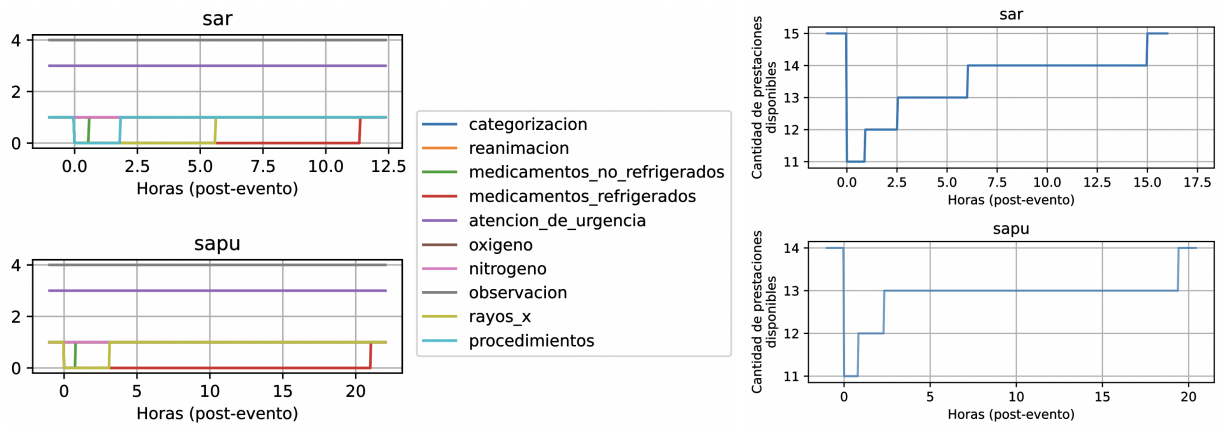


Fig. 9 - Ejemplo de curvas de recuperación de salas y prestaciones.

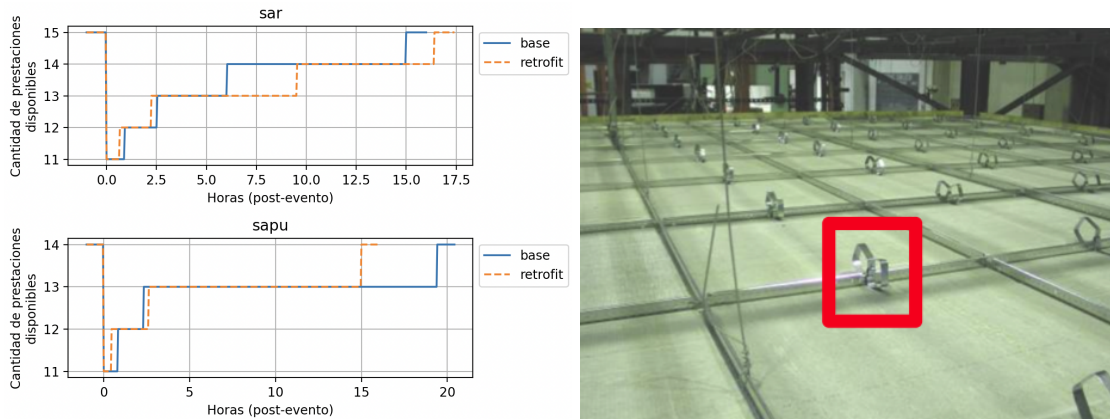


Fig. 10 - Cambio en curvas de recuperación en establecimientos (izquierda) si se considera como medida de prevención el uso de cielos falsos con ganchos sísmicos (derecha).

Además, como parte del desarrollo del Módulo 6 se evaluó el impacto que tiene en las curvas de recuperación la modificación de uno de los componentes de las salas. Se cambió el cielo falso común por uno con ganchos sísmicos, lo que implica una modificación de las funciones de fragilidad de este componente, lo que disminuye su probabilidad de dañarse y fallar frente a movimientos sísmicos. Debido a este cambio, las distintas salas que presentan este componente fallan en menor tasa, y la recuperación se hace más rápida. Esto se ilustra en la Fig. 10, tanto para el SAR como para el SAPU simulados.

4 Conclusiones

Dado lo importantes que son las redes críticas (e.g., agua potable, carreteras, hospitales) para un funcionamiento adecuado de la sociedad, es crucial que estas sean resilientes. En particular, la red de salud de urgencia es una pieza clave para enfrentar grandes amenazas, y debe estar debidamente preparada. El terremoto del Maule de 2010 mostró que hay bastante espacio para mejorar, tanto a nivel de prevención (e.g., uso de estructuras antisísmicas) como de mitigación (e.g., reparación inteligente de la red). Sin embargo, no es tarea fácil decidir cómo utilizar los recursos ex-ante o ex-post, pues la red de salud de urgencia es un sistema sumamente complejo y con un fuerte comportamiento no-lineal. Es por esto que surge la necesidad de comprender el funcionamiento de la red de salud de urgencia en Chile, tanto en condición normal como tras un sismo, para poder así orientar la planificación y políticas públicas que permitan mejorar su desempeño. Con esto en mente, es que se busca desarrollar una herramienta que integre el comportamiento de todos los elementos necesarios para este análisis, SimPlaNeR. Esta corresponde a una plataforma de simulación y evaluación del riesgo para la gestión integrada y planificación óptima de recursos críticos en redes de salud de emergencia, para enfrentar condiciones extremas en la demanda hospitalaria. Esta plataforma busca evaluar el riesgo y mejorar la resiliencia de la red de salud de urgencia tras un sismo de gran severidad, utilizando el conocimiento de frontera en el tema.

Dado que la construcción de la plataforma abarca distintas áreas de conocimiento, como la generación del sismo, la respuesta estructural, el impacto sobre la funcionalidad de la red, y la optimización de portafolios de mejoramiento, es que se optó por dar a SimPlaNeR una estructura modular, que permite empaquetar los desarrollos y facilitar la actualización y mantenimiento de la misma. Así, SimPlaNeR tendrá un total de 8 módulos, donde cada uno de ellos puede funcionar de manera independiente, obteniendo resultados valiosos por sí solos, aunque el mayor valor surge cuando todos los módulos trabajan de forma coordinada, integrando la información para generar métricas que permitan evaluar el riesgo y resiliencia a nivel de la red completa, para que el tomador de decisiones escoja medidas de preparación y mitigación que sean óptimas. Cada uno de estos módulos tiene avances y desarrollos logrados, pudiendo obtener mapas de amenaza sísmica, conociendo los modelos de exposición de la ciudad, las personas y la red de salud y estimando heridos. Además, los módulos permiten estimar la respuesta estructural de los establecimientos de salud y sus consecuencias en la funcionalidad que ofrecen, lo que repercute en el flujo de los pacientes.

De esta manera, esta plataforma busca calcular parámetros que describan el nivel de riesgo y resiliencia que presentan las redes de salud, específicamente en Chile.

Agradecimientos

Esta investigación se llevó a cabo gracias a tres proyectos adquiridos, FONDEF ID22110050, FONDECYT 1220292 y FONDAP 1522A0005, todos entregados por ANID.

Referencias

- [1] Yavari, S., Chang, S. E. & Elwood, K. J. Modeling Post-Earthquake Functionality of Regional Health Care Facilities. *Earthquake Spectra* **26**, 869–892 (2010).
- [2] Masi, A. *et al.* Performance of the health facilities during the 2012 Emilia (Italy) earthquake and analysis of the Mirandola hospital case study. *Bull Earthquake Eng* **12**, 2419–2443 (2014).
- [3] MINSAL. Reconstrucción red hospitalaria.
- [4] Poulos, A., Monsalve, M., Zamora, N. & de la Llera, J. C. An Updated Recurrence Model for Chilean Subduction Seismicity and Statistical Validation of Its Poisson Nature. *Bulletin of the Seismological Society of America* **109**, 66–74 (2019).
- [5] Python 3 Software Foundation. Welcome to *Python 3.org*. *Python 3.org* <https://www.Python 3.org/>.
- [6] Candia, G., Macedo, J., Jaimes, M. A. & Magna-Verdugo, C. A New State-of-the-Art Platform for Probabilistic and Deterministic Seismic Hazard Assessment. *Seismological Research Letters* **90**, 2262–2275 (2019).

- [7] Montalva, G. A., Bastías, N. & Rodríguez-Marek, A. Ground-Motion Prediction Equation for the Chilean Subduction Zone. *Bulletin of the Seismological Society of America* **107**, 901–911 (2017).
- [8] Abrahamson, N. A. & Gulerce, Z. Summary of the Abrahamson and Gulerce NGA-SUB ground-motion model for subduction earthquakes. *Earthquake Spectra* **38**, 2638–2681 (2022).
- [9] Idriss, I. M. An NGA-West2 Empirical Model for Estimating the Horizontal Spectral Values Generated by Shallow Crustal Earthquakes. *Earthquake Spectra* **30**, 1155–1177 (2014).
- [10] Aldea, S., Heresi, P. & Pastén, C. Within-event spatial correlation of peak ground acceleration and spectral pseudo-acceleration ordinates in the Chilean subduction zone. *Earthq Engng Struct Dyn* **51**, 2575–2590 (2022).
- [11] Abrahamson, N., Gregor, N. & Addo, K. BC Hydro Ground Motion Prediction Equations for Subduction Earthquakes. *Earthquake Spectra* **32**, 23–44 (2016).
- [12] FEMA. Hazus Earthquake Model Technical Manual. (2022).
- [13] Google. Google maps API. https://developers.google.com/maps/apis-by-platform#web_service_apis.
- [14] FEMA. P-58: Seismic Performance Assessment of Buildings. Volume 1 - Methodology. (2018).