

SEISMO: instrumento de diagnóstico digital para el catastro asistido de daños estructurales durante la postemergencia sísmica

Orlando Vigouroux Jaime

Escuela de Arquitectura, Pontificia Universidad Católica de Chile

ovigouro@uc.cl

Carlos Aguirre Núñez

Universidad San Sebastián

carlos.aguirre@uss.cl

Camilo Meneses Ferrada

Pontificia Universidad Católica de Chile

cimenes@uc.cl

DOI: 10.7764/AA.2023.09

Resumen

SEISMO estudia la emergencia sísmica, buscando la creación de instrumentos de asistencia que permitan mejorar el despliegue en terreno de personal técnico y voluntarios para la ayuda de las comunidades afectadas tras un terremoto. Su sistema automatizado de análisis en edificaciones aprovecha el conocimiento de expertos en el diagnóstico estructural, valorizando los posibles daños que emergen en una construcción que, según su sistema constructivo y configuración, brinden soporte técnico al usuario. Este es consultado sobre “síntomas” y “señales” en la vivienda, verificables visualmente sin necesariamente conocer las causas o consecuencias en la edificación, para posteriormente dar una respuesta automatizada sobre su riesgo estructural. De esta manera, el usuario sólo deberá realizar una revisión sistematizada de las zonas de una vivienda guiado por la aplicación SEISMO para asegurar una revisión completa de los posibles daños. La información levantada es compilada en tiempo real en un sistema SIG de hipercartografías territoriales que permite a las entidades pertinentes acceder rápidamente a la información y atender la gravedad de las emergencias según sus conocimientos. En la actualidad el sistema está en su modelo beta, contemplando cuatro sistemas constructivos en un piso: albañilería simple, albañilería armada, albañilería confinada y hormigón.

Palabras clave: sismo, estructuras, tecnologías, análisis de datos.

INTRODUCCIÓN

Chile es un país sísmico en el que los terremotos afectan las edificaciones y ponen en peligro la vida de sus habitantes. Como antecedente histórico debemos considerar que el terremoto de mayor magnitud registrado a nivel mundial se vivió dentro de nuestro territorio (22 de mayo de 1960 – Valdivia – Magnitud 9,5 Mw), lo que sumado al terremoto de 1968 en Arica y al vivido hace sólo doce años (27 de febrero del 2010 – Cauquenes – Magnitud 8,8 Mw) nos convierte en el país con los tres terremotos más potentes registrados en la historia de Latinoamérica (BBC 2017). Sólo este último, según datos oficiales, registró daños en más de 233 comunas entre las regiones de Valparaíso y La Araucanía con 525 víctimas fatales, más de 2 millones de damnificados, 133 hospitales siniestrados y 6.168 establecimientos educacionales con daños significativos. En cuanto a viviendas, un total de 81.444 edificaciones resultaron destruidas, 108.914 con daño mayor y 179.693 con daño menor. Esto nos entrega una dimensión de 370.051 viviendas siniestradas y, a su vez, familias en situación de vulnerabilidad tras la catástrofe (Gobierno de Chile 2010).

Si bien nuestro país tiene experiencia en tratar con estas situaciones, aún existen falencias importantes en el período de la emergencia. Durante la etapa de respuesta temprana, inmediatamente después de ocurrido un terremoto, la primera acción necesaria es la evaluación del estado de las construcciones en el área afectada para organizar las acciones que aseguren el bienestar de los afectados. Esta actividad, enmarcada en lo que se conoce como “evaluación estructural rápida - UEER, Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior - ONEMI, actualmente Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres - SENAPRED, se realiza gracias a grupos de voluntarios, donde principalmente estudiantes universitarios, bomberos, paramédicos y funcionarios públicos evalúan y determinan el estado de las viviendas. Este contingente es preparado mediante capacitaciones básicas, utilizan distintas fichas de análisis dependiendo de la institución que levanta el dato y posteriormente digitalizan la información para su análisis, proceso que puede durar meses antes de tener una respuesta efectiva.

Considerando este contexto surge SEISMO¹, un sistema que busca sistematizar el conocimiento de expertos en el diagnóstico estructural, analizando múltiples casos simulados y valorizando los posibles daños que emergen en una construcción siniestrada. Según los métodos constructivos y la configuración de las viviendas, y teniendo en cuenta una extrapolación didáctica de las dinámicas propedéuticas médicas, genera un instrumento de diagnóstico estructural asistido para el proceso de respuesta temprana. El voluntario es consultado por “síntomas” y “señales” en la vivienda, que son

verificables visualmente sin conocer las causas o consecuencias estructurales en la edificación. De esta manera, el usuario sólo debe realizar una revisión sistemática de las zonas de la vivienda siniestrada, siendo guiado en el proceso para asegurar una evaluación completa de los posibles daños enunciados por el sistema y, ante su aparición, el dispositivo realiza un análisis automatizado de la gravedad de estos, indicando con un margen amplio de seguridad cuando la vivienda no esté en condiciones de ser habitada.

Con esta información, las distintas entidades públicas y privadas podrán determinar cursos de acción durante el período crítico, disponiendo de recursos en base a un levantamiento preliminar sistematizado. Se espera que posterior a la etapa de emergencia, diversos expertos puedan asistir al lugar para realizar las evaluaciones finales, teniendo como base el levantamiento preliminar realizado por SEISMO para así establecer prioridades de sectores y edificaciones por analizar.

Sumado a lo antes expuesto, mediante la publicación de la Ley N° 21.364, ONEMI ha recibido una nueva misión: promover —junto a otros actores públicos y privados— la acción preventiva ante la emergencia, conformando el nuevo Sistema y Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (Ministerio del Interior y Seguridad Pública 2017). Esta misión no es posible de lograr sólo con la información actual ni con los avances tecnológicos desarrollados a la fecha, por lo que SEISMO ayudará como herramienta de asistencia de emergencia y también mediante campañas de análisis del estado de las edificaciones para la prevención de desastres.

ANTECEDENTES

Los sistemas de levantamiento de información utilizados en Chile se basan en fichas a completar por funcionarios de los distintos organismos públicos o simplemente por voluntarios, quienes muchas veces carecen de conocimientos técnicos en la materia. Dentro de las fichas más utilizadas encontramos las siguientes:

- Ficha Técnica N° 1 “Sector afectado”: es un instrumento MINVU de registro y evaluación técnica de áreas afectadas.
- Ficha Técnica N° 2 “Catastro individual de viviendas afectadas”: es un instrumento MINVU de registro y evaluación técnica de viviendas afectadas.
- Informe Alfa y Delta: documento del Plan Nacional de Protección Civil.
- Ficha EFU: encuesta Familiar Única para la identificación y priorización de las necesidades de las familias afectadas.
- Informe Edanis “Informe Único de Evaluación de Daños y Necesidades”: evaluación de daños a infraestructuras y servicios a nivel municipal, entre otras.

Una vez completadas, las fichas son entregadas a los departamentos correspondientes para ser digitalizadas, procesadas y evaluadas, lo cual puede tomar varios meses desde ocurrido el sismo. En muchas ocasiones esta información no llega a ser procesada, por ende, los datos levantados no son de utilidad directa en el período de emergencia, sino más bien un registro de la situación que puede ser analizado en etapas posteriores, como reconstrucción o análisis investigativo. De este modo, el período de emergencia queda enfrentado más a estimaciones que a datos concretos. Por otra parte, no existe cruce de información entre las distintas fichas y estamentos, por lo que se genera información duplicada y, en algunos casos, contradictoria.

En la actualidad, las metodologías de levantamiento de información han sufrido importantes transformaciones debido a la proliferación de nuevas tecnologías de registro y almacenamiento disponibles ampliamente en la población. En el ámbito de los sistemas de alerta temprana posterremoto (EEW; *Earthquake Early Warning Systems*) se evidencia que uno de los problemas más recurrentes es la duración, disponibilidad y coordinación de la información que registran los equipos de expertos y voluntarios que realizan los catastros.

El creciente desarrollo de tecnologías y avances en la comprensión de los fenómenos físicos de alta complejidad relacionados con los peligros naturales, ha promovido la utilización de estas herramientas, indagando en la posibilidad de incorporar como un medio válido la red masiva de dispositivos móviles ampliamente distribuidos por el territorio. Sin embargo, existen importantes brechas entre el desarrollo de las investigaciones aplicadas y la capacidad de coordinar estos registros con los sistemas existentes de registro en el contexto de la emergencia. Algunos de los estudios más recientes exploran nuevas perspectivas (Cremen y Galasso 2020), incorporando tecnologías del tipo UAV-based (Kerle et al. 2020) o la realidad virtual que ha sido utilizada para eventos de preparación ante un evento sísmico reforzando las medidas de evaluación en general (Lovreglio et al. 2017).

Existen aspectos organizativos de la planificación e inspección de los edificios que han sufrido condiciones de emergencia luego de un fuerte sismo o terremoto. Luego de haber analizado la evaluación de daños y usabilidad de los edificios en 2004, Anagnostopoulos y Moretti (2008) han desarrollado un programa de computadora PEADAB (*Post-Earthquake Assessment of Damaged Buildings*, en inglés) para apoyar la planificación y ejecución de esas operaciones en el contexto griego. Ellos han propuesto un formulario de inspección de daños por terremoto (EDIF, *Earthquake Damage Inspection Form*) que permite evaluar los daños en relación a la seguridad y usabilidad del edificio. La información permite

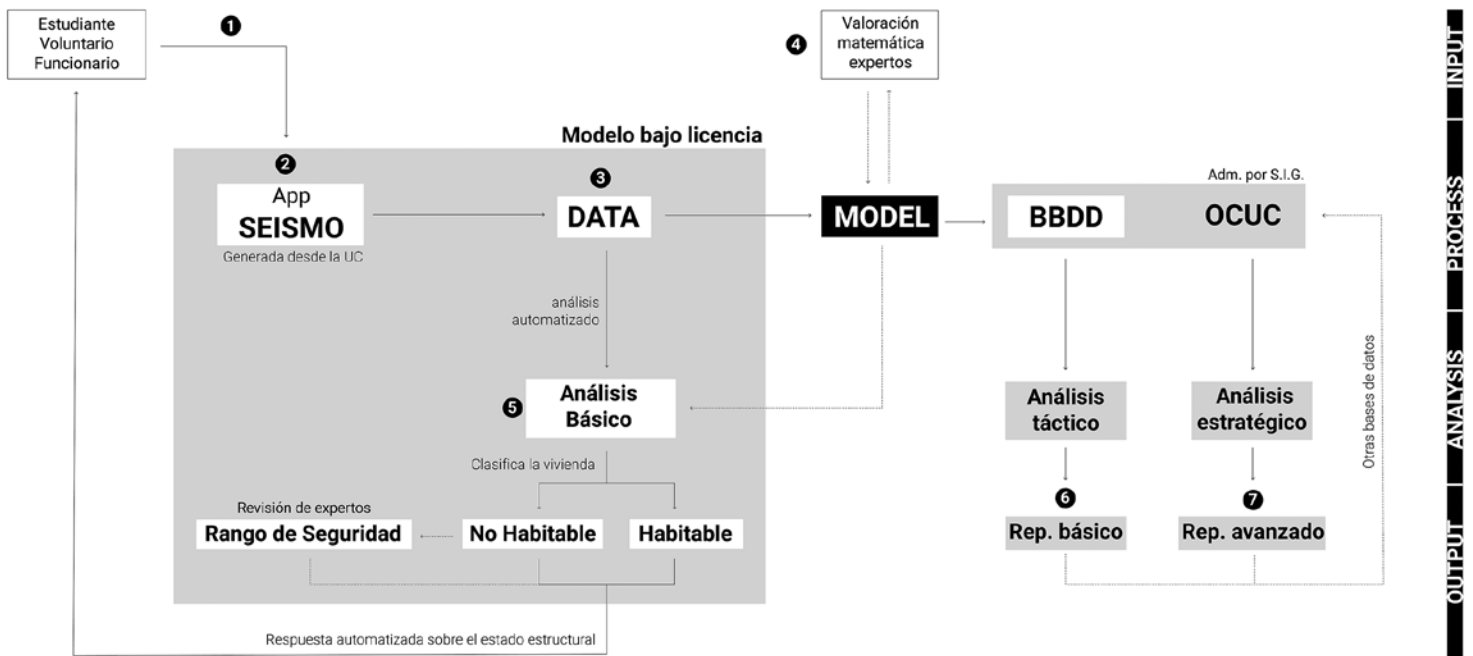


FIG. 01: Diagrama de flujo SEISMO. Fuente: elaboración propia equipo SEISMO, 2018

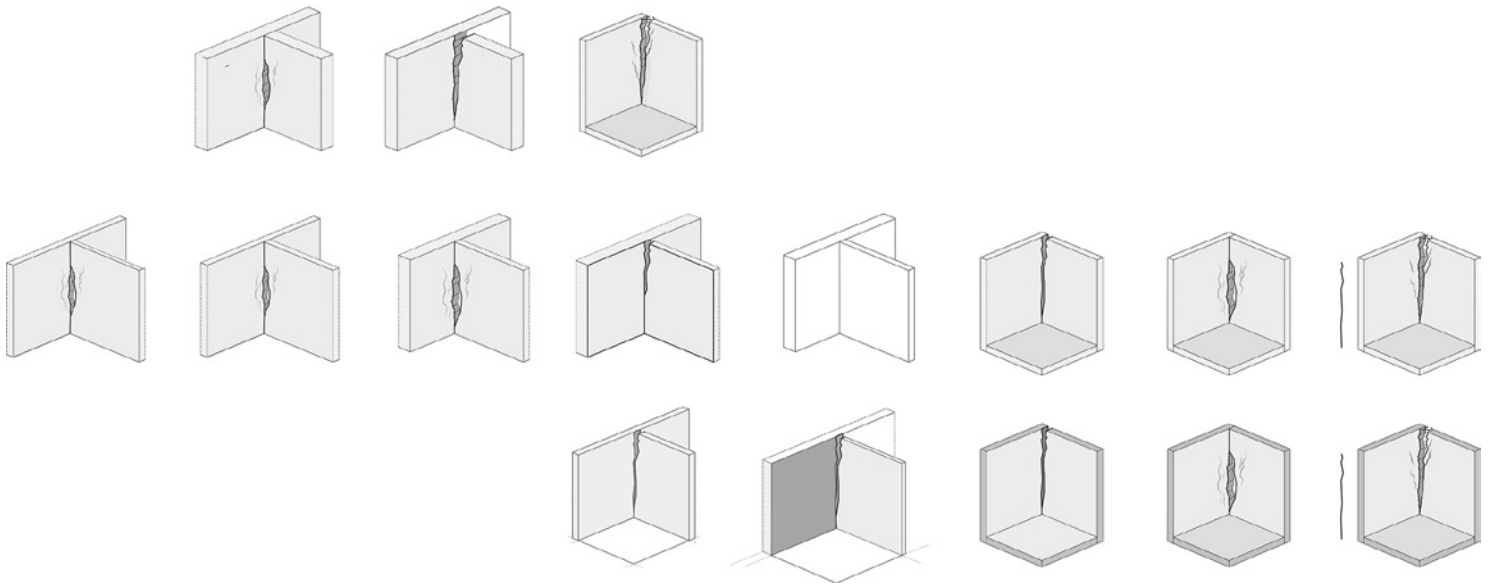


FIG. 02: Ejemplos de variantes gráficas por daños en esquinas. Fuente: elaboración propia equipo SEISMO, 2022

respaldar la planificación, el establecimiento y la ejecución de la operación a través de un sistema informático diseñado para este propósito. Similar trabajo ha sido realizado por Baggio et al. (2007) en el contexto italiano a partir de la evaluación de la usabilidad de edificios residenciales después del terremoto (también documentado por Di Ludovico et al. 2019). En esta línea, y en el contexto de la evaluación de daños en edificios patrimoniales, Cacciotti et al. (2015) ha propuesto una metodología que procesa, a través de tecnologías web, distintos tipos de manifestaciones de daños para edificios históricos con el propósito de mapear, compartir y procesar conocimiento.

En otros aspectos, debemos considerar que la temporalidad en la toma de datos también es un factor relevante. La evaluación de daños, por lo general, se hace una vez que la actividad de réplicas ha disminuido, ya que la inspección (especialmente manual) se centra en los edificios que visualmente presentan daños, siendo potencialmente inseguro acceder o permanecer en ellos. El paso posterior a la recolección de datos manuales es la elaboración de la ficha digital, similar a lo utilizado luego del 27F en Chile.

En Turquía se ha desarrollado investigación centrada en la planificación de escenarios en

distintos lugares del país ante un terremoto. Platt & Drinkwater (2016) centran su investigación en la recuperación y reubicación de las viviendas, en la planificación de escenarios y en el proceso de uso de la información disponible para la toma de decisiones. El planteamiento aborda las determinaciones que se toman en el momento de la emergencia, lo que implica decisiones inmediatas, pero que tendrán repercusiones en el largo plazo. Las decisiones urgentes en este tipo de desastres, que resultan complejas y difíciles, pueden dar lugar a políticas reactivas que aumenten la vulnerabilidad de las poblaciones afectadas en el largo plazo (Ingram et al. 2006).

FUNCIONAMIENTO

SEISMO es un asistente digital de evaluación diagnóstica basado en el reconocimiento visual guiado por voluntarios no expertos. Su objetivo es registrar, valorar e interpretar la situación de una edificación durante el catastro de daño estructural rápido postsismo. A diferencia de otros sistemas que utilizan fotometría o instrumentaria especializada para reconocimiento estructural, SEISMO utiliza una metodología de análisis por patología desde síntomas, extrapolación de la propeútica médica, lo que permite al usuario identificar los efectos del daño sísmico en la vivienda. Esto se logra simulando el estado actual de la edificación y calculando el daño en base a un algoritmo de interpretación basado en un modelo PROBIT, lo que permite generar de manos de un voluntario no experto, información similar al levantamiento en terreno por un experto.

Como validación y calibración del sistema, y entendiendo que debe ser testeado previo a un sismo, SEISMO es utilizado en simulaciones mediante realidad virtual, permitiendo a usuarios no expertos utilizar la aplicación SEISMO para recorrer escenarios de viviendas dañadas, datos que son comparados en par ciego con expertos en base a su conocimiento teórico-práctico en peritaje estructural.

Para su puesta en marcha, cualquier persona podrá utilizar SEISMO mediante descarga para dispositivos móviles. La aplicación registrará la información y dará de manera automatizada un resultado de habitable o no habitable, análisis básico de la estructura según el algoritmo del sistema constructivo pertinente, considerando un rango de seguridad aceptable ante posibles réplicas del evento sísmico. Posteriormente, la información se almacenará en una base de datos específica que permitirá registrar la información levantada, dar aviso a las entidades pertinentes y generar visualizaciones para análisis posteriores (FIG 01).

METODOLOGÍA

Para desarrollar SEISMO se trabajó con las entidades asociadas al proyecto en la cocreación del sistema en cuatro mesas de trabajo destinadas a resolver las diversas problemáticas derivadas de la investigación, considerando:

MESA 1: DISEÑO DE INTERACCIÓN Y VALIDACIÓN DE SISTEMAS VR

Esta mesa se encargó del desarrollo de la aplicación como interfaz de recopilación de datos, así como de la simulación de viviendas mediante realidad virtual (VR) para la validación de algoritmos predictivos de SEISMO.

1. Interfaz SEISMO

Para el diseño de la interfaz se realizaron diversas encuestas de diseño gráfico y reconocimiento de daños, considerando que existirá

personal no experto que hará los levantamientos. Esta encuesta determinó las directrices principales de la gráfica de la aplicación. Posteriormente se realizó la ruta de levantamiento de información. Esto, para entender la manera más fácil y efectiva de realizar un apropiado levantamiento dentro del tiempo acotado con que se cuenta para una revisión de catastro estructural. Para esta labor se solicitó a diversos expertos que simularan el recorrido de una vivienda, exponiendo sus vivencias ante desastres naturales que, sumado con los requerimientos de los algoritmos de SEISMO, establecen un proceso de levantamiento ideal para la herramienta, independientemente del tipo de usuario.

Uno de los puntos críticos identificados en esta mesa se relaciona con la cuantificación y ubicación de los daños a revisar. Ante esto, el sistema visual comparado para análisis de datos permite a los usuarios cuantificar rápidamente el daño. Luego, la aplicación debe generar una segunda estrategia para ubicar el daño dentro de la vivienda y así establecer si la sumatoria de daños menores podría aumentar el riesgo de daño en una edificación. Para esto se diseñó un sistema de nodos y segmentos que permite que el daño reportado pueda ser identificado espacialmente, proporcionando la información necesaria para que el sistema calcule tanto el daño directo como el daño acumulado en la estructura.

2. SISTEMA DE VALIDACIÓN VR

El desarrollo del simulador de realidad virtual permite recrear el recorrido en una vivienda siniestrada para validar los algoritmos de SEISMO mediante un recorrido de doble ciego entre expertos y no expertos con la aplicación.

Para la validación inicial del sistema y como primer hito de la investigación, se utilizó la información recogida en terreno por el equipo de SEISMO en el sismo de Coquimbo-La Serena en febrero de 2019. Con esto se levantó por completo una de las casas siniestradas en este evento y se realizó la comparación de (i) análisis de expertos de SEISMO en terreno, (ii) declaratoria oficial del MINVU de la vivienda siniestrada, (iii) revisión de expertos en simulador, y (iv) revisión de voluntarios en el simulador utilizando SEISMO. Como resultado se obtuvo un calce de daños de 100%, un calce de concordancia de tipo de daño de un 85% y un calce de diagnóstico final de un 100%.

Con el resultado favorable del hito 1, el equipo de investigación continuó con el desarrollo de viviendas simuladas para diversos sistemas constructivos, las que han sido validadas por expertos mediante metodología DELPHI. Para esto se trabajó con la modelación de elementos y daños de

manera parcelada. Esta estandarización de elementos permite levantar diversas viviendas y variar los daños en ellas de manera rápida, aumentando el número de casos simulados de manera exponencial para los testeos.

Como último resultado de esta mesa, se realizó la validación de cada sistema constructivo de SEISMO de manera individual, considerando el análisis de diversas viviendas en realidad virtual. Con esta validación se establece la asertividad del modelo predictivo de SEISMO y se procede a empaquetar la aplicación para su puesta en marcha en terreno, labor a realizar en la siguiente etapa del proyecto. Cabe destacar que, al ser un sistema de algoritmos predictivos y simulaciones, funciona con un autocalibramiento en base a la cantidad de viviendas catastradas. Es decir, SEISMO mejora su asertividad a medida que es utilizado, ampliando su rango de acción con el paso del tiempo.

MESA 2: MODELO PREDICTIVO MATEMÁTICO – ALGORITMOS Y SISTEMAS CONSTRUCTIVOS

Como primera entrada para el análisis de los sistemas constructivos propuestos se estableció una grilla preliminar de familias e intensidades de daño, las que representan las patologías sísmicas más recurrentes agregadas en cada sistema constructivo. Cada daño es valorizado según su recurrencia en un sismo y el impacto que genera en las estructuras, entendiendo una jerarquía propia del daño, un delta por su recurrencia y una agravante por la sumatoria con otros daños de su misma familia, así como de otros externos. Finalmente, esta grilla deriva en una matriz de cálculo estructural, la que rige el funcionamiento básico de SEISMO para cada sistema constructivo. Esta matriz fue cotejada por un grupo de expertos, incluyendo investigadores de SEISMO e invitados pertinentes, lo que se tradujo en un análisis de esta matriz y en una propuesta de modificaciones. Como ejemplo, para el sistema constructivo de albañilería armada se identificaron seis familias de daño con sus correspondientes intensidades.

Posteriormente, los distintos expertos realizaron evaluaciones de casos con planimetría y material técnico de casos reales, donde declararon el estado de la vivienda según su *expertise* en terreno. Estos resultados fueron cotejados con la declaratoria inicial de los casos de estudio y el resultado de la matriz de daños preliminar de SEISMO, permitiendo una calibración inicial del sistema, así como su validación teórica.

Posteriormente, y como validación final de esta etapa, se realizó un recorrido virtual de los casos estudiados, cotejando resultados de par ciego entre expertos y voluntarios en base

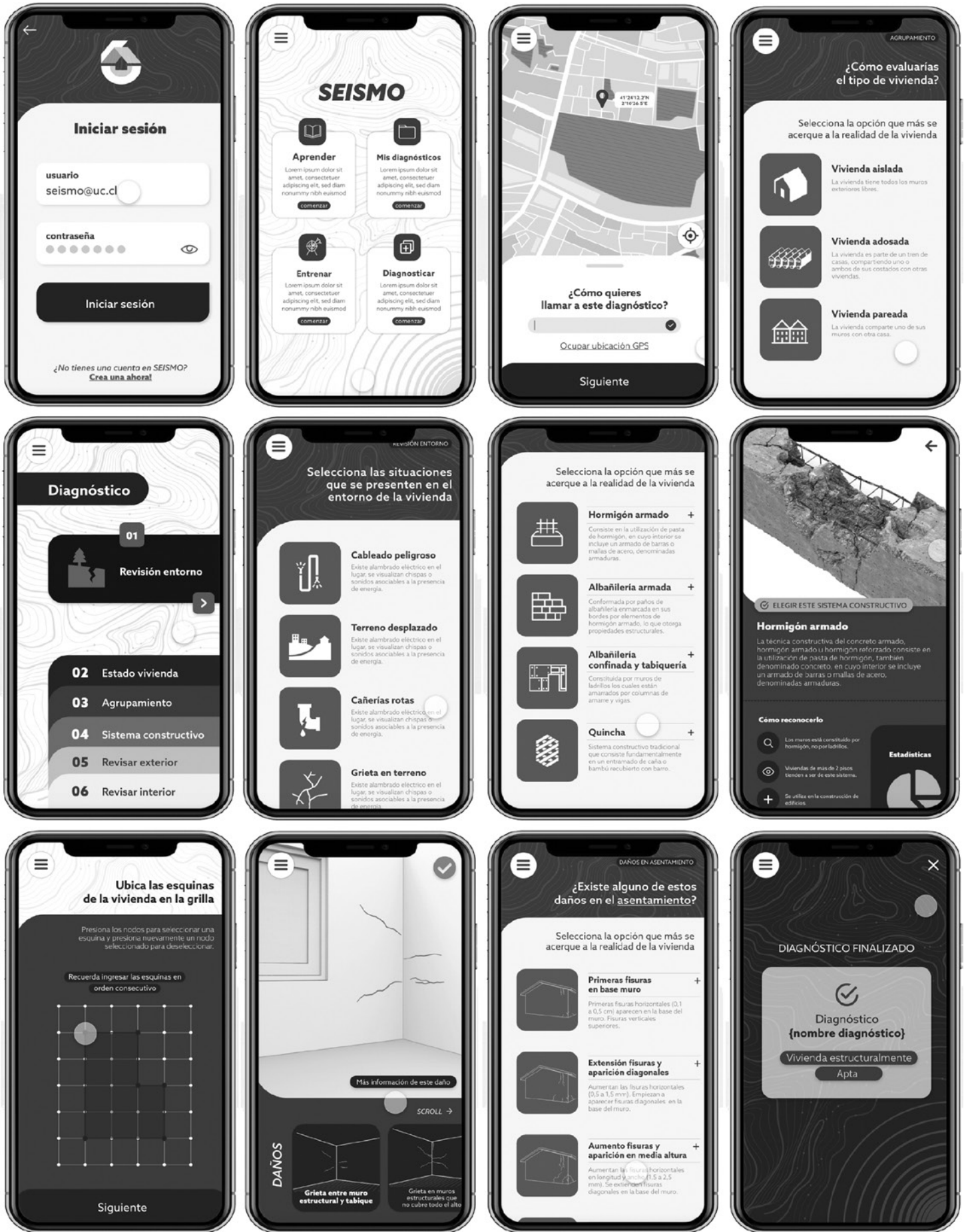
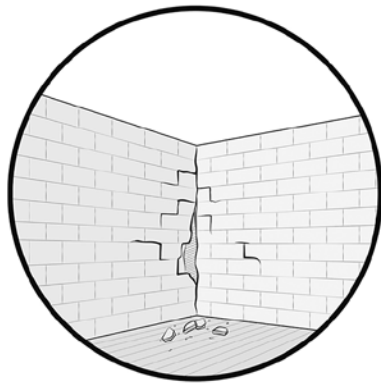
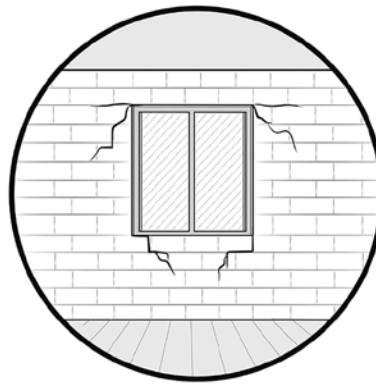


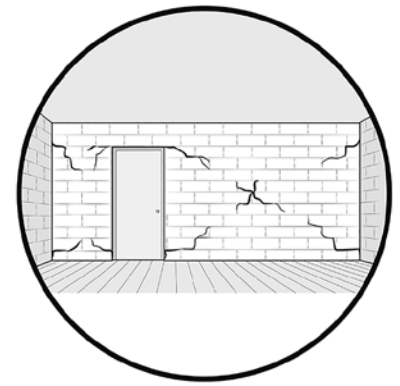
FIG. 03: Interfaz de la aplicación SEISMO. Fuente: elaboración propia equipo SEISMO, 2022



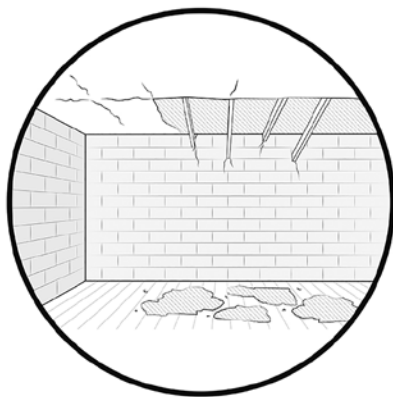
FAMILIA 1
"ESQUINAS / ENCUNTROS DE MUROS"



FAMILIA 2
"DINTELES / ANTEPECHOS"



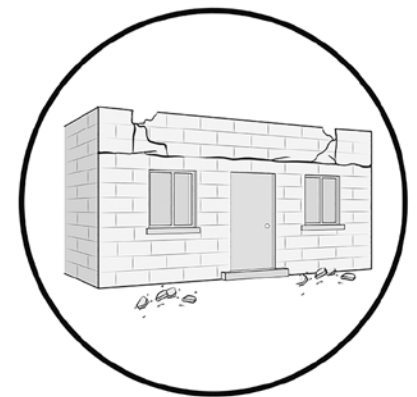
FAMILIA 3
"MUROS Y MACHONES"



FAMILIA 4
"CIELOS Y/O ENTREPISOS"



FAMILIA 5
"ASENTAMIENTOS DE TERRENO"



FAMILIA 6
"FRONTONES, TÍMPANOS Y ANTE TECHOS"

FIG. 04: Ejemplos de familias de albañilería armada. Fuente: elaboración propia equipo SEISMO, 2022

a la matriz de daños de SEISMO. Con esto, el sistema se valida de manera teórica y simulada, quedando pendiente su validación en terreno, ya sea en un sismo de mediana/mayor intensidad o mediante un simulacro de estado de situación.

MESA 3: ANÁLISIS ESTRATÉGICO - TÁCTICO

La acción principal de la mesa 3 consistió en el levantamiento y uso de la información generada por SEISMO, esto por medio del análisis de la base de datos a levantar y, posteriormente, de su plataforma de visualización integrada de información. Gracias a sus categorías de usuarios (trabajo mesa 4), SEISMO establece la precisión del dato a levantar y sus implicancias, estableciendo un registro parcelado de visualización para decisiones estratégicas y tácticas según la credibilidad del usuario que levanta la información.

Para la formulación de este resultado se trabaja con el sistema ARCGIS online del Observatorio de Ciudades UC - OCUC, que como resultado

genera la interfaz SEISMO-OCUC (FIG. 05), plataforma online de actualización en tiempo real que permite visualizar:

- Año de la construcción
- Dirección / Número / Número municipal / Referencia / Población / Zona
- Tipología edificatoria / Sistema de agrupamiento / Materialidad
- Servicios básicos (luz, agua, alcantarillado)
- Daños registrados
- Agencia o personal que registra data

Esto se nutre de la información base de salida del sistema SEISMO, por lo que cualquier información levantada por la aplicación puede ser superpuesta en la plataforma, incluyendo metadata externa identificable según el rol de la vivienda. Como parte de su configuración inicial y a modo de prueba, esta plataforma cuenta con datos del sismo de Coquimbo-La Serena de febrero de 2019, junto con las bases de datos del ISMT y SII, entre otros. En este aspecto, desde la mesa 3 y en colaboración con

los asociados del proyecto, se ha realizado un organigrama general de uso de la información para su correcto resguardo, entendiendo que esta es de carácter sensible y que podría alarmar de manera errónea a la población, generar algún prejuicio o bien ser utilizada de manera maliciosa por terceros.

MESA 4: TRANSFERENCIA Y FORMACIÓN

Parte primordial de la presente investigación se centró en entender la posible inversión del sistema a las lógicas de funcionamiento ante la emergencia. Para esto se realizaron conversaciones y entrevistas con diversos expertos y profesionales del área, a partir de lo que se obtuvo una proyección del mapa de actores estratégicos de la emergencia sumado a la capacidad de la herramienta.

1. SEISMO como asistente para análisis de la vivienda: permite a usuarios no calificados acceder a una herramienta de asistencia, evaluando de manera rápida las edificaciones y entregando a su vez un dato confiable.

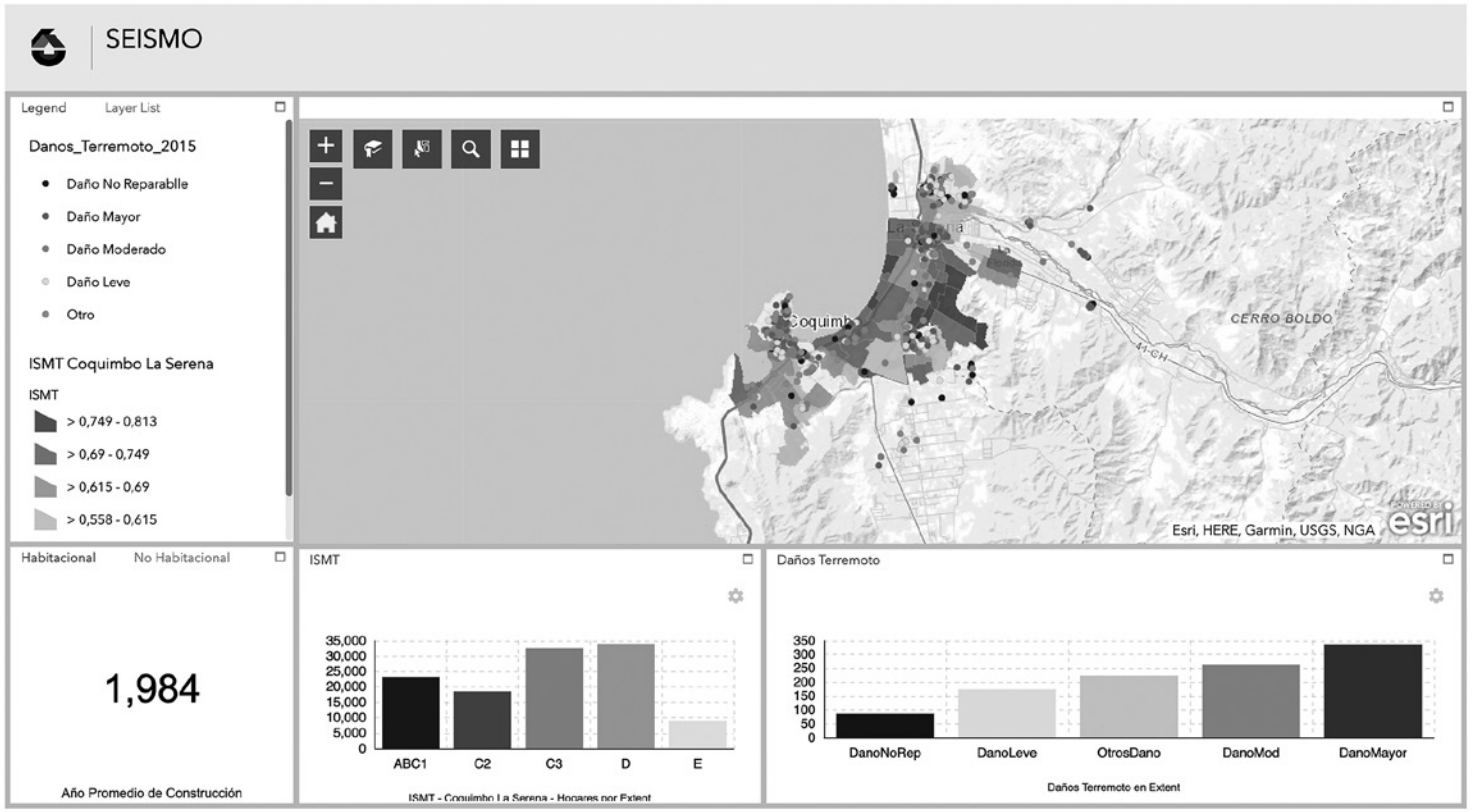


FIG. 05: Plataforma integrada seismo-ocuc. Fuente: elaboración propia equipo seismo, 2022

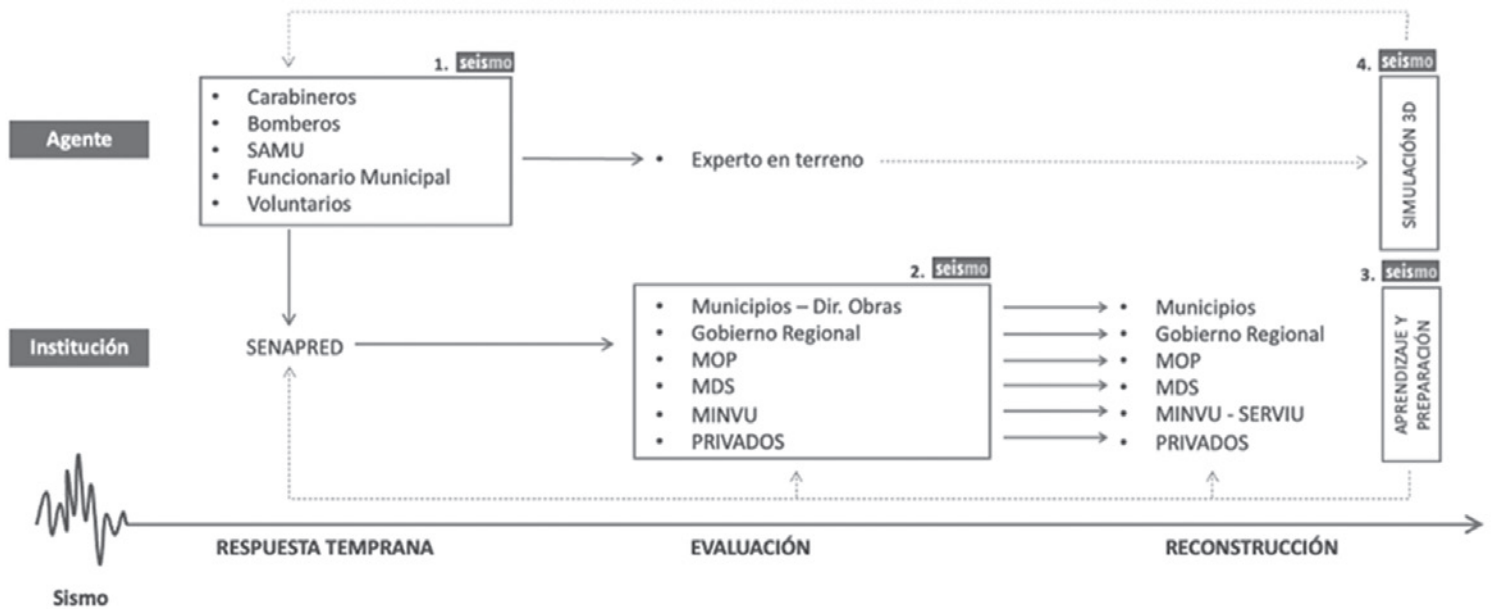


FIG. 06: Diagrama de inserción de SEISMO a la emergencia. Fuente: elaboración propia equipo SEISMO, 2022

2. SEISMO como agente articulador de la emergencia: permite enlazar toda la información levantada en un sistema único de hipercartografía territorial en tiempo real, entregando una visión global del territorio para la toma de decisiones oportunas.

3. SEISMO como sistema de cruce de información territorial: mediante otras fuentes de información que complementen el análisis de datos y generen nuevos indicadores para la toma de decisiones futuras, proceso de retroalimentación mediante la investigación con datos obtenidos por la herramienta.

Asimismo, la veracidad de los datos es primordial para establecer los criterios de acción en todo el proceso relacionado a un sismo. Con esta finalidad se implementó el sistema de registro parcelado de usuarios, que permitirá catalogar el dato según la *expertise* del usuario, encontrando rangos de básico, medio, avanzado y experto. Este último tiene la capacidad de sobrescribir sus resultados en base a su percepción en terreno.

Como última arista de esta mesa, se trabaja en el desarrollo de un módulo educacional, el que busca resolver preguntas propias de la aplicación y sistemas constructivos a testear. Este trabajo ha sido guiado por expertos, lo que ha permitido establecer una terminología común, preguntas habituales y estrategias para el reconocimiento de daños de manera visual.

RESULTADOS

VALIDACIÓN DEL MODELO DE ANÁLISIS 3D - EXPERTOS

Para la validación del sistema se generan escenarios tridimensionales con modelos poligonales de viviendas que presentan diferentes niveles de

daño. Los escenarios incluyen tanto la geometría mapeada de la vivienda como elementos contextuales para un mejor entendimiento de escalas y efectos del terremoto en la estructura.

Las geometrías se separan en módulos de gravedad (leve, moderada, mayor y grave) para cada una de las familias descritas en el modelo predictivo (esquinas y encuentros de muros; dinteles, vértices y antepechos; muros y machones; cielos y/o entrepisos; asentamiento del terreno; frontones, tímpanos y antepechos). De esta manera, los escenarios 3D son modulares y se pueden ajustar a múltiples escenarios de daño. Cada escenario se configura en un entorno de realidad virtual por medio del *software* Unity 3D y se hace uso de Headset Oculus Rift para la visualización y manipulación del escenario.

Para la evaluación con peritos expertos en daño estructural, se prepara un escenario de daño con una vivienda previamente catastrada en el terremoto que afectó a la ciudad de La Serena en 2019. La vivienda es de albañilería simple y presenta daños en frontis y habitación principal. Se solicita a peritos del Ministerio de Vivienda y Urbanismo y ONEMI que visiten la vivienda desde el uso del visor de realidad virtual y que, tras su revisión, indiquen el grado de gravedad y el nivel de habitabilidad.

Debido a las condiciones de aforo y resguardo sanitario, se realiza esta revisión en instalaciones del campus Lo Contador con un número de seis peritos expertos en diagnóstico estructural, sanitizando el espacio y equipo tras cada sesión de evaluación. En esta validación no se hace uso de ningún material complementario, sólo de la visualización tridimensional VR de la casa dañada. El objetivo de esta prueba es analizar

el grado de verosimilitud que exhibe el entorno 3D y se consulta a los expertos, tras la revisión, el estado de la vivienda. La totalidad de los expertos llega al mismo diagnóstico final: la vivienda presenta daños significativos en su fachada, pero al igual que lo determinado por los expertos en terreno, se concluye que la vivienda es estructuralmente habitable.

VALIDACIÓN DEL MODELO DE ANÁLISIS 3D - VOLUNTARIOS

En el caso de la validación con voluntarios no expertos se realiza una revisión guiada en la que se invita a estudiantes de pregrado y postgrado, junto a profesionales sin conocimientos previos en el diagnóstico estructural a visitar la vivienda por medio del visor VR Oculus Rift. Los voluntarios son acompañados por miembros del equipo de investigación para caracterizar las interacciones que emergen desde usuarios no expertos y se consulta sobre la existencia de daños en la vivienda. Para cada daño reportado se consulta sobre el lugar del daño —entendido como familias en el modelo predictivo de SEISMO— para luego, utilizando la información que incluye la aplicación, pero omitiendo las ilustraciones y fotografías de referencia, determinar el grado de gravedad del daño.

En el caso de la validación con voluntarios se hace uso del mismo sistema revisado por los peritos para identificar tanto la *performance* del instrumento como la percepción previa de los voluntarios ante los daños existentes en la edificación. El total de los voluntarios declara, desde su percepción, que los daños de la vivienda constituyen un alto peligro y un estado de inhabilitabilidad. Entre los voluntarios se encuentran estudiantes de pregrado y postgrado de Diseño y profesionales jóvenes de Kinesiología e Ingeniería



FIG. 07: Imagen comparativa entre registro in-situ, modelo VR y simulación. Fuente: elaboración propia equipo SEISMO, 2022

ría, quienes, tras realizar el reporte por medio del modelo predictivo de SEISMO, llegan al mismo resultado indicado en la validación con expertos: la casa es estructuralmente habitable. Existen algunas discrepancias entre tipos de familias que no son diferenciadas por inexpertos. Una de las controversias se expresa en la aparición de daños en la cara exterior de esquinas y que es reportada como parte de los muros y machones de la vivienda, algo a resolver con el uso de las imágenes de referencia por cada intensidad de daño. De igual manera, algunos grados de intensidad presentan complicaciones en su identificación, aunque esto no presenta mayores problemas, ya que el algoritmo predictivo de SEISMO considera un margen de error menor entre intensidades en su calibración.

CONCLUSIONES Y PROYECCIÓN

SEISMO, como sistema de ingreso y gestión de datos en emergencias, ha sido calificado como innovador tanto por el acercamiento hacia la ciudadanía afectada o no, organizada o no, como por la disponibilidad centralizada de datos estandarizados mediante una base de datos estructurada, organizada y con varias posibilidades de acceso y visualización. Asimismo, presenta un modelo validado de recolección de información y registro de los catastradores, lo que permite segregar el dato para su uso específico. Además, la información recolectada permite establecer modelos de gestión de recursos humanos, materiales

de reconstrucción y modelos espaciales de interpretación del territorio, alertando a los damnificados de manera oportuna para su protección y mejorando la gestión de fondos públicos en la emergencia.

SEISMO ha concretado esta etapa de la investigación con el desarrollo de (i) algoritmos para cuatro sistemas constructivos en un piso: albañilería simple, albañilería armada, albañilería confinada y hormigón; (ii) el sistema de validación de daños mediante realidad virtual (VR); (iii) el diseño de una interfaz para uso de usuarios no expertos; y (iv) su sistema de análisis de datos y visualización en tiempo real.

Se espera aumentar la cantidad de sistemas constructivos mediante algoritmos predictivos más complejos en las siguientes etapas, lo que permitirá analizar mayores alturas y sistemas híbridos. Por otra parte, será prioritario su despliegue y uso en terreno para simulacros que permitan prepararnos ante una eventual catástrofe y recopilar información del estado de situación de manera de poder llevar a cabo acciones de mitigación preventiva y, finalmente, su implementación como herramienta para el uso en la emergencia sísmica.

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación se ha realizado gracias al aporte del FONDEF IDEa 2019 ID 1910180,

Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID), Chile.

Cuenta con la colaboración de las siguientes instituciones asociadas: Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI), actualmente Servicio Nacional de Prevención y Respuesta Ante Desastres (SENAPRED); Colegio de Constructores Civiles e Ingenieros Constructores, Asociación de Aseguradores de Chile (AACh), Unidad de Ciudades Resilientes de la Región Metropolitana, la agrupación Movidos x Chile y la Corporación de Desarrollo Territorial y Turismo de la Región Metropolitana.

Al grupo de expertos DELPHI; Tamara Cabrera, Hernán Cabrera, Sebastián Cárcamo, Francisco Milla, Luis Núñez, Daniela Quintana y John Saffery. El aporte de estos pares ha sido fundamental en el desarrollo de SEISMO, siendo los primeros revisores y críticos del sistema propuesto.

NOTAS

1- Proyecto FONDEF ID 1910180 financiado por el Concurso IDEa I+D 2019, Cambio Climático y Desastres Naturales de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID). Realizado por los investigadores Orlando Vígouroux, Alejandro Durán, Camilo Meneses, Carlos Aguirre, Patricio Bertholet, Felipe Encinas, Ricardo Truffello, Rodrigo Olivares, Daniel Ruddoff y Beatriz Mella. Más información en: <www.seismo.cl> / seismo@uc.cl.

BIBLIOGRAFÍA

Anagnostopoulos, S. y M. Moretti. 2008. "Post-earthquake emergency assessment of building damage, safety and usability—Part 2: Organisation". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* vol. 28, núm. 3., 233-244.

BBC Mundo. 2017. "Los 10 terremotos más potentes y mortíferos de la historia en América Latina". *BBC*, 21 de septiembre de 2017. Disponible en: <<https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-41343606>>.

Cacciotti, R., M. Blaško y J. Valach. 2015. "A diagnostic ontological model for damages to historical constructions". *Journal of Cultural Heritage* vol. 16, núm. 1: 40–48.

Cremen, G. y C. Galasso. 2020. "Earthquake early warning: Recent advances and perspectives". *Earth-Science Reviews*, 205, 103184.

Di Ludovico, M., G. Martino, A. Santoro, A. Prota, G. Manfredi, C. Calderini y C. Carocci. 2019. "Usability and damage assessment of public buildings and churches after the 2016 Central Italy earthquake: The RELUIS experience". En *Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions*. Francesco Silvestri, Nicola Moraci (eds.). Londres.

Gobierno de Chile. 2010. *Plan de Reconstrucción Terremoto y Maremoto del 27 de febrero del 2010*. Santiago, Chile, 27 de agosto de 2010. Disponible en: <<https://www.desarrollosocialyfamilia.gob.cl/pdf/plan-reconstruccion-resumen-ejecutivo.pdf>>.

Kerle, N., F. Nex, M. Gerke, D. Duarte, y A. Vetrivel. 2020. "UAV-Based Structural Damage Mapping: A Review". *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* vol. 9, núm. 1: 14.

Lovreglio, R., V. Gonzalez, Z. Feng, R. Amor, M. Spearpoint, J. Thomas, M. Trotter, R. Sacks. 2018. "Prototyping virtual reality serious games for building earthquake preparedness: The Auckland City Hospital case study". *Advanced Engineering Informatics* 38: 670–682.

Ministerio del Interior y Seguridad Pública de Chile. Establece el Sistema Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres, sustituye la Oficina Nacional de Emergencia por el Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres, y adecúa normas que indica. Ley 21.364, promulgada el 27 de julio de 2021. Disponible en: <<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1163423&tipoVersion=0>>.

Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI) 2020. *Metodología básica para la Elaboración de un Plan de Prevención y respuesta para la Actividad Sísmica, ACCESISMO*. Santiago, 12 de marzo.

Platt, S. y B. D. Drinkwater. 2016. "Post-earthquake decision making in Turkey: Studies of Van and Izmir". *International journal of disaster risk reduction* 17, 220–237.