

**UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**INVENTARIO DE EDIFICACIONES DEL CANTÓN DE SAN JOSÉ
PARA EL CASO ESPECÍFICO DE AMENAZA SÍSMICA
UTILIZANDO EL MÉTODO DE MAPEO AMBIENTAL RÁPIDO**

**Tesis sometida a la consideración de la
Comisión del Programa de Estudios de Posgrado
en Ingeniería Civil para optar al grado y título de
Maestría Académica en Ingeniería Civil**

LUIS CARLOS ESQUIVEL SALAS

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2020

A María, Lucas, Tomás y mis papás.

Agradecimientos

Primero agradezco a Dios por todas las bendiciones que me ha dado.

A mi esposa por su apoyo incondicional y gran sacrificio para que yo pudiera sacar adelante este proyecto. A mis hijos, Lucas y Tomás, por ser el impulso más hermoso y grande para lograr cada meta.

A mis papás, sin los cuales no estaría donde estoy, cuyos sacrificios permitieron que mi hermano y yo pudiéramos estudiar bajo las mejores condiciones.

A don Víctor por su apoyo, interés y consejos, además de su atinada y valiosa guía para lograr terminar esta tesis. Junto con Aarón, les agradezco y estaré siempre en deuda por la oportunidad de trabajar en el LIS, el mejor trabajo.

A don Rafael y Diego por sus oportunas observaciones y comentarios que ayudaron a elevar el nivel de esta tesis.

A Massimiliano Pittore y Michael Haas por su trascendental colaboración para desarrollar este proyecto.

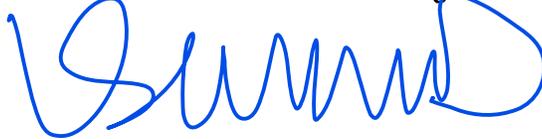
A Alejandro Calderón y don Álvaro Climent por su colaboración compartiendo información valiosa para el desarrollo de esta tesis.

A los asistentes Joselin Morales, Jairo Chacón, Brayna Ruiz, Natalia Sánchez, Carolina Fajardo, Richard Godfrey, Katherine Méndez, Andrés Quesada, Steven Vásquez, Roger Herrera y Silvia Blanco, por su importante trabajo desde distintas áreas y tareas.

“Esta tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Académica en Ingeniería Civil”

Rolando Castillo B

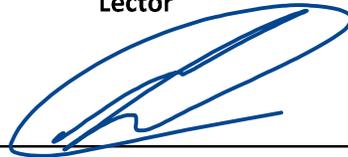
Ing. Rolando Castillo Barahona, Ph. D.
Representante del Decano
Sistema de Estudios de Posgrado



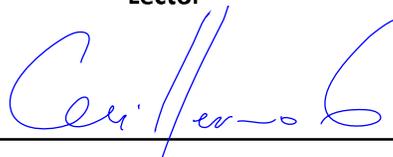
Ing. Víctor Schmidt Díaz, Ph.D.
Profesor Guía



Geo. Rafael Arce Mesén , Ph.D.
Lector



Ing. Diego Hidalgo Leiva, Ph.D.
Lector



Ing. Guillermo González Beltrán, Ph.D.
Director
Programa de Posgrado en Ingeniería Civil



Luis Carlos Esquivel Salas
Candidato

TABLA DE CONTENIDOS

Resumen.....	xi
Abstract.....	xi
Índice de figuras.....	xii
Índice de cuadros.....	xiii
Índice de mapas.....	xiii
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Proyecto de investigación LIS-UCR.....	1
1.2 Riesgo de desastres.....	1
1.3 Justificación.....	4
1.4 Objetivos.....	7
1.5 Alcance.....	8
1.6 Limitaciones.....	9
1.7 Antecedentes.....	10
1.8 Región de interés.....	11
2 ESTADO DEL ARTE.....	14
2.1 Modelos de exposición globales.....	14
2.2 Modelos de exposición locales.....	15
2.3 Métodos de inspección visual rápida.....	16
3 MARCO TEÓRICO.....	18
3.1 Aspectos estadísticos.....	18
3.2 Taxonomía de edificaciones de GEM.....	21
3.3 Clasificación de edificaciones.....	23
3.4 Curvas de fragilidad.....	24
3.5 Información espacial.....	26
3.6 Sistemas de administración de bases de datos.....	30
4 MAPEO AMBIENTAL RÁPIDO.....	32
4.1 Descripción.....	32
4.2 Estratificación de la roi.....	33
4.3 Definición de la muestra.....	33

4.4	Captura de imágenes.....	33
4.5	Análisis de imágenes y administración de datos.....	35
5	METODOLOGÍA.....	38
5.1	Fase I: Marco introductorio.....	39
5.2	Fase II: Generación del inventario de edificaciones.....	40
5.3	Fase III: Análisis del inventario de edificaciones.....	48
5.4	Fase IV: Conclusiones y recomendaciones.....	49
6	INVENTARIO DE EDIFICACIONES.....	50
6.1	Caracterización de la muestra.....	50
6.2	Inventario de edificaciones.....	54
6.3	Análisis del inventario generado.....	64
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	74
7.1	Conclusiones.....	74
7.2	Recomendaciones.....	79
	REFERENCIAS.....	81
	APÉNDICES.....	86
A	Detalle de la base de datos REM.....	86
B	Definición del esquema de clases.....	90
C	Inventario a nivel de barrios completo.....	94
D	Histogramas para clases agrupadas a nivel de barrios.....	96
E	Mapas de clases constructivas agrupadas por barrio.....	97
	ANEXOS.....	99
A	Encuesta aplicada.....	99

Resumen

El presente trabajo consistió en la generación de un inventario de edificaciones del cantón de San José a utilizar en evaluaciones probabilistas o deterministas de riesgo sísmico, siguiendo el método del mapeo ambiental rápido, creado por el instituto alemán *Deutsches GeoForschungsZentrum* (GFZ). Se tomaron alrededor de 35 000 fotografías de aproximadamente 14 500 edificaciones, del total de 84 004 que existen en el cantón. Se realizaron encuestas remotas a 7 296 estructuras para un tamaño de muestra de 8.7 %. Se encontró que el tipo de material predominante es la mampostería confinada reforzada (64 %), mientras que el sistema resistente a cargas laterales predominante es el tipo muro (70 %). Las estructuras de 1 o 2 pisos componen el 75 % de la muestra y un 58 % de las edificaciones son regulares, mientras que la clase o tipología estructural predominante es la denominada MCR.2, representado un 38.7 %. Se determinó un tamaño de muestra óptimo de 2 200 edificaciones, correspondiente al 2.6 % de la cantidad de estructuras, y un nivel de precisión de las encuestas remotas del 75 %.

Palabras clave: riesgo, terremotos, exposición, tipologías, edificaciones, estructuras

Abstract

The present work consisted on the generation of a building inventory for the San Jose canton to be used in probabilistic or deterministic seismic risk assessments, following the rapid environmental mapping methodology, from the German institute *Deutsches GeoForschungsZentrum* (GFZ). 35 000 pictures from approximately 14 500 buildings were taken, from the total of 84 004 building that exist in San Jose canton. Remote surveys were undertaken for 7 296 structures for a sample size of 8.7 %. It was found that the main material type is the confined reinforced masonry with (64 %) and the main lateral load resisting system is the wall type (70 %). 75 % of the buildings are 1 or 2 story and 58 % are regular, moreover the main class or structural typology is the MCR.2, representing 38.7 %. An optimal sampling size of 2 200 building was determined, accounting for 2.6 % of the whole building stock, and a precision level of the remote surveys of 75 %.

Keywords: risk, earthquakes, exposure, typologies, buildings, structures

Índice de figuras

Figura 1: Componentes del riesgo de desastres.....	2
Figura 2: Riesgo en función de sus componentes.....	4
Figura 3: Comparación normalizada entre tipos de eventos naturales, mundial, 1900 -2019.....	5
Figura 4: Comparación normalizada entre tipos de eventos naturales, Costa Rica, 1900 -2019.....	6
Figura 5: División territorial administrativa de la GAM.....	12
Figura 6: Genoma de la edificación.....	22
Figura 7: Funciones de fragilidad para un edificio de marcos de acero laminado en frío de 3 pisos.	25
Figura 8: Definición de latitud y longitud.....	27
Figura 9: Definición de datum.....	28
Figura 10: Archivo shapefile.....	30
Figura 11: Etapas del REM.....	32
Figura 12: GFZ-MOMA, de izquierda a derecha: computadora portátil, cámara omnidireccional y banco de baterías.....	34
Figura 13: Interfaz gráfica de la plataforma RRVs.....	36
Figura 14: Fases de la metodología.....	38
Figura 15: Diagrama de flujo de la metodología.....	39
Figura 16: Distribución según tipo de material, LLRS y número de pisos.....	51
Figura 17: Distribución según regularidad, tipo de irregularidad y material de entrepiso.....	53
Figura 18: Distribución según tipo de ocupación.....	53
Figura 19: Inventario de edificaciones a nivel cantonal, según cantidad de estructuras y área cons- truida total.....	55
Figura 20: Inventario de edificaciones a nivel distrital, según área construida total con clases agru- padas.....	57
Figura 21: Inventario de edificaciones a nivel de barrio (ejemplo para 30 barrios), según área cons- truida total con clases agrupadas.....	60
Figura 22: Histograma para clases agrupadas a nivel de barrios.....	61
Figura 23: Histograma para clases agrupadas a nivel de barrios, interrumpida en 20 barrios.....	61
Figura 24: Histograma para clases de mampostería a nivel de barrios.....	62
Figura 25: Histograma para clases de madera a nivel de barrios.....	62
Figura 26: Diferencias entre asignación de clases por encuestas presenciales y remotas.....	66
Figura 27: Diferencias entre asignación de clases <i>detallando las debidas al</i> tipo de material.....	67
Figura 28: Optimización de tamaño de muestra.....	68
Figura 29: Esquemas que componen el REM db.....	86

Índice de cuadros

Cuadro 1: Atributos y sus niveles de detalle de la taxonomía de GEM.....	23
Cuadro 2: Cantidad de edificaciones de la población, subpoblación y muestra.....	43
Cuadro 3: Tablas cruzadas de atributos "tipo de material" y "LLRS". A la izquierda, tabla octubre 2018, a la derecha, tabla noviembre 2018.....	46
Cuadro 4: Esquema de clases definido.....	48
Cuadro 5: Pesos de atributos seleccionados.....	48
Cuadro 6: Resultados de revisión de coherencia de datos.....	54
Cuadro 7: Inventario a nivel cantonal según área construida total [$\times 10^3 \text{ m}^2$].....	56
Cuadro 8: Margen de error e intervalos de confianza al 95 % para el modelo.....	64
Cuadro 9: Margen de error e intervalos de confianza al 95 % para muestra original (en gris) y muestra óptima propuesta.....	69
Cuadro 10: Comparación de cantidad total de edificaciones y área construida con modelos anteriores.....	70
Cuadro 11: Comparación de distribución de clases con PREPARE-2016.....	72
Cuadro 12: Comparación de distribución de clases con Calderón-2016.....	73
Cuadro 13: Tablas de cada esquema de la REM db.....	86

Índice de mapas

Mapa 1: Barrios del cantón de San José.....	41
Mapa 2: Población, subpoblación y muestra.....	43
Mapa 3: Ruta generada, ruta seguida y caminos del cantón de San José.....	44
Mapa 4: Muestra de edificaciones.....	50
Mapa 5: Edificaciones de madera.....	58
Mapa 6: Edificaciones de mampostería de arcilla y construcciones informales.....	59
Mapa 7: Densidad de edificaciones de mampostería de arcilla por barrio.....	63
Mapa 8: Densidad de edificaciones de <i>concreto reforzado</i> por barrio.....	63
Mapa 9: Ubicación de estructuras de control.....	65



Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.

Yo, Luis Carlos Esquivel Salas, con cédula de identidad 1-1266-0789, en mi condición de autor del TFG titulado Inventario de edificaciones del cantón de San José para el caso específico de amenaza sísmica utilizando el método de mapeo ambiental rápido.

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI NO *

*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: _____ año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

INFORMACIÓN DEL ESTUDIANTE:

Nombre Completo: Luis Carlos Esquivel Salas

Número de Carné: A52024 Número de cédula: 1-1266-0789

Correo Electrónico: luiscarlos.esquivel@ucr.ac.cr

Fecha: 24 junio 2020 Número de teléfono: 25116661

Nombre del Director (a) de Tesis o Tutor (a): Ing. Víctor Schmidt Díaz, Ph.D.

FIRMA ESTUDIANTE

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

1 INTRODUCCIÓN

Este primer capítulo contiene una explicación sobre como se enmarca esta tesis en un proyecto de investigación del Laboratorio de Ingeniería Sísmica del Instituto de Investigaciones en Ingeniería de la Universidad de Costa Rica (LIS-UCR). Se señala el papel de los inventarios de edificaciones en el contexto del riesgo de desastres y se definen términos clave para el trabajo. Se expone la justificación e importancia de realizar un inventario de edificaciones para el cantón de San José, así como la definición y delimitación del problema enfrentado. Finalmente, se resumen los principales trabajos previos realizados en nuestro país sobre este tema, así como una descripción puntual de la zona de estudio.

1.1 Proyecto de investigación LIS-UCR

El presente trabajo forma parte del proyecto de investigación 731-B7-501 “Estudio de Riesgo Sísmico del Cantón de San José” del LIS-UCR, debidamente inscrito en la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica y elaborado en colaboración con el Centro Alemán de Investigaciones en Geociencias (GFZ – *Deutsches GeoForschungsZentrum*).

1.2 Riesgo de desastres

Para comprender el papel que juegan los inventarios de edificaciones dentro de los estudios de riesgo sísmico, es preciso primero entender la función e importancia de los modelos de exposición en estos estudios. Para ello, es necesario aclarar, en el contexto de este trabajo, el término “riesgo de desastres”, el cual incluye exclusivamente amenazas naturales (e.g. sismos, tormentas, inundaciones) y no antropogénicas (e.g. accidentes nucleares, conflictos armados).

Un desastre se define como “la interrupción seria de la funcionalidad de una comunidad o sociedad, incluyendo impactos y pérdidas humanas, materiales, económicas o ambientales, que exceden la habilidad de la comunidad o sociedad de enfrentarlo utilizando únicamente recursos

propios” (UNISDR¹, 2009). El riesgo de desastres es, entonces, “el potencial de pérdidas producto del desastre, en términos de vidas, estado de salud, bienes y servicios, que pueden ocurrir a una comunidad o sociedad en particular en alguna ventana de tiempo especificada” (UNISDR, 2009).

El mismo se compone de tres factores que, combinados, determinan el nivel del riesgo; estos factores son la amenaza, la exposición y la vulnerabilidad (ver figura 1). Hay un concepto adicional que se muestra en la figura señalada, denominado impacto, el cual se utiliza cuando se habla de análisis determinísticos (un solo evento), mientras el concepto de riesgo se utiliza cuando se trabajan análisis probabilísticos o muchos escenarios (Simpson et al.², 2004).



Figura 1: Componentes del riesgo de desastres.

Fuente: Simpson et al., 2014

Estos factores son comunes para cualquier desastre producto de una amenaza natural. Un punto importante a señalar de la línea anterior se resume en una frase que describe la relación entre dos conceptos: “No hay algo denominado desastre ‘natural’, solo amenazas naturales” (Pierre-Louis, 2017). Es importante tener esto en mente a la hora de entender el riesgo de desastres, así como el papel que juegan cada uno de sus componentes y su importancia en una evaluación de riesgo.

1 United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR): es una secretaría de las Naciones Unidas dedicada a facilitar la aplicación de la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (ISDR).

2 Documento del Global Facility for Disaster Reduction and Recovery (GFDRR): es una asociación mundial que ayuda a países en desarrollo a entender y reducir el riesgo de desastres. Es gestionada por el Banco Mundial.

Elaborando un poco más sobre los componentes del riesgo, a continuación se muestran definiciones y comentarios importantes para cada uno de ellos:

- i. Amenaza natural (o simplemente amenaza): “Proceso o fenómeno natural que puede causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos a la salud, daños a la propiedad, pérdida de medios de subsistencia y servicios, daños económicos, sociales o ambientales” (UNISDR, 2009). Técnicamente, se caracteriza por medio de la probabilidad de ocurrencia (o excedencia), así como la intensidad del fenómeno natural. Ejemplos de estas son los sismos, inundaciones, tormentas, tornados, entre otros. En este trabajo, la única amenaza natural estudiada son los terremotos.
- ii. Exposición: “Personas, propiedades, sistemas u otros elementos presentes en zonas de amenaza que por lo tanto están sujetos a pérdidas potenciales” (UNISDR, 2009). En el caso de este trabajo, se desarrolla uno de los componentes mencionados en la definición de modelo de exposición, específicamente el inventario de edificaciones que consiste exclusivamente en viviendas y edificios de todos los usos (e.g. residencial, comercial, etc.).
- iii. Vulnerabilidad: “Las características y circunstancias de una comunidad, sistema o bien que lo hacen susceptible a los efectos dañinos de una amenaza” (UNISDR, 2009). Existe la vulnerabilidad física y la socio-económica.

Una vez que se tiene un mayor entendimiento del riesgo de desastres, al punto que pueda ser evaluado o cuantificado, se torna posible el gestionarlo, es decir, “lograr evadir, disminuir o transferir los efectos de las amenazas por medio de prevención, mitigación y preparación” (UNISDR, 2009). Esta gestión necesita también de la anticipación de impactos potenciales de las amenazas, los cuales conforman la información de riesgo, que es la base sobre la que crecen los demás esfuerzos (Ghesquiere et al., 2012).

Se debe comprender que la amenaza, exposición o vulnerabilidad pueden provocar que el nivel de riesgo varíe, como se ilustra en la figura 2. En esta figura, el primer triángulo muestra una misma contribución al riesgo de parte de sus tres componentes. En el segundo triángulo se ejemplifica el incremento del riesgo producto del aumento de la exposición y la vulnerabilidad, que se da por ejemplo en ciudades importantes donde la concentración de la población crece, en algunos casos, de la mano de construcciones que puede que no cumplan con los estándares exigidos por los

códigos de diseño. El tercer triángulo muestra el caso del incremento del riesgo debido al aumento de todos sus componentes, lo cual podría pasar en las ciudades mencionadas anteriormente que se encuentran en zonas de amenaza. Por último, el triángulo cuatro muestra el efecto de reducir la exposición y vulnerabilidad frente a una amenaza, lo cual se traduce en un menor nivel de riesgo.



Figura 2: Riesgo en función de sus componentes.
Fuente: Simpson et al., 2014

Finalmente, hay que recalcar que la sociedad no tiene un control directo sobre el componente de amenaza, como sí lo tiene sobre la exposición y la vulnerabilidad. Por ejemplo, una vez escogido un sitio para desarrollo urbano, el nivel de amenaza será el que corresponda a este sitio por disposiciones de la naturaleza, mientras que el tamaño de la ciudad (exposición) y calidad de las construcciones (vulnerabilidad) son controladas por el hombre. El control indirecto sobre la amenaza corresponde a la posibilidad de cambiar la ubicación de la ciudad.

1.3 Justificación

1.3.1 Importancia

Los sismos son amenazas naturales que, cuando se manifiestan, producen pérdidas muy importantes en las zonas que impactan. Es por esto que generar la información necesaria para poder tomar decisiones responsables con respecto a la prevención, mitigación, preparación y atención de los mismos es una tarea transcendental en la que hay que invertir dinero, tiempo, estudio y esfuerzo.

Desde el año 1900 hasta el 2019, la cantidad de muertes a nivel mundial asociadas a terremotos es la tercera más importante (2.6 millones) entre los desastres por eventos naturales incluyendo tormentas, inundaciones, deslizamientos, sequías y actividad volcánica. En cuanto a pérdidas totales, es el segundo en este rubro con un total de 828 billones de dólares, superado solo por las tormentas con un total de 1 447 billones de dólares (ver figura 3) (Guha-Sapir, 2019).

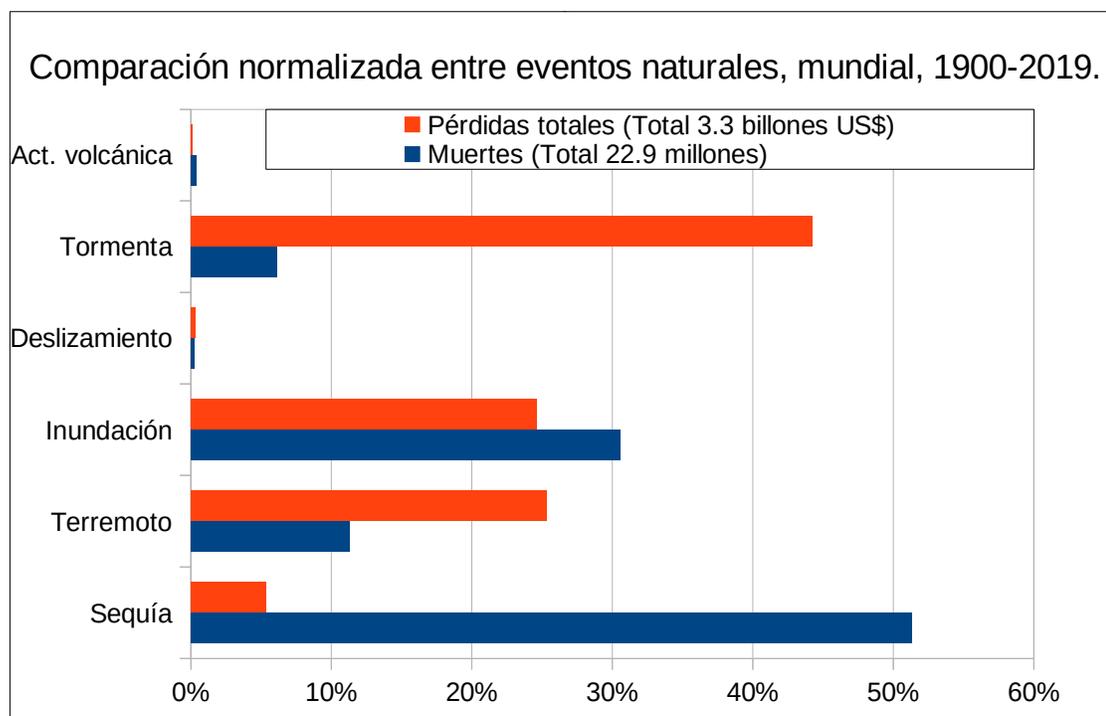


Figura 3: Comparación normalizada entre tipos de eventos naturales, mundial, 1900 -2019.
Fuente: Guha-Sapir, 2019

A nivel nacional, como se refleja en la figura 4, entre los años 1900 al 2019, la cantidad de muertes asociadas a terremotos es mucho mayor que el resto de desastres por eventos naturales incluyendo tormentas, inundaciones, deslizamientos, sequías y actividad volcánica, con un total de 1 877 vidas cobradas correspondiente a un 83 %, mientras el acumulado de los demás desastres sumados llega a 376, representado un 17 %. De lo anterior puede concluirse que en el caso de Costa Rica, los eventos naturales más mortíferos, por un margen del 66 %, son los terremotos. Caso distinto ocurre para las pérdidas totales, donde los terremotos son los terceros en orden de magnitud, con un total de 366 millones de dólares (Guha-Sapir, 2019).

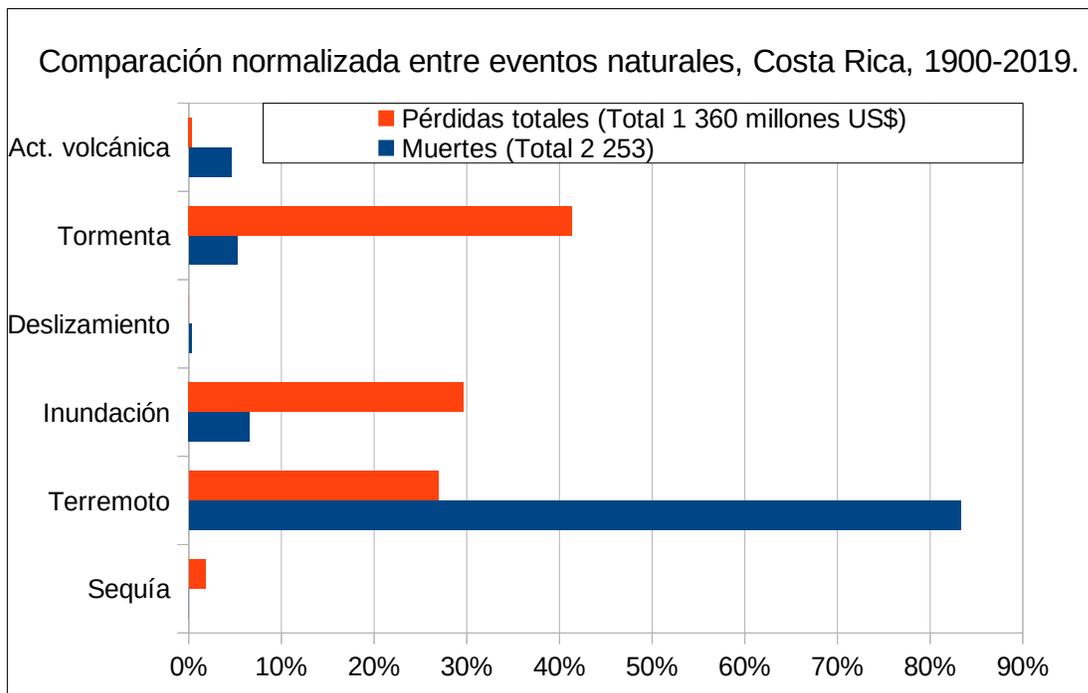


Figura 4: Comparación normalizada entre tipos de eventos naturales, Costa Rica, 1900 -2019.

Fuente: Guha-Sapir, 2019

Lo anterior apunta a que no se puede bajar la guardia contra esta amenaza y se debe hacer lo que esté al alcance de las distintas instituciones para aportar en este tema. Desde la academia, en mi opinión, nuestra responsabilidad es recopilar y procesar datos para generar información de calidad y ponerla al alcance de los tomadores de decisiones y de otros investigadores. Es decir, realizar evaluaciones del riesgo de alta calidad, para que de esta forma se alimenten futuros esfuerzos en la línea de gestión del riesgo.

Es por esto que la creación de un inventario de edificaciones para el cantón de San José es una pieza fundamental, entre muchas otras que componen una evaluación o cuantificación del riesgo de desastres. Como se explicó anteriormente, la exposición afecta de manera directa el riesgo, al ser uno de los tres factores que lo constituyen.

1.3.2 Problema específico

En nuestro país, el componente del riesgo sísmico que más se ha estudiado a la fecha es el de amenaza, sobre el cual se pueden citar algunos ejemplos: Alvarado et al. (2017); Climent, Rojas, Alvarado, & Benito (2008); Montero (1986, 1999, 2001); Protti, Gündel, & McNally (1994); Rojas,

Bungum, & Lindholm (1993) entre muchos otros (ver la sección de referencias en Alvarado et al. (2017) para una lista completa).

Por otro lado, los componentes de vulnerabilidad y exposición en nuestro país han sido mucho menos estudiados, especialmente el último de estos. Lo anterior es algo que no solamente sucede a nivel nacional, sino que se ha presentado y ocurre actualmente en otras regiones del planeta (Pittore, 2014; Pittore et al., 2017; Simpson et al., 2014; Taubenböck et al., 2013).

Y es que el generar modelos de exposición y los correspondientes inventarios de edificaciones supone retos y esfuerzos nada modestos debido a la dinámica cambiante de las ciudades, las cuales concentran las mayores cantidades de población y en muchas ocasiones las pérdidas derivadas de un desastre producto de un evento natural. Junto con esto se encuentra la gran cantidad de estructuras que se deben describir y clasificar respetando restricciones de tiempo y presupuesto, las cuales constituyen el inventario de estructuras.

Otro punto relevante es que los modelos de exposición, con más razón los inventarios de estructuras, no son fácilmente transferibles, es decir, no se pueden tomar de estudios realizados en otras partes del mundo y aplicarlo a otra región tal cual, ya que precisamente consisten en describir los bienes expuestos a una amenaza en un territorio específico.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Generar un inventario de edificaciones del cantón de San José siguiendo el método del mapeo ambiental rápido (REM, por sus siglas en inglés), que pueda ser utilizado en una evaluación de riesgo sísmico.

1.4.2 Objetivos específicos

- i. Utilizar medios estadísticos para elaborar un inventario de edificaciones a partir de una muestra de la población de estructuras.
- ii. Adaptar la metodología REM a nuestro país y documentar el proceso de generación de un inventario de estructuras para un cantón de Costa Rica.

- iii. Definir un esquema de clases o tipologías estructurales que se adapte a las condiciones de Costa Rica, basado en los atributos estructurales identificados en las edificaciones estudiadas.
- iv. Estimar la precisión de la captura de atributos estructurales por medios remotos o virtuales en contraste con medios presenciales o físicos.
- v. Estimar un tamaño de muestra óptimo, adecuado para generar un inventario de edificaciones por medios estadísticos.

1.5 Alcance

1.5.1 Geográfico o espacial

- i. El presente estudio, así como el análisis y resultados del mismo, corresponden y son representativos exclusivamente para el cantón de San José.
- ii. Incluye los once distritos del Cantón de San José, a saber, Carmen, Merced, Hospital, Catedral, Zapote, San Francisco de Dos Ríos, La Uruca, Mata Redonda, Pavas, Hatillo y San Sebastián.
- iii. El límite cantonal, así como los límites distritales, son los que señala el Instituto Geográfico Nacional de Costa Rica (IGN), publicados en el geoportal del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT).

1.5.2 Temporal

- i. El inventario generado representa las edificaciones construidas y en pie, así como su tipo de ocupación y estado de conservación, a la fecha de la toma de imágenes por medio del sistema de mapeo móvil, realizado en octubre del año 2017.

1.5.3 Específico

- i. El inventario de edificaciones está pensado para eventos sísmicos como el único componente de la amenaza, por lo que la caracterización de las edificaciones considera atributos de interés ante este tipo de eventos.
- ii. Se toma en cuenta exclusivamente construcciones del tipo vivienda y edificios, pudiendo pertenecer al grupo de edificaciones esenciales, de ocupación especial o normal según el Código Sísmico de Costa Rica 2010 – Revisión 2014 (CSCR-14). No incluye obras de infraestructura (carreteras, puentes, líneas de vida).

- iii. A las tipologías estructurales utilizadas no se les asignan distribuciones poblacionales o de carácter socio-económico, ni costos de reposición o similares.
- iv. No se trabajará con imágenes satelitales o fotografías aéreas con el fin de generar el inventario de estructuras. Pueden utilizarse como un apoyo a la hora de ejecución de las encuestas a edificaciones.
- v. Se utilizan fuentes de información gratuitas y de código abierto (e.g. OSM, Bing, SNIT). El mismo principio se aplica al software utilizado (e.g. PostgreSQL, Python, PGAdmin3, DbVisualizer, QGIS, Linux Ubuntu, Libreoffice).

1.6 Limitaciones

1.6.1 Tiempo de aplicación de las encuestas

Estudiantes avanzados de la carrera de Ingeniería Civil de la UCR, contratados por medio de un proyecto del LIS-UCR (ver sección “1.1 Proyecto de investigación LIS-UCR”), fueron los encargados de completar el cuestionario para cada una de las estructuras que componen la muestra. El tiempo que tomó el encuestar el total de estructuras que componen la muestra fue afectado por la culminación de los estudios de algunos asistentes, periodos de vacaciones y cantidad de estructuras cuyas fotografías asociadas permitieran la aplicación de la encuesta. Este tiempo fue de 1 año y 2 meses de trabajo efectivo, tomando en cuenta los factores mencionados anteriormente, la duración fue de 1 año y 9 meses.

1.6.2 Visibilidad de las estructuras encuestadas

En Costa Rica, debido principalmente al problema de inseguridad, muchas estructuras cuentan con algún tipo de cerramiento frontal de altura considerable, que en ocasiones podría dificultar e inclusive imposibilitar la visibilidad de la estructura.

Otro caso de visibilidad comprometida ocurre cuando, por medio de las fotografías exclusivamente no se pueda completar el cuestionario. Lo anterior puede suceder por distintas razones, como por ejemplo la existencia de obstáculos entre el lente de la cámara y la edificación al momento de tomar la fotografía, lejanía con la estructura, posición de las fotografías, entre otras.

1.7 Antecedentes

En Costa Rica se han realizado estudios de riesgo sísmico que contienen un modelo de exposición asociado a los mismos y , por lo tanto, un inventario de edificaciones. A continuación se resumen los principales esfuerzos realizados desde el 2009 hasta el presente.

La primer evaluación probabilista de riesgos, “Evaluación Probabilística de Riesgos en Centro América” - CAPRA por sus siglas en inglés - (Cardona et al., 2009a, 2009b, 2009c, 2009d), data del 2009, se realizó a nivel de país y estuvo a cargo del consorcio llamado Evaluación de Riesgos Naturales América Latina (ERN-LA). En ella se propone una clasificación general de los tipos estructurales dominantes de Costa Rica, 15 en total.

Según Cardona et al. (2009d), la definición de las tipologías constructivas se basó en documentos existentes y visitas de inspección, en las cuales se recopiló información sobre el número de pisos, sistema estructural principal, tipo de cubierta y sistema de entrepiso.

En el año 2014, ERN-LA realiza un nuevo análisis de riesgo sísmico, esta vez a nivel distrital y no de país, llamado “Valoración de la vulnerabilidad física y riesgo ante sismos en distritos clave del cantón de San José” (Evaluación de Riesgos Naturales y Antropogénicos, 2014), en la cual se incluye a los distritos de Mata Redonda, Merced, Carmen, Catedral y Hospital. El modelo de exposición se generó utilizando información de imágenes satelitales, curvas de nivel, límites cantonales, distritales y de barrios, geometría y atributos de los predios y edificaciones dentro de estos. El material de fachada es uno de los atributos más importantes en este estudio, ya que a partir de este se realizó la asignación de las tipologías estructurales (ocho en total), estableciendo una relación entre estos.

A principios del año 2016 se presenta la tesis para optar por el grado de maestría de Alejandro Calderón, quien efectúa una evaluación probabilista de las pérdidas debidas a sismos para Costa Rica (A. Calderón, 2016). Se realiza a nivel de país, utilizando un modelo de amenaza sísmica existente, específicamente el llamado Resis II (Climent et al., 2008), generando un modelo de exposición y vulnerabilidad propios.

El inventario de estructuras desarrollado toma en cuenta exclusivamente estructuras cuyo uso es de tipo residencial, utilizando como fuente primaria de información el Censo Nacional de

Población y Vivienda del 2011. El mismo es complementado con información de permisos de construcción otorgados entre el 2003 y el 2010, facilitados por el Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica (CFIA) y estadísticas sobre la construcción facilitadas por la Cámara de Construcción. Se identificaron 34 tipologías de edificios, las cuales se condensaron en 10 debido a que estas contenían el 92 % del total de estructuras del país.

Este modelo, con algunas mejoras (e.g. inclusión de una curva de fragilidad para cada tipología identificada, sin agruparlas), es el utilizado en el estudio de riesgo sísmico para Costa Rica, nivel nacional, publicado en el 2019 (A. Calderón & Silva, 2019).

A finales del 2016, el programa financiado por USAID/OFDA denominado “Preparando personal de rescate y emergencias para mejorar la respuesta ante terremotos” - PREPARE Preparing rescue and emergency personnel to ameliorate the response to earthquakes -, realizó en su primera fase un estudio de riesgo sísmico (Miyamoto Internacional Inc., 2016c, 2016a, 2016b). Este estudio estuvo a cargo de la empresa Miyamoto Internacional Inc., la cual utilizó para el modelo de amenaza sísmica el proyecto Resis II (Climent et al., 2008), subcontrató a la empresa ImageCat para generar el modelo de exposición y generó el modelo de vulnerabilidad para el cantón de San José.

El modelo de exposición desarrollado por ImageCat (Miyamoto Internacional Inc., 2016b) utiliza un proceso estadístico, basado en esquemas de mapeo y patrones de desarrollo. En total se analizaron 2 575 edificaciones (3 % del total de edificaciones) utilizando los conceptos explicados anteriormente. Se realizó trabajo de campo llevado a cabo por Bomberos de Costa Rica y otros (previa inducción), que consistió en la aplicación de un encuesta a una muestra de 576 edificaciones (0.7 % del total de edificaciones) distribuidas a lo largo del cantón. Se definieron siete patrones de desarrollo y 10 tipologías estructurales.

1.8 Región de interés

La región de interés (roi, por sus siglas en inglés) para este trabajo se trata del cantón San José. La descripción que se muestra a continuación está basada en el documento *Diagnóstico Cantonal*, elaborado por el Departamento de Observación Municipal, el cual pertenece a la Dirección de Planificación y Evaluación de la Municipalidad de San José (Municipalidad de San José, 2016) y el

El 86 % del territorio es urbanizable, con un 64 % de área conformada por predios construidos, 20 % cubierta por vialidad y apenas un 3 % constituida por predios sin construir. El restante 14 % corresponde principalmente a zonas marginales, protegidas o prohibidas. El cantón de San José se divide en 11 distritos (Carmen, Merced, Hospital, Catedral, Zapote, San Francisco, Uruca, Mata Redonda, Pavas, Hatillo, San Sebastián), los cuales a su vez se dividen en 196 barrios delimitados oficialmente mediante un mapa de la Municipalidad de San José.

2 ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se describen los avances más importantes sobre tres temas determinantes para la elaboración de inventarios de edificaciones. Dos de ellos corresponden a tipos de modelos de exposición y el restante a métodos de inspección visual rápida de estructuras.

2.1 Modelos de exposición globales

El tipo de modelo de exposición se determina en función de su resolución espacial y la cobertura, pudiéndose dividir en globales y locales (Simpson et al., 2014). Los modelos de exposición globales siguen generalmente el enfoque indirecto denominado “de arriba hacia abajo” (*top-bottom approach*), en donde se utilizan parámetros aproximados (“*proxies*”) para definir los parámetros de interés, con el fin de generar modelos de exposición (Simpson et al., 2014). Por ejemplo, la distribución espacial de población es un proxie para determinar la cantidad total de estructuras.

Un ejemplo de este tipo de modelos es el utilizado en el proyecto “Evaluación rápida a nivel mundial para respuesta a terremotos” del USGS -PAGER- (Jaiswal et al., 2010). El máximo nivel de resolución es de país y contiene datos sobre la distribución de estructuras según su material, sistema resistente a cargas laterales y ocupación, abarca los tipos residenciales y no residenciales. El modelo es abierto, público y armoniza cuatro fuentes principales de información en las cuales se basa: estadísticas de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), base de datos de Encuestas de Demografía y Salud de la ONU (DHS), censos nacionales y la Enciclopedia Mundial de la Vivienda (WHE – *World Housing Enciclopedia*).

Otro modelo importante es el llamado “Conjunto de datos de exposición mundial para el modelo global de terremotos” -GED4GEM- (Gamba, 2014). GED4GEM es el modelo de exposición utilizado por GEM para efectuar estudios de riesgo sísmico y cálculo de pérdidas bajo la plataforma OpenQuake, es de acceso abierto. Contiene información sobre estructuras de tipo residencial y población y a pesar de que su cobertura es global, el modelo maneja distintos niveles de resolución, los cuales obtienen sus datos de diferentes fuentes de información. La menor

resolución correspondiente al nivel 0 es la de país, mientras que la máxima es de edificio particular, corresponde al nivel 3.

El modelo “Conjunto de datos de exposición mundial para el informe de evaluación global” - GEG15 (De Bono & Chatenoux, 2014; De Bono & Mora, 2014), cuantifica la exposición para el modelo probabilístico de riesgo por terremotos y ciclones del Informe de Evaluación Global para la Oficina de Reducción de Riesgo por Desastres de las Naciones Unidas (GAR-UNISDR), evaluado a través de la plataforma CAPRA.

Los datos son abiertos e integran información sobre población y tipologías de estructuras a un nivel máximo de resolución de país, así como su uso y valor. Utiliza datos estadísticos de censos poblacionales o habitacionales para generar el modelo, las tipologías estructurales a nivel de país se obtienen de la Agencia Mundial de Monitoreo Planetario y Reducción del Riesgo por Terremotos (WAPMERR).

Por último, se tiene el modelo de “Base de datos de exposición global del Banco Mundial” (Gunasekera et al., 2015). Será completamente abierto y adecuado para análisis multi-amenaza y utiliza fuentes de información gratuitas. El inventario de edificios contiene información sobre la ubicación, clasificación en urbano o rural, tipo de ocupación en residencial o cinco tipos no residenciales, tipologías estructurales y costo de reposición de las estructuras.

2.2 Modelos de exposición locales

Los modelos de exposición locales pueden seguir el enfoque de “arriba hacia abajo” o de “abajo hacia arriba”, dependiendo de los datos disponibles y el nivel de resolución deseado. El enfoque de “abajo hacia arriba” necesariamente incluye la descripción estructural individual de algunas o muchas edificaciones.

Un ejemplo de modelo de exposición local es el Sistema de Información de Exposición Nacional (NEXIS) para Australia (Nadimpalli et al., 2007), que busca proveer información de exposición a una resolución de edificio particular. Puede ser utilizado en análisis multi-amenaza y se alimenta de diversos conjuntos de datos nacionales georeferenciados que incluyen información sobre aspectos demográficos, constructivos y estadísticos. Divide los inmuebles en tres clases: residenciales, comerciales y auxiliares.

El Riskscape Nueva Zelanda (King & Bell, 2006) es una herramienta para realizar análisis multi-amenaza de pérdidas, utiliza una escala de bloques que se componen de aproximadamente 60 estructuras cada uno, necesitándose unos 38 mil bloques para cubrir todo Nueva Zelanda. La información acerca de la cantidad de edificios y su costo de reposición, divididos en nueve categorías, así como sus huellas y área de piso respectivas se obtienen de la base de datos de Quotable Value NZ. Esta es una empresa (datos no gratuitos) que se dedica a facilitar información acerca de bienes raíces en Nueva Zelanda.

HAZUS-MH (Federal Emergency Management Agency, 2013) proporciona estimaciones de la distribución de 128 tipos de edificios en todo Estados Unidos de América (EUA), las cuales se encuentran documentadas y abiertas al usuario. Estas estimaciones utilizan información de censos de vivienda, población y economía, así como otros datos de carácter económico para crear los 33 tipos posibles de ocupaciones. Considera varios tipos de estructuras, pero específicamente en edificios contempla los de uso residencial, comercial, industrial, agrícola, religiosos, gubernamental y de educación.

A nivel regional se tiene el Proyecto de Evaluación de Riesgo para América del Sur (SARA) de GEM (Yepes-Estrada et al., 2017), el cual incluye siete países de los 12 países que componen este continente, específicamente Argentina, Bolivia, Chile, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela. El modelo utiliza de manera exclusiva fuentes de información pública, principalmente censos habitacionales a nivel nacional o menor escala, siguiendo el enfoque denominado de arriba hacia abajo. Los cuatro pasos seguidos para desarrollar el modelo incluyen la definición de clases de edificios, mapeo de datos censales asociados con las clases de edificios, mapeo de viviendas a edificios (para edificios residenciales, cuántas viviendas componen en promedio un edificio) y estimación del costo de reposición.

2.3 Métodos de inspección visual rápida

Este tipo de métodos, llamados en inglés *Rapid Visual Screening* – RVS, utilizan cuestionarios que se pueden llenar desde el nivel de la acera, es decir, sin ingresar al edificio encuestado. También, en general, ofrecen la opción de un cuestionario más detallado en caso de que se pueda ingresar a las estructuras. De especial importancia para este trabajo es identificar los atributos que distintos

cuestionarios solicitan describir, con el fin de identificar y entender las principales características estructurales que deben ser documentadas cuando se realiza una encuesta de este tipo.

El Rapid Visual Screening (RVS) es un procedimiento desarrollado por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de los Estados Unidos de América (FEMA – *Federal Emergency Management Agency*) y expuesto en el documento P-154 (Federal Emergency Management Agency, 2015), está pensado como una herramienta a utilizarse en una fase de inspección preliminar, en el marco de una campaña multi-fase para la identificación de edificios potencialmente peligrosos ante sismos severos.

Las principales características que se deben lograr identificar cuando se inspecciona el edificio son el material de construcción del sistema estructural gravitacional primario y el sistema sismorresistente primario, así como la irregularidad vertical y en planta, fecha de construcción, tipo de suelo y potencial de golpeteo para las inspecciones exteriores, más detalles sobre irregularidades y sobre elementos no estructurales en caso de que se pudiera ingresar al edificio.

En la norma japonesa “Evaluación Sísmica de Edificios Existentes de Concreto Reforzado” (Japan Building Disaster Prevention Association, 2001) se propone un nivel de inspección visual, denominado como nivel 1. La inspección visual requiere de una clasificación de los elementos estructurales verticales primarios del edificio e identificar las principales irregularidades en planta y verticales. Además, exige revisar por medios exclusivamente visuales aspectos como: deflexiones, agrietamientos, rastros de incendio, tipo de ocupación, antigüedad de la edificación y condición de los acabados en general.

El manual canadiense titulado “Inspección Visual de Edificios para Investigaciones Sísmicas” (Rainer et al., 1993) ofrece un método de inspección rápida para determinar, de un inventario de estructuras de cantidad considerable, cuáles deben ser sometidos a una evaluación más detallada, similar al RVS del FEMA. Consiste en la aplicación de un cuestionario, el cual requiere en primera instancia de la identificación del tipo de sistema sismorresistente, así como irregularidades verticales, horizontales, columna corta, piso blando, golpeteo, cambios de uso y/o deterioro excesivo. También debe señalarse si existen elementos no estructurales que puedan atentar contra la vida de los usuarios o transeúntes, así como la posibilidad de que equipos o líneas de vida salgan de operación.

3 MARCO TEÓRICO

En este capítulo se explican los conceptos de más trascendencia para la investigación realizada, de manera especial aquellos que son más ajenos al área de la ingeniería civil pero que se requieren conocer de manera básica.

3.1 Aspectos estadísticos

Esta sección sintetiza los conceptos estadísticos principales utilizados para ejecutar el presente estudio. El tratamiento es general, busca aclarar la lógica y cómo funciona cada uno de ellos.

3.1.1 Método de muestreo

Se exponen los principios teóricos de tres métodos de muestreo, los dos primeros se utilizan para generar el tipo de muestreo utilizado en este trabajo, llamado “muestro estratificado aleatorio con asignación proporcional”. Lo expuesto en este apartado se basa en Lohr (2000) y Pittore (2014).

3.1.1.1 Muestreo aleatorio simple

El muestreo aleatorio simple (SRS – *simple random sampling*), en el marco de este trabajo, se refiere específicamente al de tipo “sin reemplazo”, donde cada unidad que compone la muestra no puede seleccionarse más de una vez, es decir, la misma no se reemplaza en la población a la cual se está ejecutando el muestreo.

El SRS es el método de muestreo más básico de los muestreos de probabilidad, donde las unidades de cada muestra generada son seleccionadas al azar, generalmente involucrando números pseudo-aleatorios generados por computadora. Tiene la ventaja de ser simple y no requerir de información auxiliar cuando no se dispone de esta. En caso de disponerse de información auxiliar, el no poder tomarla en cuenta se convierte en una desventaja, así como la posibilidad de obtener una muestra deficiente debido a la selección de unidades que pertenecen a la subpoblación más numerosa, dejando por fuera otras subpoblaciones menos numerosas que para los efectos de la encuesta pueden ser muy importantes.

3.1.1.2 Muestreo estratificado aleatorio

El muestreo estratificado utiliza información adicional o auxiliar que permite dividir la población en grupos homogéneos y mutuamente excluyentes, llamados estratos. A cada uno de estos estratos puede aplicarse un método de muestreo distinto, cuando se aplica el SRS se denomina muestreo estratificado aleatorio.

Entre las ventajas que ofrece se encuentra el hacer más eficiente la estrategia de muestreo en comparación a la SRS, tener unidades de muestra de todas las subpoblaciones o subgrupos, evitar el muestreo deficiente descrito para el SRS y generalmente conduce a estimados para la población más precisos, con una menor varianza asociada.

3.1.1.3 Muestreo estratificado aleatorio con asignación proporcional

Finalmente, el método de muestreo utilizado en este trabajo es una combinación de los dos antes descritos, con la adición de la asignación proporcional. Esto lo que quiere decir es que la cantidad de unidades que forman parte de la muestra para una subpoblación o estrato es proporcional al total de unidades que componen la población del estrato. Con lo anterior, nos aseguramos que la muestra sea representativa de la población y contenga, proporcionalmente, unidades de muestra de cada uno de los estratos.

3.1.2 Distribución binomial

Los apartados 3.1.2, 3.1.3 y 3.1.4 se basan en Rumsey (2010).

Una distribución de probabilidad es la lista de todos los valores posibles que puede tomar una variable aleatoria, junto con su probabilidad asociada. Una de esas distribuciones es la binomial, asociada a pruebas con únicamente dos posibles resultados.

En el caso del presente trabajo, se asume una distribución binomial a la probabilidad de observar una edificación de una clase específica en un conjunto o muestra de edificaciones. El resultado de la prueba puede tomar solo dos valores, “pertenece” o “no pertenece” a la clase en cuestión. Por ejemplo, para un conjunto de 1 000 edificios divididos en 6 clases de la A a la F, la distribución binomial nos dice cuál es la probabilidad de observar una determinada cantidad de edificios de la clase D dentro de estos 1 000 edificios. La variable aleatoria en este caso sería la cantidad de edificaciones de clase D en 1 000 edificios

Se puede asumir que una variable aleatoria sigue la distribución binomial si existe un número finito de pruebas o individuos a los cuales aplicar el criterio de éxito (la muestra en nuestro caso), cada prueba solo puede tener dos resultados, la probabilidad de éxito es la misma en cada prueba y las pruebas son independientes (no influyen a las siguientes pruebas).

3.1.3 Distribución muestral de la proporción de la muestra

La proporción de la muestra es la proporción de individuos que presentan una característica específica. Continuando con el ejemplo, la proporción de la muestra de edificaciones clase D podría ser del 15 %, obtenido por medio de conteo manual de una muestra de 150 edificaciones de las 1 000 que constituyen la población.

La distribución de probabilidad de la proporción de la muestra (el 15 % en el ejemplo) se puede aproximar por medio de la distribución normal, lo cual es resultado del Teorema del Límite Central, siempre que la muestra sea suficientemente grande (mayor a 30 generalmente).

Entonces, teniendo una distribución normal, se puede calcular el margen de error y los intervalos de confianza asociados a las proporciones de la muestra.

3.1.4 Margen de error e intervalos de confianza

El margen de error es una medida de la variación de los resultados obtenidos a partir de una muestra, ya que estos varían de muestra en muestra. En este estudio, los resultados consisten en las proporciones de la muestra para cada clase o tipología definida.

Los intervalos de confianza se utilizan para representar la estimación de un parámetro de la población, utilizando medios estadísticos. En este caso, las proporciones obtenidas de la muestra son la estadística, y a la hora de “extrapolarlas” a la población se convierten en proporciones de la población, presentadas por medio de intervalos de confianza.

El margen de error y los intervalos de confianza se calculan utilizando las siguientes formulas:

$$\text{Margen de error} = z^* \sqrt{\left(\frac{\hat{p}(1-\hat{p})}{n}\right)} \quad \text{ec. 1}$$

$$\text{Intervalos de confianza} = \hat{p} \pm \text{margen de error} \quad \text{ec. 2}$$

Donde,

z^* : valor correspondiente de la distribución normal estándar ("Z-") para el nivel de confianza definido. En el caso del nivel de confianza de 95 %, $z^* = 1.96$.

\hat{p} : la proporción de la muestra.

n : tamaño de la muestra.

Continuando con el ejemplo, y escogiendo un nivel de confianza del 95 %, se podría calcular el margen de error de la proporción de edificaciones clase D, con $\hat{p} = 0.15$, $z^* = 1.96$ y $n = 1\ 000$, siendo este del 2.2 %. Entonces, el intervalo de confianza para esta variable sería de 12.8 % a 17.2 %, con un 95 % de confianza.

3.2 Taxonomía de edificaciones de GEM

La taxonomía (ciencia de la clasificación) de edificaciones de GEM (Brzev et al., 2013) se creó para asistir en la cuantificación del riesgo sísmico de estructuras. Su objetivo principal es describir y clasificar edificaciones de una manera uniforme y estandarizada, pudiendo ser utilizada en cualquier parte del mundo.

Esta taxonomía pretende llenar el vacío que existe a la hora de clasificar una estructura, ya que generalmente, para cada proyecto específico, se desarrolla un sistema de clasificación, imposibilitando la estandarización del mismo y su uso por distintos grupos, variados en profesiones, lugar de origen, etc. Su filosofía es lograr generar una única descripción representada por un código de caracteres (string), convirtiéndose en una especie de "código genético" de la estructura (ver figura 6).

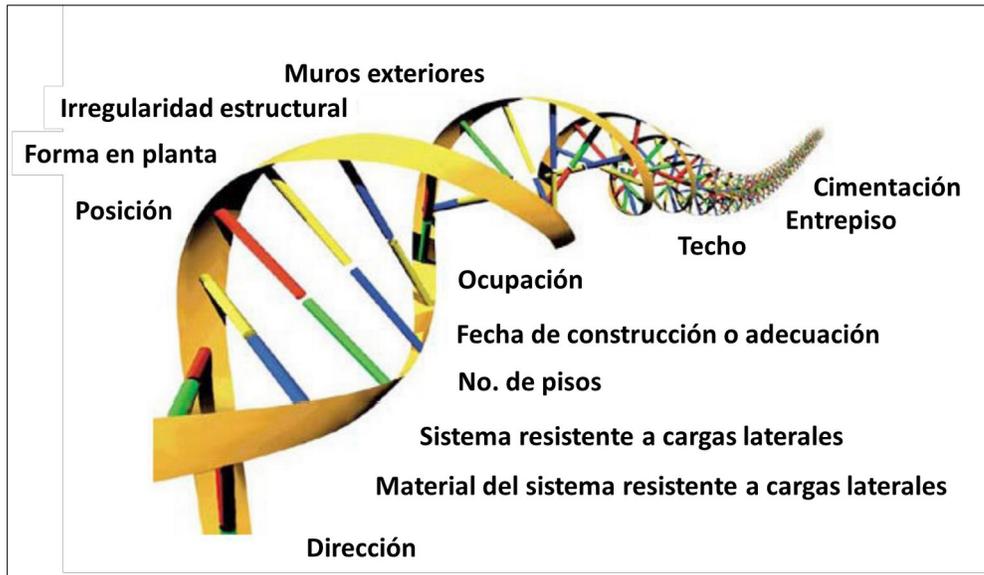


Figura 6: Genoma de la edificación.

Fuente: Brzev et al., 2013

Este genoma o código genético de la edificación se compone de atributos que afectan su comportamiento sísmico (e.g. irregularidad estructural, altura, sistema sismorresistente), existe la posibilidad de incluir atributos para los casos en que se disponga de información detallada, algo que no ofrecen otros esquemas de clasificación de estructuras. Cada atributo es descrito por uno o más niveles de detalle, los cuales se resumen en el cuadro 1.

Cada atributo sin nivel de detalle (e.g. dirección) y cada nivel de detalle se representan por medio de un código. Por ejemplo, para el caso del material, una estructura cuyo material del sistema sismorresistente (SSR) sea mampostería confinada de bloques de arcilla con mortero a base de cemento, tendría los siguientes códigos asociados: MCF por mampostería confinada, CLBRS por bloques de arcilla y MOC por mortero a base de cemento.

La cadena de caracteres que se genera para cada estructura (el “genoma”), por convención, utiliza el símbolo “/” para separar atributos, mientras que el símbolo que separa niveles de detalle dentro de un mismo atributo es “+”. Siguiendo con el ejemplo anterior, si esta estructura tuviera un SSR tipo muro sin mayor ductilidad (códigos LWAL y DNO respectivamente), la cadena de caracteres de la taxonomía de edificaciones de GEM para esta estructura sería “MCF+CLBRS+MOC/LWAL+DNO”.

Cuadro 1: Atributos y sus niveles de detalle de la taxonomía de GEM.

Atributo	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5
Dirección	---	---	---	---	---
Material del sistema resistente a cargas laterales	Tipo de material	Tecnología del material	Propiedades del material	---	---
Sistema resistente a cargas laterales (LLRS)	Tipo de LLRS	Ductilidad	---	---	---
Altura	Número de pisos	---	---	---	---
Fecha de construcción o adecuación	Construcción o adecuación terminada (año)	---	---	---	---
Posición del edificio en la cuadra	---	---	---	---	---
Forma en planta del edificio	---	---	---	---	---
Ocupación	Tipo de ocupación – general	Tipo de ocupación – detalle	---	---	---
Irregularidad estructural	Irregularidad en planta	Primaria	---	---	---
		Secundaria	---	---	---
	Irregularidad vertical	Primaria	---	---	---
		Secundaria	---	---	---
Muros exteriores	---	---	---	---	---
Entrepiso	Material del sistema de entrepiso	Tipo de sistema de entrepiso	Conexiones de entrepiso	---	---

Fuente: Brzev et al., 2013

3.3 Clasificación de edificaciones

En este trabajo, para la clasificación de las estructuras se aplica la metodología expuesta en Pittore, Haas, & Megalooikonomou (2018), la cual está basada en puntajes utilizando niveles de compatibilidad representados por números difusos.

La clasificación de estructuras es un paso fundamental en los estudios de riesgo sísmico, ya que al manejar una gran cantidad de estructuras, es inviable pensar en caracterizar el comportamiento estructural de cada una individualmente. En lugar de esto, cada edificación se clasifica en una clase o tipología estructural, y es a esta tipología a la cual se caracteriza estructuralmente, generalmente por medio de una curva de fragilidad (ver sección 3.4).

La metodología propuesta por Pittore et al. (2018) trabaja a partir de descripciones de las edificaciones por medio de la taxonomía de GEM o similares. Consiste en seleccionar los atributos a utilizar para la clasificación (e.g. material del sistema resistente a cargas laterales - LLRS - , tipo de LLRS, número de pisos), teniendo en cuenta su relevancia en la respuesta estructural, y la definición de clases o tipologías estructurales (e.g. clase 1: edificaciones de mampostería confinada reforzada, con bloques de concreto, de 1 piso de altura; clase 3: edificaciones de

concreto reforzado, LLRS tipo dual, de 6 a 10 pisos de altura). A cada atributo se les asigna un peso, el cual representa su importancia relativa en el desempeño antes sismos de la edificación.

Cada atributo puede tomar distintos valores, por ejemplo, el atributo “material del LLRS” puede representarse por los valores de: mampostería, concreto reforzado, madera o acero. Entonces, a cada uno de estos valores se le asigna un “puntaje de compatibilidad de valores”, utilizando números difusos, para cada clase definida. Los números difusos son el medio para traducir una compatibilidad cualitativa (e.g. muy compatible, neutral, moderadamente incompatible) en una cuantitativa que pueda implementarse por medio de un algoritmo computacional.

Por ejemplo, para la “clase 1: edificaciones de mampostería confinada reforzada, con bloques de concreto, de 1 piso de altura”, el valor del atributo “Material del LLRS” igual a “mampostería”, sería de “altamente compatible”, mientras que el de “madera” sería “altamente incompatible”.

Lo anterior se realiza para cada valor que pueda tomar cada atributo seleccionado. Así, es posible calcular una suma ponderada según los pesos definidos, de los puntajes de compatibilidad de valores por cada edificación. Esta suma se denomina “puntaje de compatibilidad del edificio” y se calcula para cada clase definida previamente.

Entonces, para cada edificación, se selecciona el mayor de los “puntajes de compatibilidad del edificio”. Así, la estructura será clasificada según la clase o tipología para la cual se tuvo un puntaje de compatibilidad mayor.

3.4 Curvas de fragilidad

Según Porter (2019), una curva de fragilidad relaciona de forma matemática la probabilidad de que un resultado indeseable ocurra en función de alguna medida de intensidad. Por ejemplo, el resultado indeseable puede ser que un componente de una edificación sufra cierta cantidad de daño, mientras la medida de intensidad podría ser la aceleración máxima del suelo (PGA).

Permiten calcular la probabilidad agregada o media de daño para diferentes niveles de daño probable, posibilitando el cálculo de riesgo sísmico en regiones o países. Es una de las metodologías más utilizadas en el evaluaciones de riesgo sísmico del RISK-UE (2003), implementando cuatro estados discretos de daño (leve, moderado, severo y completo).

En la figura 7 se muestra un grupo de cuatro funciones de fragilidad, tomadas del trabajo de Calderón (2018), las cuales relacionan la probabilidad de un resultado indeseable, en este caso la “Probabilidad de excedencia” de un determinado estado de daño, con la medida de intensidad de desplazamiento espectral (S_d).

A modo de ejemplo, si consideramos un terremoto que produce un desplazamiento espectral (S_d) igual a 3 cm en el edificio para el cual se desarrollaron las curvas mostradas, este sería el valor de entrada en las curvas (línea negra continua gruesa). Entonces, por ejemplo, hay un 2.5 % de probabilidad de exceder el estado de daño completo y un 60 % de probabilidad de exceder el estado de daño moderado.

Si se quisiera calcular cuál es la probabilidad de que exista daño leve, esta se podría calcular como la diferencia de la probabilidad de excedencia del daño leve y moderado, representada en la gráfica por medio de una doble flecha. Es decir, la probabilidad de que exista daño leve sería de $90\% - 60\% = 30\%$.

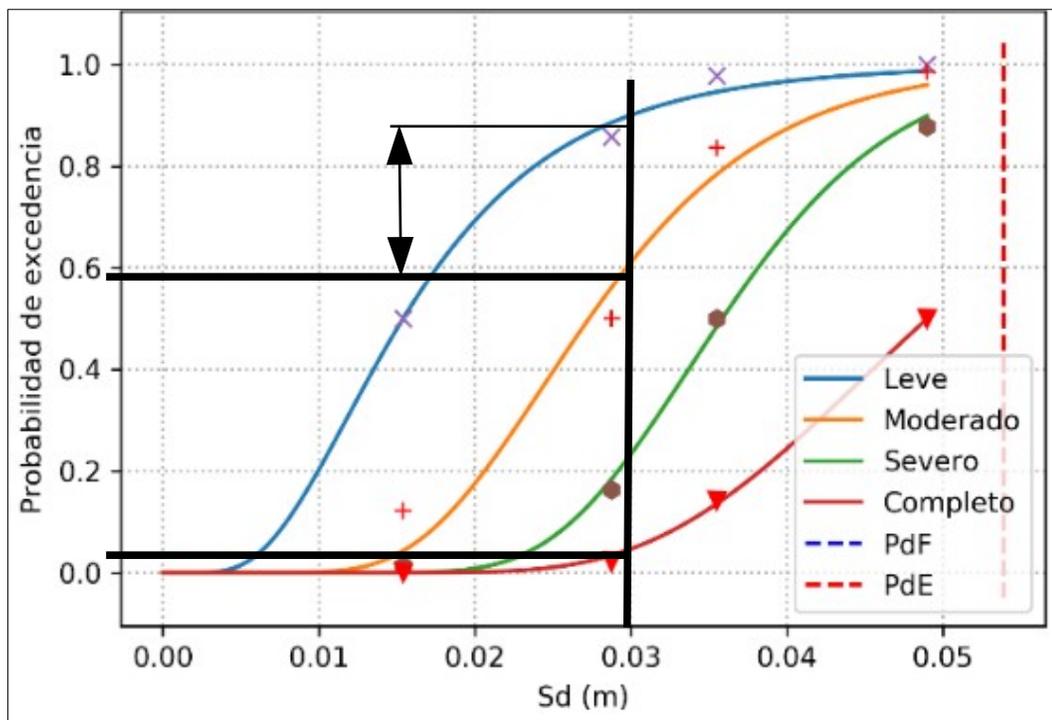


Figura 7: Funciones de fragilidad para un edificio de marcos de acero laminado en frío de 3 pisos.

Fuente: (E. Calderón & Hidalgo, 2018)

Curvas con pendientes bajas implican que, con un pequeño cambio del parámetro de entada (intensidad), se tienen aumentos “suaves” en probabilidad de excedencia, mientras que pendientes pronunciadas implican grandes cambios en la probabilidad de excedencia.

3.5 Información espacial

A continuación se detallan los aspectos relacionados con el proyecto sobre los principios y el manejo de la información espacial.

3.5.1 Sistemas de coordenadas

Las definiciones de este apartado se tomaron del Environmental Systems Research Institute (2000). Un sistema de coordenadas ayuda a ubicar un objeto en el mundo real, estos sistemas utilizan dos tipos de coordenadas: geográficos y proyectados.

3.5.1.1 Sistemas de coordenadas geográficas

Utilizan una superficie esférica tridimensional para definir ubicaciones en nuestro planeta. Consiste de tres componentes, a saber, unidad de medición angular, meridiano principal y un datum.

La unidad de medición angular más comúnmente utilizada son los grados, la cual se utiliza para describir la longitud y latitud, quienes son las que definen la ubicación de un punto en la superficie del planeta. La longitud y latitud son ángulos medidos desde el centro de la Tierra, la latitud son líneas horizontales y la longitud son líneas verticales, como se muestra en la siguiente figura.

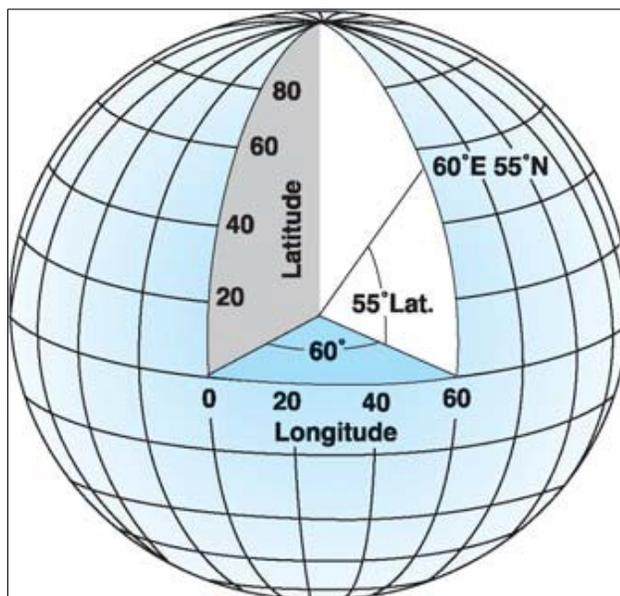


Figura 8: Definición de latitud y longitud.

Fuente: Environmental Systems Research Institute, 2000

La latitud ubicada en el centro entre los dos polos es llamada Ecuador, mientras que la longitud central o principal es definida por cada sistema, generalmente se utiliza la que pasa por Greenwich, Inglaterra.

El datum (ver figura 9) define la posición de un esferoide con respecto al centro de la Tierra, proveyendo el origen y la orientación para las líneas de la latitud y longitud. Un esferoide define el tamaño y la forma del sistema de coordenadas geográfico, buscando modelar la forma de la Tierra con una forma geométrica que facilite cálculos matemáticos. El datum más utilizado es el WGS 1984. Por último, el datum puede ser global (e.g. WGS 1984) o local. Ejemplos de este último son el NAD 1983 para los Estados Unidos de América, ED 1950 para el caso de Europa y Ocotepaque para Costa Rica (cartografía base previa al 2005, fecha a partir de la cual se adopta el datum global WGS84).

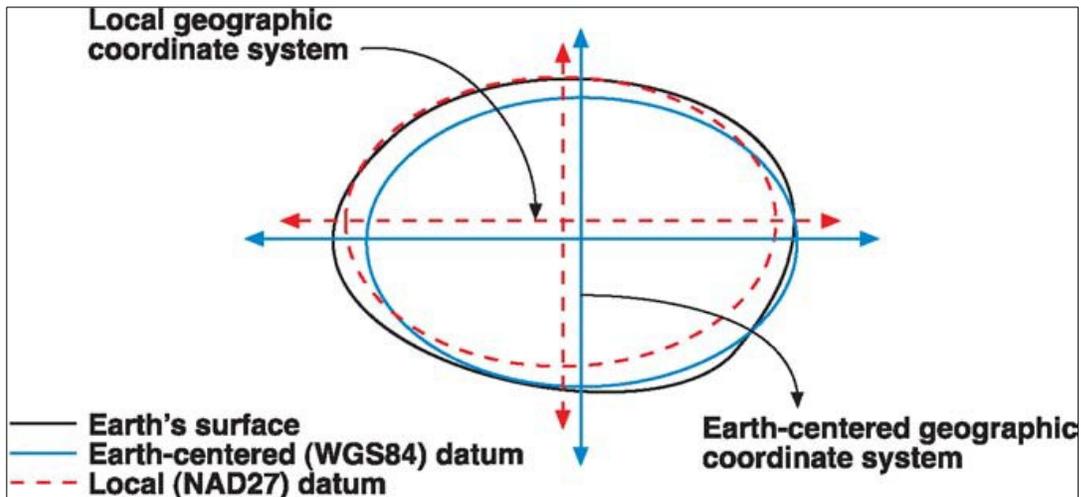


Figura 9: Definición de datum.

Fuente: Environmental Systems Research Institute, 2000

3.5.1.2 Sistemas de coordenadas proyectadas

Están definidos en una superficie plana de dos dimensiones y se basan en un sistema de coordenadas geográficas. Las distancias, ángulos y áreas son constantes a lo largo de ambas direcciones. Se llaman sistemas proyectados ya que son una proyección del sistema tridimensional en una superficie plana. Los puntos en este sistema se ubican como se hace en un plano cartesiano, por medio de una par ordenado X, Y.

Un sistema de coordenadas proyectadas comúnmente utilizado es el denominado Universal Transversal de Mercator (UTM – *Universal Transverse Mercator*), el cual divide al planeta en 60 zonas las cuales proyecta en dos dimensiones. En Costa Rica, se utilizó el Sistema de Coordenadas Proyectadas (o planas) Cónico Conforme de Lambert, previo al año 2005, y desde entonces se adoptó oficialmente el sistema Costa Rica Transversal Mercator CRTM05, con parámetros adaptados a nuestra región.

3.5.2 Sistema satelital de navegación global (SSNG)

Los GNSS (*Global Navigation Satellite System*) incluyen varias redes, una de ellas es la GPS (*Global Positioning System*), desarrollada y mantenida por el gobierno de los Estados Unidos de América. Provee a sus usuarios su ubicación, medios para navegación y tiempo. Se compone de más de 24 satélites que dan la vuelta a la Tierra dos veces al día y se comunican al receptor de GPS por medio de señales de radio.

3.5.3 Sistemas de información geográfica

Lo redactado en este apartado se basa en Environmental Systems Research Institute (2012). Los sistemas de información geográfica (GIS – *Geographic Information System*) relacionan información geográfica con información descriptiva, es decir, la ubicación de un objeto y las características de este objeto.

Los GIS permiten analizar en mapas digitales información cuya componente de ubicación (geográfica) es de importancia, posibilitando un mejor análisis de datos que de otra manera habría que visualizar de forma tabular. Un punto importante a recalcar es que utiliza mapas digitales, los cuales, a diferencia de los tradicionales mapas impresos, permiten una flexibilidad importante a la hora de desplegar la información, por medio por ejemplo del uso de capas y distintos niveles de enfoque. Los GIS, aparte de permitir un mejor análisis de datos con componentes espaciales, permiten una mejor presentación de resultados producto de estos análisis.

Entre los GIS más populares se encuentra el ArcGIS de ESRI (*Environmental Systems Research Institute*) y el QGIS de OSGeo (*Open Source Geospatial Foundation*). QGIS es gratuito y de código abierto, por lo que es el software seleccionado para este trabajo, en concordancia con lo establecido en "1.4.2 Objetivos específicos".

3.5.3.1 Shapefile

Es un formato de archivo para almacenar la geometría y características geográficas de los objetos. Fue inventado por ESRI pero es utilizado por la inmensa mayoría de software GIS. Un shapefile se compone de varios tipos de archivos (ver figura 10), a saber, .shp, .dbf y alguna variante de .txt. Los .dbf se refieren a archivos de bases de datos (database files), estos junto con los archivos de texto almacenan información de características no espaciales de los objetos que están ligadas a estos.

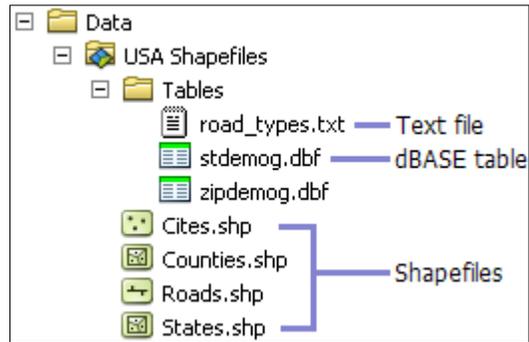


Figura 10: Archivo shapefile.
Fuente: desktop.arcgis.com

3.6 Sistemas de administración de bases de datos

Los sistemas de administración de bases de datos (DBMS – *database management system*) modernos son importantes en el marco de este trabajo debido a que se recolecta una gran cantidad de datos. Para darse una idea, cada una de las estructuras tiene una identificación asociada y al completar la encuesta se cuenta con 33 datos adicionales asociados a ellas, un mínimo de 34 datos en total por estructura. Lo anterior implica que para 7 000 estructuras se tienen 238 000 datos. Lo escrito en este capítulo se base en Mattew & Stones (2005).

Los sistemas de administración de bases de datos nacen de la necesidad de tener una manera de almacenar, administrar y extraer grandes cantidades de datos de forma eficiente, acoplándose a las necesidades de distintas aplicaciones.

Los DBMS son creados con el fin de suplir el servicio de administrar y crear una base de datos eficiente, a la cual pueda realizarse consultas que tomen poco tiempo en ejecutarse y se adapte a las necesidad de los distintos usuarios. Específicamente, los DBMS del tipo relacional, RDBMS, son los más utilizados en la actualidad cuando se manejan grandes cantidades de datos y se requiere extraer información de manera flexible de la base de datos.

3.6.1 SQL

Esta capacidad de las RDBMSs a responder a preguntas de los usuarios, o visto de otra forma, de aceptar consultas de este, se materializa por medio de los lenguajes de consulta (*query*

languages), El Lenguaje de Consulta Estructurado (SQL – *Structured Query Language*) es uno de ellos y es el utilizado por la base de datos de este proyecto.

SQL es un estándar para lenguajes de consulta y está normado por distintos órganos internacionales, como el ISO por ejemplo. Sin embargo, la norma no cubre todos los aspectos que se utilizan a la hora de realizar una consulta, por lo que hay variaciones de SQL.

3.6.2 PostgreSQL

Es un RDBMS gratuito y de código abierto que utiliza SQL como lenguaje de consulta, con algunas variaciones que lo diferencian de otros sistemas. Nace en 1977 en la Universidad de California en Berkeley y en la actualidad es administrado por un grupo de desarrolladores de Internet, los cuales toman en cuenta contribuciones de los usuarios.

Uno de los puntos más fuertes de PostgreSQL es su arquitectura, la cual utiliza el ambiente de cliente/servidor. El proceso de servidor de la base de datos corre en un único servidor y es por medio de este que las aplicaciones acceden a los datos almacenados en la base de datos. Esto protege la integridad de los datos ya que estos clientes (aplicaciones) no pueden acceder directamente a la base de datos. Además, permite la división de labores, utilizando la máquina más potente para funcionar como servidor y otras de menores características para correr los programas cliente.

3.6.3 PostGIS

Debido a que mucha de la información que se utiliza en este trabajo es de tipo espacial (e.g. geometría, georeferenciación), se hace necesario que la base de datos pueda manejar este tipo de datos. Es aquí donde entra PostGIS, una base de datos espacial que permite almacenar y manipular objetos espaciales como si fueran cualquier otro tipo de dato: numérico, caracteres o binario (Boundless, 2018).

4 MAPEO AMBIENTAL RÁPIDO

En este capítulo se explica el método de mapeo ambiental rápido (REM – *rapid environmental mapping*) para desarrollar modelos de exposición, creada por el equipo del Centro para Sistemas de Alerta Temprana (*Centre for Early Warning Systems*) de GFZ. El REM es utilizado en este trabajo como la base para generar el inventario de edificaciones.

4.1 Descripción

El REM está pensado para varios tipos de amenazas naturales, así como diversas resoluciones espaciales y representaciones bi-temporales del tiempo. El mapeo ambiental rápido (REM) consiste en una serie de métodos, técnicas y herramientas que permiten recolectar y analizar datos sobre el inventario de estructuras de una región de interés (roi), de manera eficiente y confiable, para poder generar modelos de exposición físicos de entornos urbanos (Parolai, 2016).

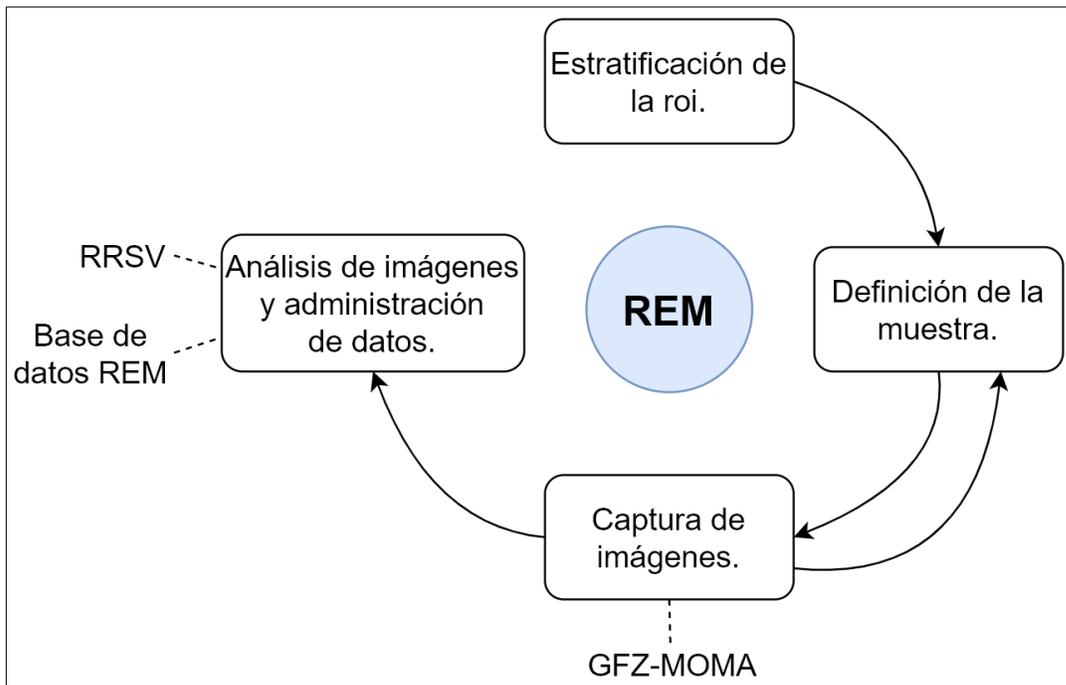


Figura 11: Etapas del REM.

Se pueden identificar cuatro etapas, las cuales se muestran en la siguiente figura y se detallan a continuación.

4.2 Estratificación de la roi

Es el primer paso a llevar a cabo en un proceso de muestreo estratificado aleatorio con asignación proporcional y consiste en dividir en estratos la población que se está estudiando. En el caso de estudios de riesgo sísmico, la población de la que hablamos la conforman las edificaciones y personas expuestas a la amenaza natural dentro de la roi.

Los estratos pueden definirse con base en diversas características, por ejemplo información geográfica (i.e. divisiones político administrativas), año de construcción, actividad económica, densidad de edificaciones, tipo de suelo, entre otras.

4.3 Definición de la muestra

Dentro de cada estrato, se realiza un muestreo del tipo aleatorio con asignación proporcional. De esta forma, se obtiene una muestra aleatoria para cada estrato, con un tamaño proporcional a la cantidad total de edificaciones que existen en el estrato.

Para hacer el proceso de recolección de datos más eficiente y poder utilizar métodos de tipo inspección visual rápida, se define un área de muestreo (o *buffer*, en inglés). Esta corresponde a los 30 m alrededor de una ruta en carretera definida de forma tal que cruce los centroides de cada estrato utilizando el criterio de costo mínimo, el cual en este caso es representado por la longitud (Wieland et al., 2015). Las edificaciones dentro de esta área de muestreo se convierten en una subpoblación desde la cual se selecciona la muestra.

4.4 Captura de imágenes

La recolección y análisis de datos son las partes más laboriosas de las encuestas presenciales realizadas a estructuras, ya que requieren de gran cantidad de personal calificado, así como su traslado a la ubicación de cada una de las edificaciones. Es por esta razón que consumen gran cantidad de tiempo y recursos.

REM utiliza el enfoque conocido como “de abajo hacia arriba”, el cual requiere de observación directa y para esto se apoya en herramientas tecnológicas, con el objetivo de que el proceso de

recolección de datos se desarrolle de manera más eficiente, ahorrando costo y tiempo. Para esto, la encuesta se aplica de manera remota, analizando fotografías de las edificaciones.

Para la captura de estas imágenes se utiliza un sistema de mapeo móvil llamado GFZ-MOMA (GFZ Mobile Mapping), el cual está compuesto por una cámara omnidireccional que se coloca sobre el techo de un automóvil, un receptor de GPS y una computadora portátil (ver figura 12).



Figura 12: GFZ-MOMA, de izquierda a derecha: computadora portátil, cámara omnidireccional y banco de baterías.

Fuente: www.sensum-project.eu/gfz-moma

La cámara omnidireccional está compuesta a su vez por seis cámaras, fijadas a un marco de aluminio con ventosas como apoyos, que se adhieren al techo de un automóvil para llevar a cabo la recolección de imágenes, las cuales son capturadas a una tasa de 5 imágenes por segundo. El banco de baterías es capaz de proporcionar aproximadamente seis horas de energía al sistema.

El receptor de GPS se conecta a la computadora portátil por medio de un puerto USB, estimando la posición con una frecuencia de muestreo de 1 Hz. Se utiliza un software diseñado especialmente para esta aplicación, el cual se encarga de sincronizar y almacenar las miles de imágenes capturadas en el proceso de recolección de datos (Wieland et al., 2012).

4.5 Análisis de imágenes y administración de datos

Debido a que se tienen imágenes omnidireccionales de toda el área de muestreo, necesariamente se cuenta con fotografías para las estructuras que componen la muestra. Una de las grandes ventajas es que el personal encargado de la captura de las mismas no debe ser especializado, ya que no debe utilizar su criterio para decidir qué parte de la estructura fotografiar. De esta manera, la fase de aplicación de criterio o análisis calificado se desacopla de la recolección de imágenes, posibilitando que el análisis pueda realizarse en su totalidad de forma remota. A continuación se describe el método utilizado para llevar a cabo la caracterización de la edificaciones.

4.5.1 Inspección visual rápida remota

La inspección visual rápida remota (RRVS – remote rapid visual screening) es un método que se basa en los populares métodos de tipo inspección visual rápida (RVS – rapid visual screening), con la diferencia de que este puede ser aplicado de forma remota, sin necesidad que el especialista se desplace hasta la edificación a la que se requiere aplicar la encuesta. Esta es una gran diferencia, si se recuerda que el personal calificado es escaso y su costo de contratación, organización y desplazamiento es de los más altos a la hora de diseñar y ejecutar una encuesta sobre estructuras.

Por lo tanto, por medio de la plataforma RRVS el entrevistador aplica el cuestionario sobre las distintas edificaciones que conforman la muestra. Este es accesado desde cualquier computadora personal, con el único requisito de poseer un número de usuario y tarea asignados. Lo anterior es para efectos de orden, trazabilidad y control, debido a que a cada tarea se asignan un número definido de estructuras y a cada usuario se le asignan una cantidad de tareas bajo su responsabilidad. Cada entrevistador puede tener varios usuarios, dependiendo de la cantidad de personal disponible para aplicar los cuestionarios.

La interfaz gráfica de la plataforma RRVS consiste de cuatro ventanas desplegadas en un navegador web (ver figura 13). En la ventana superior derecha se despliega un mapa con la delimitación del polígono asociado a la planta de la estructura en la que se aplicará la encuesta, y en la superior izquierda se muestran las fotografías de la estructura en cuestión. Finalmente, la ventana inferior contiene información que permite la identificación de la estructura en la base de datos, así como el cuestionario a completar. La información a recolectar con este cuestionario se muestra de manera completa en el anexo A.

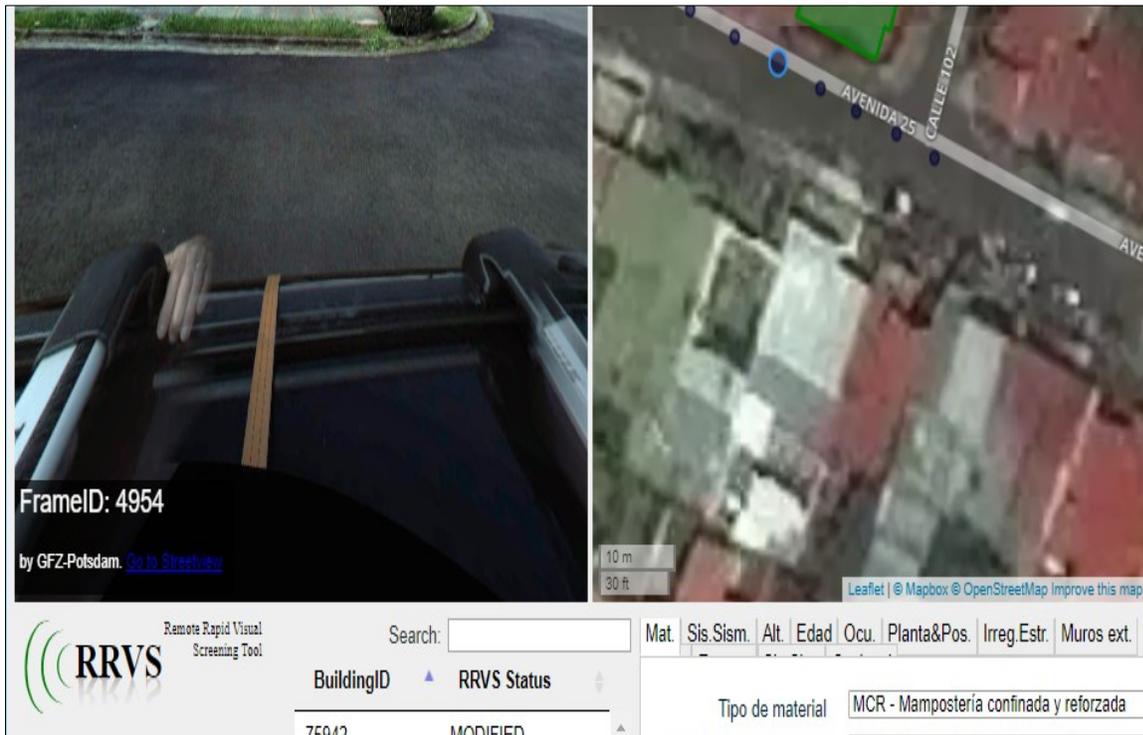


Figura 13: Interfaz gráfica de la plataforma RRVS.

La clasificación de las estructuras que utiliza la plataforma RRVS se basa en la taxonomía para edificaciones de GEM (Brzev et al., 2013). En esta, se caracteriza cada estructura según el material que la conforma, sistema sismorresistente, altura, edad, ocupación, geometría, regularidad estructural, cerramientos, techo y entrepiso.

Un gran número de fotografías son recolectadas con el GFZ-MOMA, ya que se capturan 5 imágenes por segundo durante todo el transcurso de la ruta, cuya duración total depende de la extensión y complejidad de la roj. Además, estas imágenes tienen asociados datos importantes, principalmente un identificador y las coordenadas de su ubicación (georeferenciación). Adicionalmente, se tiene la información que contienen las encuestas llenadas por el personal calificado, la cual es asociada a los polígonos que representan las huellas de las estructuras encuestadas.

Lo anterior requiere de un espacio de almacenamiento considerable, pero aún más importante, una forma de almacenamiento que permita asociar las distintas características y aspectos que componen y entrelazan todos los datos recopilados, así como la información generada. Para solventar esta necesidad se utiliza la base de datos REM.

4.5.2 Base de datos REM

La base de datos REM (REM db) se diseñó utilizando el sistema de administración de base de datos objeto-relacional PostgreSQL, el cual se basa en POSTGRES, desarrollado en el Departamento de Ciencias de la Computación de la Universidad de California en Berkeley (The PostgreSQL Global Development Group, 2017).

REM db soporta múltiples resoluciones espaciales, así como una representación bi-temporal del tiempo (múltiples momentos en el tiempo). El soporte de multi-resoluciones espaciales permite el manejo de información de varias resoluciones o escalas espaciales para un mismo objeto, posibilitando la integración de distintas fuentes de información espacial para un mismo modelo. El soporte multi-temporal posibilita el manejo de distintos momentos en el tiempo para un mismo objeto, permitiendo describir la variabilidad temporal de dichos objetos (Wieland, 2013). Para mayor detalle sobre la base de datos REM, ver el apéndice A.

5 METODOLOGÍA

La metodología seguida se dividió en cuatro fases o secciones, (ver figura 14), tres de las cuales se componen de varios procesos.

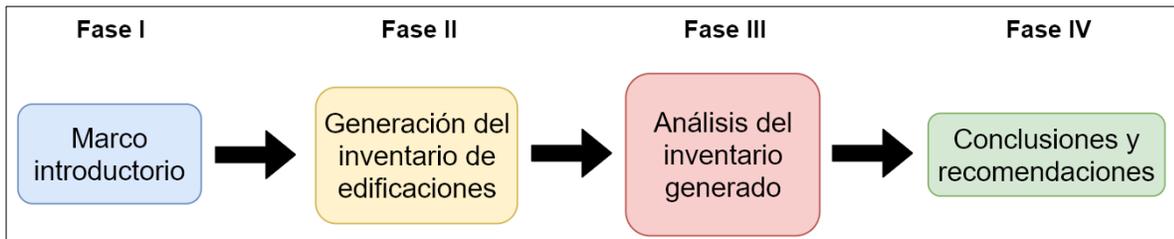


Figura 14: Fases de la metodología.

El marco introductorio (fase I) engloba aspectos generales y procesos necesarios a realizar previamente a la generación del inventario de edificaciones, el cual es el tema central de este trabajo. La generación del inventario de edificaciones (fase II) se compone de las actividades principales que se deben ejecutar para construir un inventario de edificaciones representativo y satisfactorio, en el caso de este proyecto, siguiendo el enfoque o método del mapeo ambiental rápido (REM). En la fase de análisis del modelo generado (fase III), se contrastan los resultados obtenidos contra encuestas realizadas de forma presencial para 538 estructuras, se calcula un tamaño de muestra mínimo con el que se puede trabajar, obteniendo esencialmente los mismos resultados que con la muestra original y se hacen comparaciones con trabajos anteriores.

Con el fin de aclarar y detallar los procesos asociados a cada una de las fases, así como su orden de ejecución y los puntos de decisión que pueden ocasionar alguna iteración en la generación del inventario de edificaciones, se muestra a continuación el diagrama de flujo de la metodología seguida.

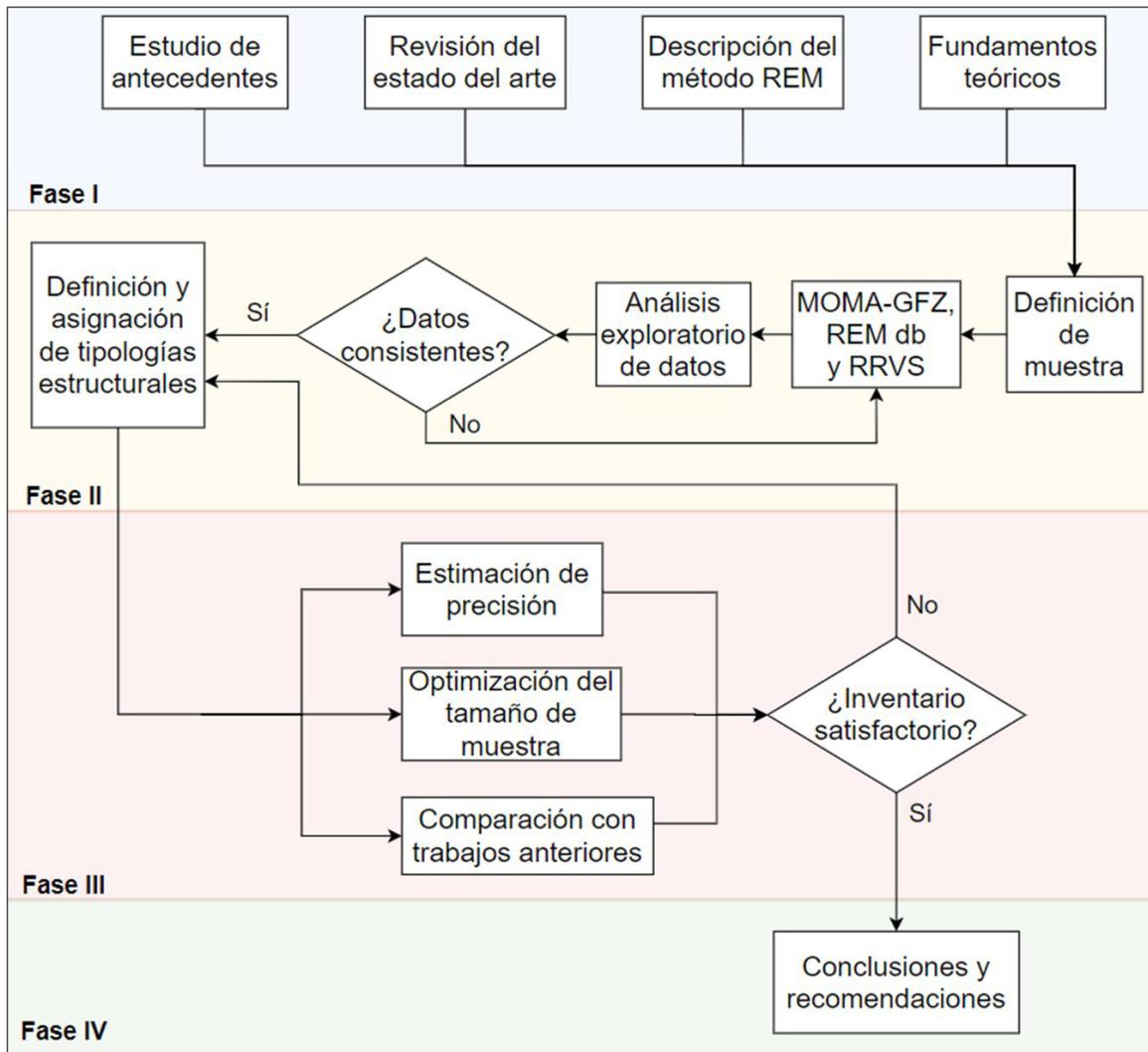


Figura 15: Diagrama de flujo de la metodología.

5.1 Fase I: Marco introductorio

Se compone de cuatro actividades o procesos principales ejecutados en paralelo o de forma simultánea. Se realiza el estudio de antecedentes y la revisión del estado del arte, así como la descripción del método REM y los fundamentos teóricos.

El estudio de antecedentes consistió en la recolección, análisis y síntesis de los principales resultados, metodologías y aspectos por mejorar de modelos de exposición generados para la ROI en el pasado. La revisión del estado del arte contiene los principales trabajos realizados en esta materia, con especial énfasis en los más vanguardistas y prometedores.

5.2 Fase II: Generación del inventario de edificaciones

En esta fase se aplicó el método Mapeo Ambiental Rápido (REM) de GFZ para la generación del inventario de edificaciones sometido a validación. En el capítulo 4 se hace una descripción del REM, por lo que en esta sección se explica directamente la aplicación del método en este trabajo, haciendo referencia a los componentes del REM ya descritos.

Es importante aclarar que, en el marco del proyecto de investigación LIS-UCR, el método REM se ejecutó en forma colaborativa entre el LIS-UCR y GFZ. Los investigadores de GFZ, Massimiliano Pittore, Ph. D y Michael Haas, Ph. D, visitaron el país con el fin de poner en marcha REM en los servidores del LIS para trabajar de forma conjunta en el proceso de diseño de la muestra y la implementación del método con ayuda de distintos scripts en Ipython (Pérez & Granger, 2007) y R (R Core Team, 2014).

5.2.1 Estratificación de la roi

La zona de estudio, el cantón de San José, se debía dividir en estratos, los cuales tenían que ser relativamente homogéneos y no traslaparse espacialmente, para aplicar sobre cada uno de ellos un muestreo aleatorio. Se valoraron varias opción para la definición de estratos, algunas veces llamados geo-unidades o geo- celdas. Entre ellas, el utilizar un criterio por tipo de suelo, criterio por densidad de estructuras o criterio de divisiones políticas territoriales (e.g. distritos, barrios, bloques o “cuadras”).

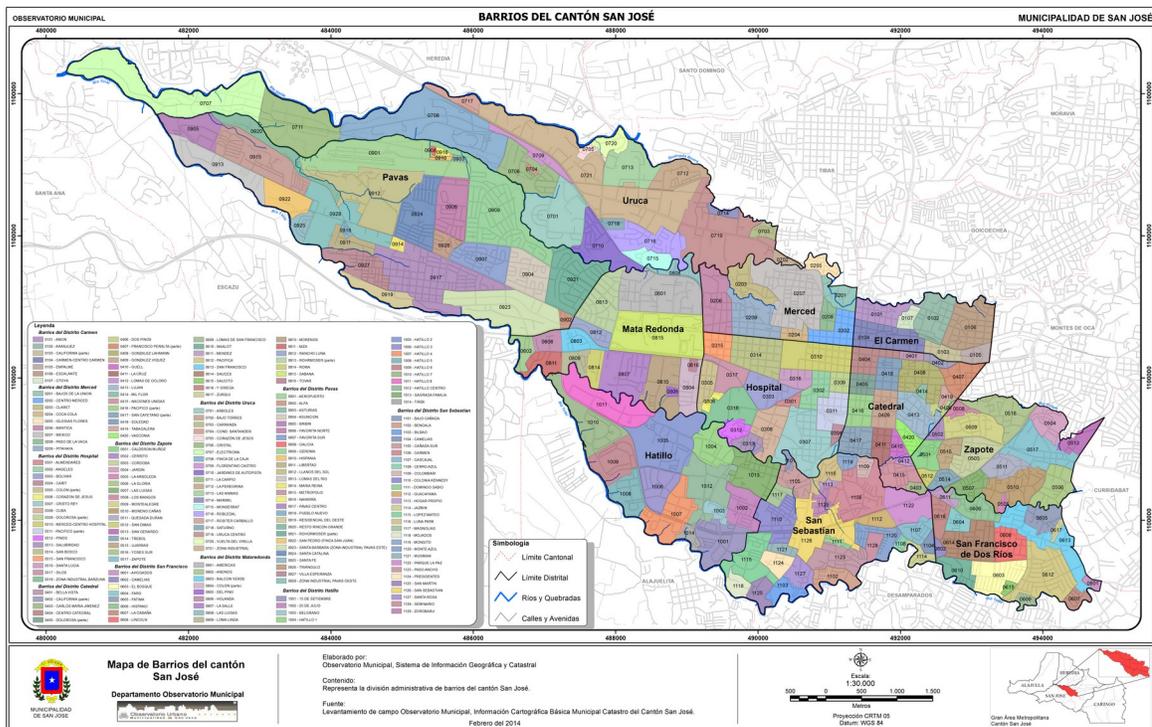
El utilizar un criterio por tipo de suelo necesita de información confiable sobre este parámetro para el cantón de San José, a un nivel lo suficientemente detallado que permita la generación de los estratos. En este caso sería una desventaja ya que no se cuenta con ella y no es un objetivo del presente trabajo el generarla al nivel de detalle necesario, en su lugar se pretende utilizar información a la mano y de precisión razonable.

El criterio por densidad de estructuras supone un tratamiento de imágenes satelitales o fotografías aéreas anterior a la toma de imágenes por medio del sistema MOMA-GFZ, lo cual se sale del alcance del proyecto y va en contra de la intención de utilizar información ya existente.

Queda entonces el criterio por división política territorial, el cual tiene como principal ventaja la existencia de grupos organizados que atienden distintas necesidades, por ejemplo los comités

comunales de emergencia, amparados por el “Reglamento de Organización y Funcionamiento de los Comités de Prevención y Atención de Emergencias”, así como el manejo de algún presupuesto y reconocimiento de parte del Estado de sus funciones. Como desventaja más importante se tiene que pueden contener edificaciones de gran diversidad, lo que dificulta la obtención de una muestra representativa satisfactoria con un número razonable de individuos.

Por esto último, se considera que los distritos son una división muy extensa, y los bloques o “cuadras”, en contraposición, una división muy pequeña que haría que la muestra creciera de manera importante. Se selecciona entonces la figura de barrios, la cual, adicional a manejar un tamaño intermedio entre las divisiones mencionadas previamente, está representada en un mapa oficial de la Municipalidad de San José (ver mapa 1), estableciendo límites claros y definidos para cada uno de los 196 barrios.



Mapa 1: Barrios del cantón de San José.
Fuente: MSJ, 2014

5.2.2 Definición de la muestra y captura de imágenes

La información base utilizada en el proceso de definición de la muestra fueron los límites de barrios y huellas de edificaciones, proporcionada por la Municipalidad de San José (MSJ) en formato shape, revisada y corregida por un asistente de geografía, así como la geometría del centro de calle de todos los caminos del cantón, tomada de Open Street Maps (OSM). Es importante aclarar que no se contaba con información de huella de edificaciones del barrio La Carpío, por lo que estas fueron tomadas parcialmente de OSM, el resto fueron generadas por un asistente de geografía.

Las referencias sobre el tamaño de muestra para la generación de inventarios de edificaciones son bastante escasas, limitándose a mencionar el número de individuos en la muestra sin detallar en cómo se estimó o por qué se utilizó (e.g. Santa María et al. (2017), Novelli, D’Ayala, Makhloufi, Benouar, & Zekagh, (2015)). Estudios sobre el impacto del tamaño de muestra seleccionado en la generación de modelos de exposición inferidos no fueron encontrados al momento de la redacción de este documento.

Debido a esto, la definición del tamaño de la muestra se basó en criterio de experto, en este caso del Dr. Pittore de GFZ, apoyándose en su trayectoria en el campo y experiencias de la ejecución de este tipo de trabajos en varias ciudades de Europa y Asia (e.g. Colonia, Estambul, Bishkek, Soutz-sous-Forêts).

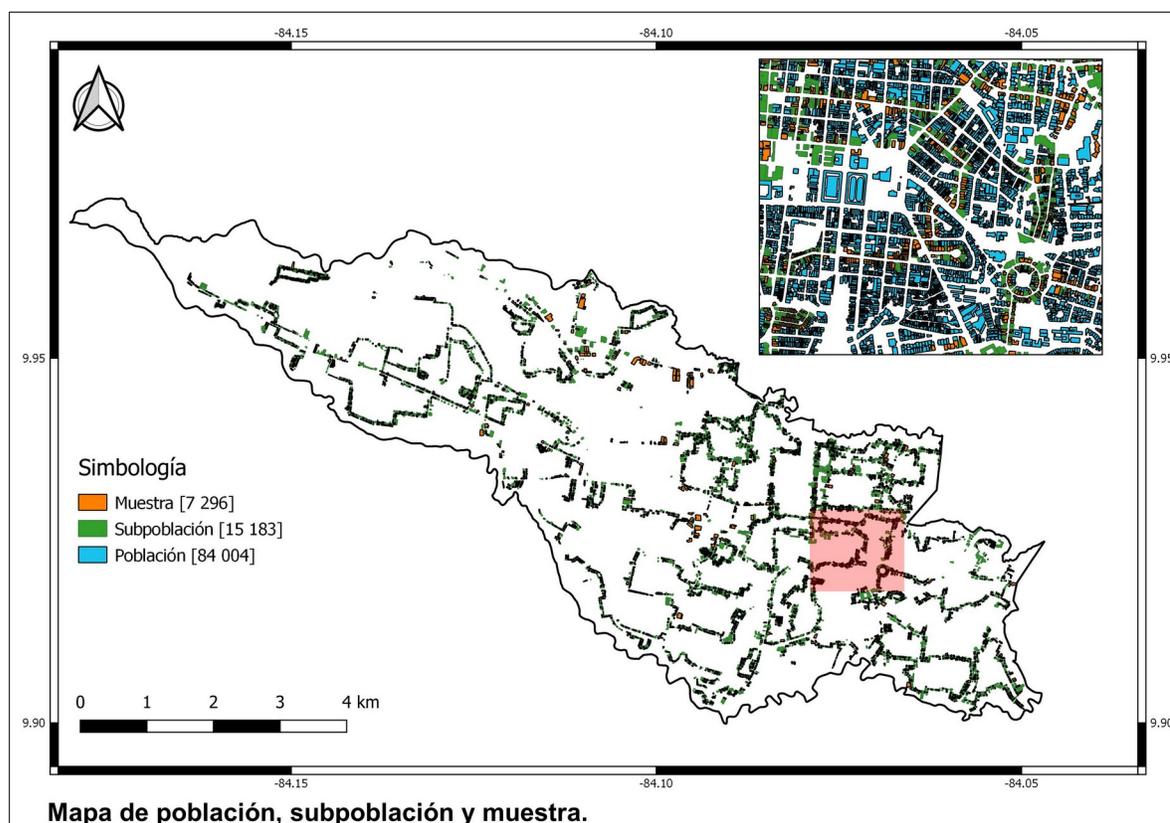
Se definió entonces el tamaño de la muestra entre un 8 % a 10 % de la población de 84 004 edificaciones, es decir, entre 6 720 y 8 400 estructuras. Hay que recordar que las encuestas se aplicaron de manera remota a partir de fotografías tomadas a las edificaciones aledañas a la ruta seguida por el automóvil en el cual se colocó el MOMA-GFZ (ver sección 4.4), por lo que la muestra está condicionada por la cantidad de estructuras sobre las cuales se tuvieron imágenes. Las edificaciones de las cuales se tenían fotografías constituyen una subpoblación, que en este caso fue de 15 183 edificaciones.

El tamaño de la muestra final fue afectado por la cantidad de estructuras seleccionadas a las cuales no se pudo aplicar la encuesta, debido a problemas de visibilidad principalmente (ver apartado 1.6.2). En total, se analizaron 9 464 edificaciones, de las cuales 2 168 se calificaron como

“sin visibilidad”, obteniendo un tamaño final de muestra de 7 296 estructuras, logrando ubicarse en el rango definido. Lo expuesto anteriormente se resume en el cuadro 2 y el mapa 2.

Cuadro 2: Cantidad de edificaciones de la población, subpoblación y muestra.

Cantidad de edificaciones	Población	Subpoblación	Analizadas	
			9 464	
	84 004	15 183	Muestra	Sin visibilidad
			7 296	2 168
Relativo a población	100 %	18.1 %	8.7 %	2.6 %

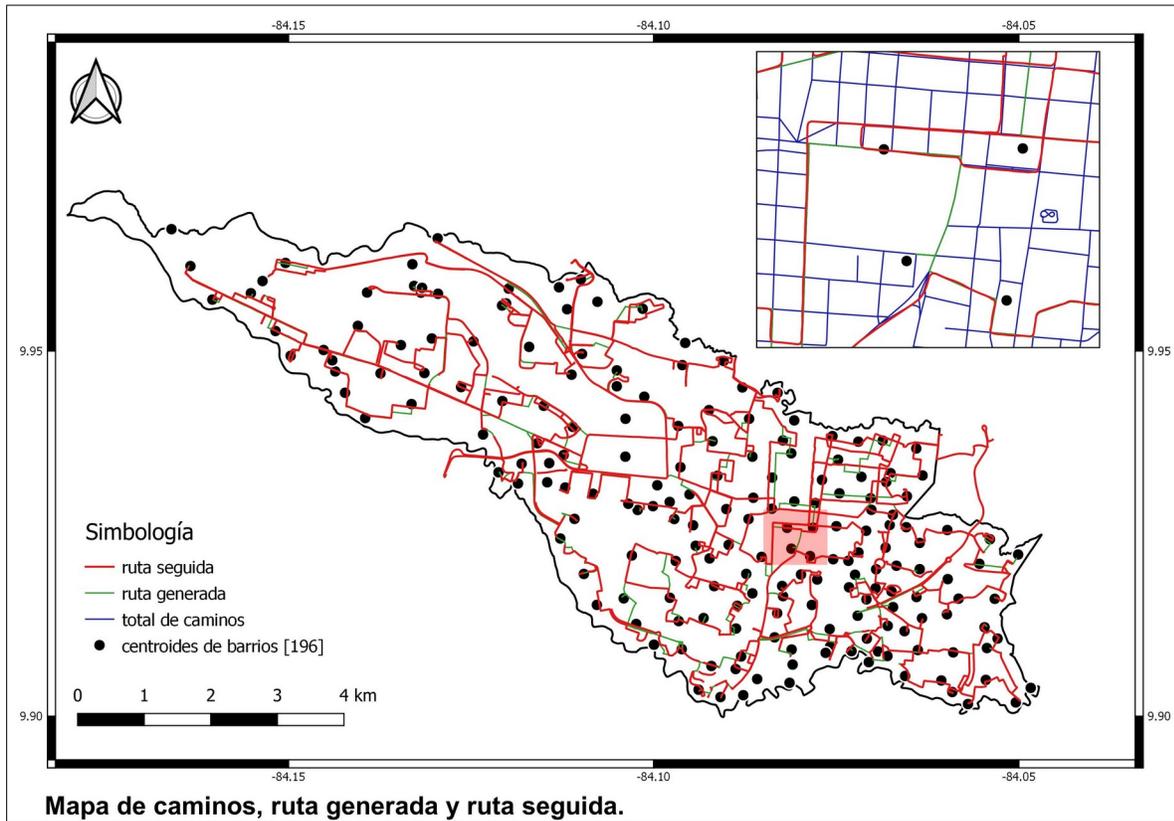


Mapa 2: Población, subpoblación y muestra.

Para seleccionar los individuos que componen la muestra, se aplicó el muestreo estratificado aleatorio con asignación proporcional (del 10 %).

La ruta a seguir debió atravesar los centroides de cada barrio una única vez siguiendo un criterio de optimización de menor costo, en este caso el costo lo constituye la longitud. Lo anterior se tradujo en una ruta generada de 170 km (en verde en el mapa 3), representando un 26 % del total

de caminos del cantón, contabilizados en 650 km (en azul en el mapa 3). La ruta seguida fue ligeramente superior a la generada, con 200 km (31 % del total de caminos, en rojo en el mapa 3), debido principalmente a obstáculos circunstanciales encontrados los días de recorrido o por asuntos de dirección de vías de las calles transitadas.



Mapa 3: Ruta generada, ruta seguida y caminos del cantón de San José.

5.2.3 Análisis de imágenes y administración de datos

Una vez definida la muestra de edificaciones y capturadas las 35 000 imágenes asociadas a estas, se incorporó esta información en la plataforma RRVS (ver apartado 4.5.1) del REM. En RRVS, a cada encuestador se le asignaron usuarios y tareas por realizar, estas últimas consistían básicamente en las estructuras por encuestar.

El grupo de encuestadores consistió de estudiantes de último año de la carrera de Ingeniería Civil de la UCR, trabajando entre 10 y 5 horas por semana. Al inicio, debido a que no se contaba con datos de rendimiento sobre esta actividad, se asignaron 20 horas / semana para la aplicación de

las encuestas. Luego de un mes de aplicación de las encuestas, se generaron los datos suficientes para realizar una proyección de la duración total de la campaña de aplicación de las encuestas.

Se encontró que en promedio, los asistentes duraban alrededor de 22 minutos para completar una encuesta. Por lo tanto, trabajando 20 horas / semana se tardaría 128 semanas, es decir, 2.5 años efectivos (sin contar vacaciones de asistentes) para completar 7 000 encuestas. Entonces, se decide aumentar a 45 horas / semana la dedicación de asistentes a esta tarea, logrando reducir la proyección a 1.2 años efectivos.

Se capacitó a los asistentes encargados de aplicar las encuestas en los términos de la taxonomía de GEM (sección 3.2), aspectos como materiales, tipos y prácticas de construcción usuales en Costa Rica, comportamiento de estructuras ante terremotos, entre otros. Se realizaban reuniones periódicas para evacuar dudas generales y establecer criterios comunes a seguir en la evaluación de aspectos complejos. Se generó un documento que contiene toda esta información presentada en forma clara para que fuera consultadas por cualquiera de los encuestadores, con o sin experiencia. Los asistentes aplicaban las encuestas en las instalaciones del LIS-UCR, donde siempre se encontraba al menos un ingeniero del equipo del proyecto para responder preguntas.

Toda la información recogida por los asistentes a través de la aplicación de la encuesta a cada edificación es enviada a la base de datos del REM (rem db, apartado 4.5.2) por medio del RRVS. En la rem db se administran y almacenan todos los datos correspondientes a las encuestas, e.g. edificaciones, metadata de imágenes, información geográfica, atributos estructurales, trazabilidad sobre quién aplicó la encuesta. Sobre esta base de datos se realizaron todas las consultas para convertir los más de 250 000 datos en información aprovechable mostrada en este trabajo.

5.2.4 Análisis exploratorio y coherencia de datos

Un análisis exploratorio de datos (EDA – exploratory data analysis) busca resumir las principales características de un gran conjunto o pila de datos, utilizando métodos visuales con el objetivo de extraer información y conocer qué nos están diciendo estos. REM cuenta con un script dedicado a esta actividad, el cual se utilizó para obtener información sobre distintos atributos de particular interés, e. g. tipo de material, sistema resistente a cargas laterales (LLRS), cantidad de pisos, presencia de irregularidades, material del entrepiso.

Por medio de tablas cruzadas, que muestra la distribución de frecuencia de combinaciones de dos atributos estructurales, se ejecutó una revisión de la coherencia de los datos identificando combinaciones poco probables o sospechosas. Estas se clasificaban como “sujetas a revisión” y gracias a la trazabilidad que permite rem db, fue posible identificar el encuestador correspondiente para cada una de estas edificaciones. Entonces, se solicitaba hacer una revisión de cada una de estas combinaciones, asegurando de esta manera que estuvieran correctas. De lo contrario, el encuestador procedía a corregir los datos.

El par de atributos seleccionados para esta revisión fue el “tipo de material” (mat_type) y el “sistema resistente a cargas laterales” (LLRS), los cuales inciden de forma importante en el desempeño de las estructuras ante terremotos. A manera de ejemplo, se muestran a continuación las tablas cruzadas para este par de atributos, correspondientes a octubre 2018 y noviembre 2018.

*Cuadro 3: Tablas cruzadas de atributos "tipo de material" y "LLRS".
A la izquierda, tabla octubre 2018, a la derecha, tabla noviembre 2018.*

llrs	L99	LDUAL	LFBR	LFINF	LFM	LH	LN	LWAL
mat_type								
C99	1	0	0	0	0	0	0	0
CR	0	44	4	36	42	0	0	46
CU	0	1	0	0	0	0	0	10
ER	0	0	0	0	0	0	0	2
M99	0	0	0	0	0	0	0	3
MAT99	21	0	0	0	0	0	0	4
MATO	0	0	0	0	0	0	0	1
MCF	0	0	0	0	0	0	0	98
MCR	10	33	0	1	1	1	0	4128
ME	0	0	0	0	0	0	0	1
MR	0	0	0	0	0	0	0	4
S	2	1	6	4	181	1	0	2
SRC	0	0	0	1	1	0	0	0
W	0	0	0	0	5	0	1	289

llrs	L99	LDUAL	LFBR	LFINF	LFM	LWAL
mat_type						
CR	0	46	1	41	43	55
CU	0	0	0	0	0	1
ER	0	0	0	0	0	2
MAT99	32	0	0	0	0	1
MCF	0	1	0	0	0	92
MCR	0	36	0	0	0	4489
S	0	0	7	4	203	0
W	0	0	0	0	5	312

En el cuadro 3, es evidente que luego de que los encuestadores analizaran con mayor detalle las edificaciones con combinaciones sospechosas, la tabla se reduce considerablemente, pasando de 34 combinaciones con una frecuencia igual o mayor a uno en octubre 2018, a 18 combinaciones

en noviembre 2018. Estas 16 combinaciones eliminadas se resaltan en amarillo en la tabla octubre 2018. Como esta no fue la última revisión de coherencia de datos, aún en la tabla de noviembre 2018 queda una combinación sospechosa (CU con LWAL) sujeta a la siguiente revisión.

Adicionalmente, se realizó un control al atributo “número de pisos”, ya que se identificó que habían incoherencias; por ejemplo, algunos edificios con 99 pisos que no existen en Costa Rica al momento, otros con número de pisos indeterminados. Luego de la revisión por parte de los encuestadores, se corrigieron y se concluyó que se debió a errores a la hora de ingresar el número en la casilla correspondiente de la encuesta.

5.2.5 Definición del esquema de clases (tipologías) y su asignación

Basado en los resultados del EDA y considerando la disponibilidad de curvas de fragilidad producidas nacionalmente, recopiladas por Calderón (2018), se crea un esquema de clases o tipologías estructurales, según se define en Pittore, Haas, & Megalooikonomou (2018).

En total se definieron 20 clases o tipologías, tratando de mantener un balance entre separación de comportamiento estructural y posibilidad de asignación de curva de fragilidad. Se tomaron en cuenta siete tipos de atributos para generar la clasificación, a saber: tipo de material, tipo de LLRS, número de pisos, tecnología del material, tipo de ocupación, tipo de entepiso y regularidad estructural. En el cuadro 4 se resumen los detalles de cada una, la definición completa de cada clase se muestra en el apéndice B.

El último esquema de clases propuesto para Costa Rica se presenta en A. Calderón & Silva (2019), donde se definen 34 tipologías para el portafolio residencial a nivel nacional. El 97 % de las residencias se concentran en 15 de las 34 tipologías, todas de baja altura. Las tipologías de concreto prefabricado resultan ser significativas, mientras que las de acero no lo son, esto último pudiéndose deber a que solo toma en cuenta el portafolio residencial. En el caso de este trabajo, las tipologías de concreto prefabricado a nivel del cantón de San José probaron no ser significativas, ya que estas edificaciones representan solamente el 0.5 % de la población de estructuras.

Una vez definido el esquema de clases, se debió asignar una clase a cada una de las 7 296 estructuras de la muestra. Lo anterior se hizo siguiendo la metodología de puntajes con números

difusos desarrollada por Pittore et al. (2018), ver sección 3.3, e implementada siguiendo un script que acompañaba este artículo (ver sección 3.3). Para ello, fue necesario la asignación de pesos a cada uno de los siete atributos estructurales seleccionados, los cuales se muestran en el cuadro Error: no se encontró el origen de la referencia. Con respecto al número de pisos, no se asigna un peso en sí, sino que se aplica una restricción a partir de este. Por ejemplo, las estructuras clasificadas como MCR.1 tienen como restricción el tener un solo piso, las que tengan dos o más pisos no pueden ser clasificadas con esta clase.

Cuadro 4: Esquema de clases definido.

ID	Nombre de la clase	GEM Taxonomy	Tipo de material	Tipo de LLRS	No. Pisos	Tecnología material	Ocupación	
1	MCR.1	MCR+CBH/LWAL/HEX:1/IRRE/FN	MCR	LWAL	1	--	--	
2	MCR.2	MCR+CBH/LWAL/H_BET:2:+/IRRE/FC	MCR	LWAL	2 o +	--	--	
3	MCF.1	MCF+CLBRS/LWAL/HEX:1/IRRE/FN	MCF	LWAL	1	--	--	
4	MCF.2	MCF+CLBRS/LWAL/H_BET:2:+/IRRE/FC	MCF	LWAL	2 o +	--	--	
5	CR.D.A	CR/LDUAL/H_BET:1:5/IRRE/FC	CR	LDUAL	1 a 5	--	--	
6	CR.D.B	CR/LDUAL/H_BET:6:10/IRRE/FC	CR	LDUAL	6 a 10	--	--	
7	CR.D.C	CR/LDUAL/H_BET:11:+/IRRE/FC	CR	LDUAL	11 o +	--	--	
8	CR.I.A	CR/LFINF/H_BET:1:5/IRRE/FC	CR	LFINF	1 a 5	--	--	
9	CR.F.A	CR/LFM/H_BET:1:5/IRRE/FC	CR	LFM	1 a 5	--	--	
10	CR.F.B	CR/LFM/H_BET:6:10/IRRE/FC	CR	LFM	6 a 10	--	--	
11	CR.F.C	CR/LFM/H_BET:11:+/IRRE/FC	CR	LFM	11 o +	--	--	
12	CR.W.A	CR/LWAL/H_BET:1:5/IRRE/FC	CR	LWAL	1 a 5	--	--	
13	CR.W.B	CR/LWAL/H_BET:6:10/IRRE/FC	CR	LWAL	6 a 10	--	--	
14	CR.W.C	CR/LWAL/H_BET:11:+/IRRE/FC	CR	LWAL	11 o +	--	--	
15	S.Wh.1	S+SR/LFM/HEX:1/IRRE/FN	S	LFM, LFBR	1	--	COM2, COM3	
16	S.F.C.A	S+SL/LFM/H_BET:1:5/IRRE/FME	S	LFM	1 a 5	SL	--	
17	S.F.H.A	S/LFM/H_BET:1:5/IRRE/FC	S	LFM	1 a 5	Otro	--	
18	W.F.A	W/LFM/H_BET:1:5/IRRE/FW	W	LFM	1 a 2	--	--	
19	W.W.A	W/LWAL/H_BET:1:5/IRRE/FW	W	LWAL	1 a 2	--	--	
20	INFOR	Construcciones informales						RES6

Cuadro 5: Pesos de atributos seleccionados.

Atributo estructural	Peso	Atributo estructural	Peso
Tipo de material	0.30	Tipo de entrepiso	0.075
Tipo de LLRS	0.25	Regularidad estructural	0.075
Tecnología del material	0.15	Número de pisos	Restricción

5.3 Fase III: Análisis del inventario de edificaciones

El inventario generado en la fase anterior está basado en encuestas remotas, que en comparación con las encuestas presenciales tiene la ventaja de ahorrar recursos y la desventaja de poder

observar solo lo que muestran las imágenes. Por esta razón, se decidió aplicar encuestas presenciales a algunas estructuras que habían sido previamente encuestadas de forma remota, con el fin de cuantificar las diferencias y poder tener una idea de la precisión de las encuestas remotas.

Nuevamente, se recurrió a criterio de experto para determinar el tamaño de la muestra, definida en el rango de 0.5 % a 1 % de la población de 84 004 estructuras. Se lograron encuestar 538 edificaciones, correspondientes a un 0.6 %, logrando estar dentro del rango mencionado.

En primera instancia, se comparó la asignación de clases para cada una de las 538 edificaciones, basada en los atributos capturados con encuestas presenciales versus los capturados de manera remota. En segunda instancia, se realizó un análisis de estas diferencias, para poder determinar el origen de las mismas y emitir recomendaciones en esta línea. Los resultados se muestran en el apartado 6.3.2.

Otro aspecto estudiado fue el tamaño de la muestra, ya que cuando se realizó la revisión bibliográfica, se notó que había una carencia de estudios con respecto a este dato, enfocados en inventarios de edificaciones para modelos de exposición a utilizar en evaluaciones de riesgo sísmico. Entonces, se calcularon varios modelos, cada uno asociado a un tamaño de muestra progresivamente más pequeño, para poder identificar alguna posible tendencia y un tamaño de muestra óptimo, que fuera atractivo en términos de tiempo y costo pero que no sacrificara en gran medida la precisión del modelo. Los resultados se presentan en el apartado 6.3.3.

Finalmente, se realiza una comparación con trabajos anteriores, el cual tenía como objetivo encontrar posibles diferencias entre el modelo generado en este trabajo y lo descrito en la sección 1.7. Los resultados se muestran en el apartado 6.3.4.

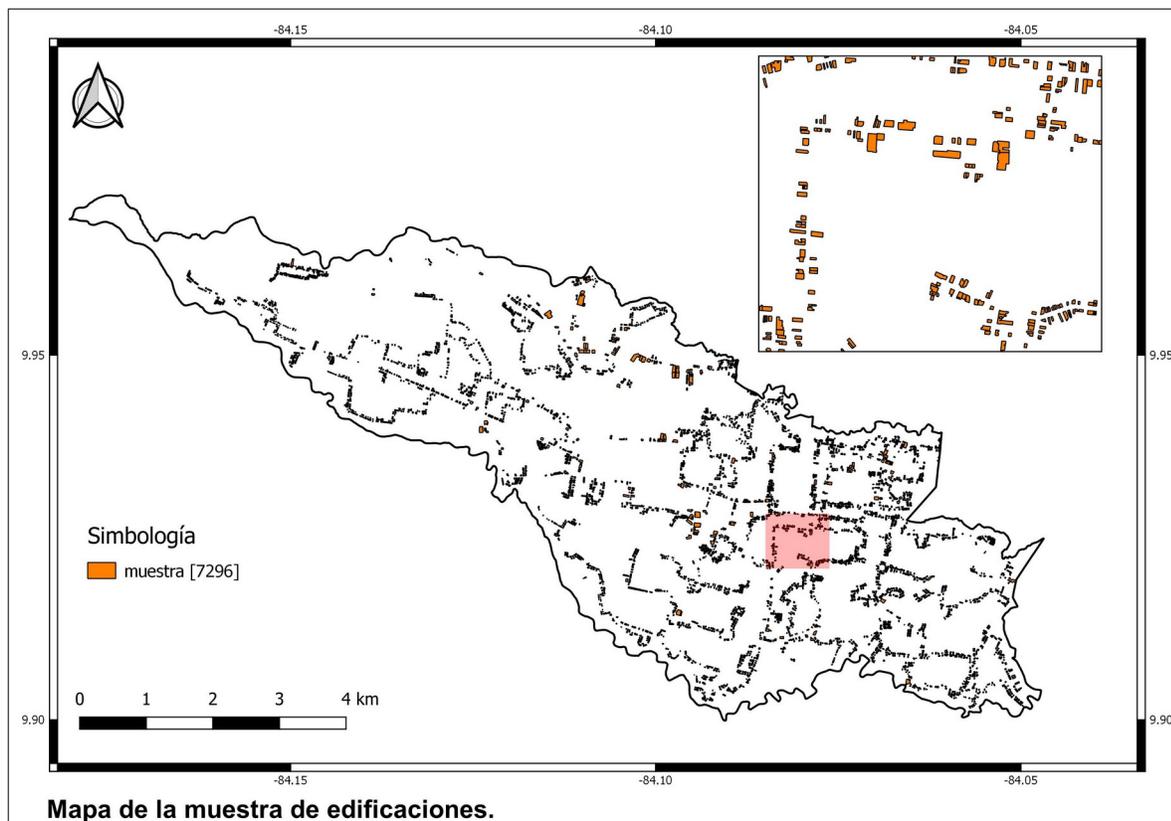
5.4 Fase IV: Conclusiones y recomendaciones

En esta última fase se obtuvieron las conclusiones y recomendaciones producto de las actividades realizadas anteriormente. Se orientaron a la síntesis de los resultados obtenidos, aspectos por mejorar o explorar en futuros trabajos, así como los aprendizajes devengados de la realización del proyecto.

6 INVENTARIO DE EDIFICACIONES

6.1 Caracterización de la muestra

La muestra utilizada consistió de 7 296 edificaciones, ubicadas a lo largo de la ruta seguida por el automóvil acondicionado con el MOMA-GFZ (apartado 5.2.2), distribuidas espacialmente por todo el cantón de San José (ver mapa 4). Los individuos de la muestra fueron seleccionados utilizando el método de muestreo estratificado aleatorio con asignación proporcional del 10 %, utilizando los 196 barrios como estratos. El total de edificaciones del cantón es de 84 004, por lo que la muestra representa aproximadamente un 8.7 % de esta población.



Mapa 4: Muestra de edificaciones.

6.1.1 Análisis exploratorio de datos

A continuación se muestran las gráficas obtenidas del análisis exploratorio de datos, en función de seis atributos seleccionados. Estos son utilizados para la definición del esquema de clases, debido al impacto que tienen en el desempeño sísmico de las edificaciones. Las tres gráficas superiores muestran la cantidad de estructuras en función del atributo, mientras las tres gráficas inferiores lo hacen según el área total construida, que se obtiene al multiplicar la cantidad de estructuras por el área construida de cada estructura.

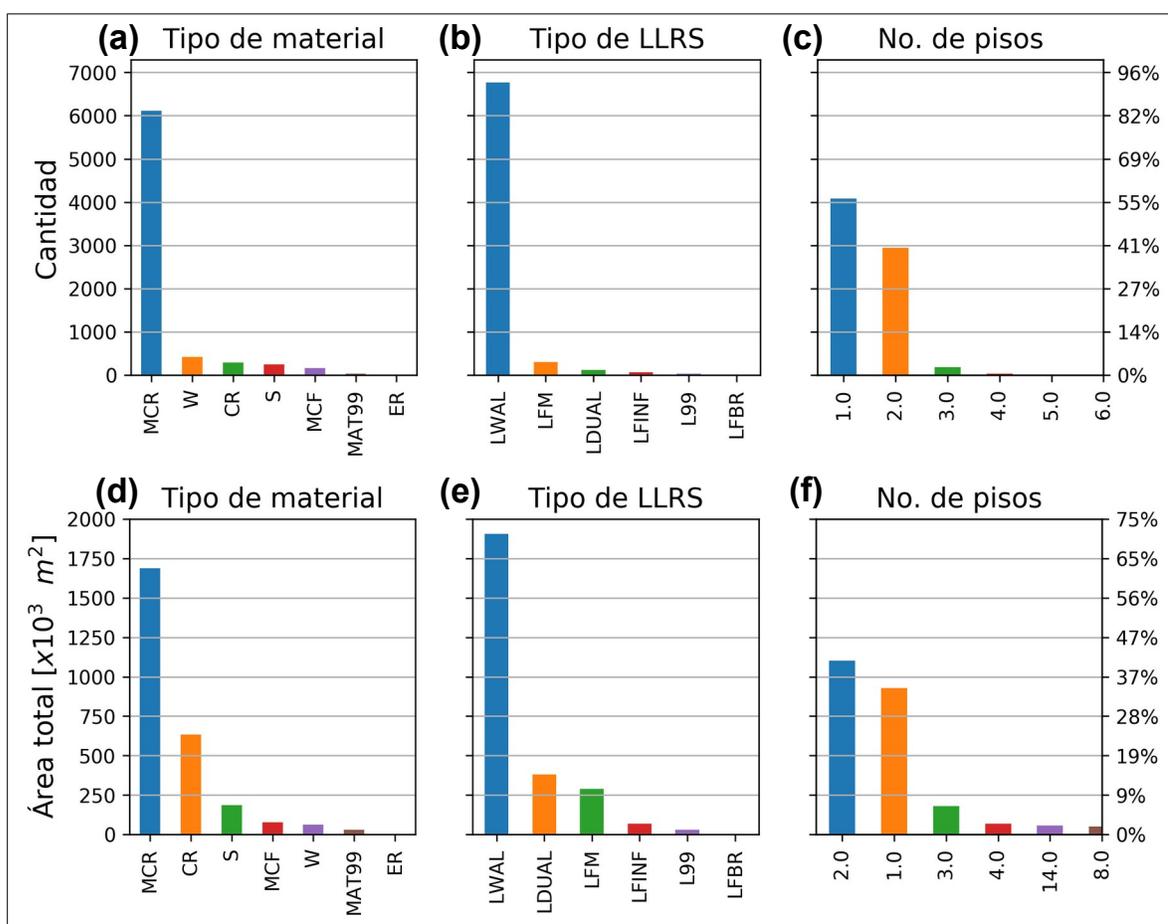


Figura 16: Distribución según tipo de material, LLRS y número de pisos.

La figura 16 muestra los resultados para los atributos de tipo de material, tipo de sistema resistente a cargas laterales (LLRS) y número de pisos. Se puede concluir que el tipo de material y LLRS predominantes son la mampostería confinada reforzada (MCR) y el tipo muro (LWAL), respectivamente, para ambos casos de cantidad y área construida. También se evidencia que las diferencias son menores para el cálculo según área construida que para cantidad de estructuras.

Por ejemplo, la diferencia entre el primer y segundo tipo de material según cantidad de estructuras (fig.16a) es del 78 %, mientras que según área construida (fig.16d) es del 40 %, se reduce a casi la mitad.

Un aspecto interesante para el resto de tipo de materiales, tipo de LLRS y número de pisos, es que al hacer el análisis según cantidad o área construida, el orden de importancia cambia. Por ejemplo, según cantidad de estructuras, el segundo material (fig.16a) en importancia es la madera (W), pero según área construida (fig.16d) llega a ser el quinto en importancia y el segundo es el concreto reforzado (CR). Si se piensa en el pérdidas en términos de costo y densidad de residentes, se debería dar más relevancia a la distribución según área construida.

Con respecto al tipo de LLRS, se tiene que el tipo dual (LDUAL) y tipo marco (LFM) le siguen en importancia al tipo muro, tanto por cantidad de estructuras como por área construida. Con respecto al número de pisos, las estructuras de dos pisos son las que tienen mayor área construida (fig.16f), seguidas de las de uno y tres pisos.

En la figura 17 se muestran los resultados para los atributos de regularidad, tipo de irregularidad y material de entrepiso. Al igual que en el caso anterior, las diferencias son menores para áreas construidas que para cantidad de estructuras. Existe una predominancia de estructuras regulares (fig.17a y fig.17d), así como de tipo de irregularidades relacionadas a torsión (TOR) y cambio en el LLRS verticalmente (CHV).

El material de entrepisos más utilizado (fig.17f) es el concreto (FC), seguido por el metal (FME). En tipo de irregularidad, las estructuras sin irregularidades se representan con IRN y en material de entrepiso, las edificaciones sin entrepiso, es decir, de un solo piso, se representan como FN.

Además del análisis presentado en el párrafo anterior, este insumo es importante porque se utiliza para hacer una definición de esquema de clases basada en evidencia de los atributos recolectados. Por ejemplo, tomando en cuenta estos gráficos, sin incluir todavía el tema de curvas de fragilidad, se deberían tener varias clases para las edificaciones de mampostería confinada reforzada (MCR), con LLRS tipo muro de uno o 2 pisos de altura, ya que hay muchas de ellas.

Finalmente, resulta útil conocer cómo se distribuye el portafolio de inmuebles según el tipo de ocupación (ver figura 18).

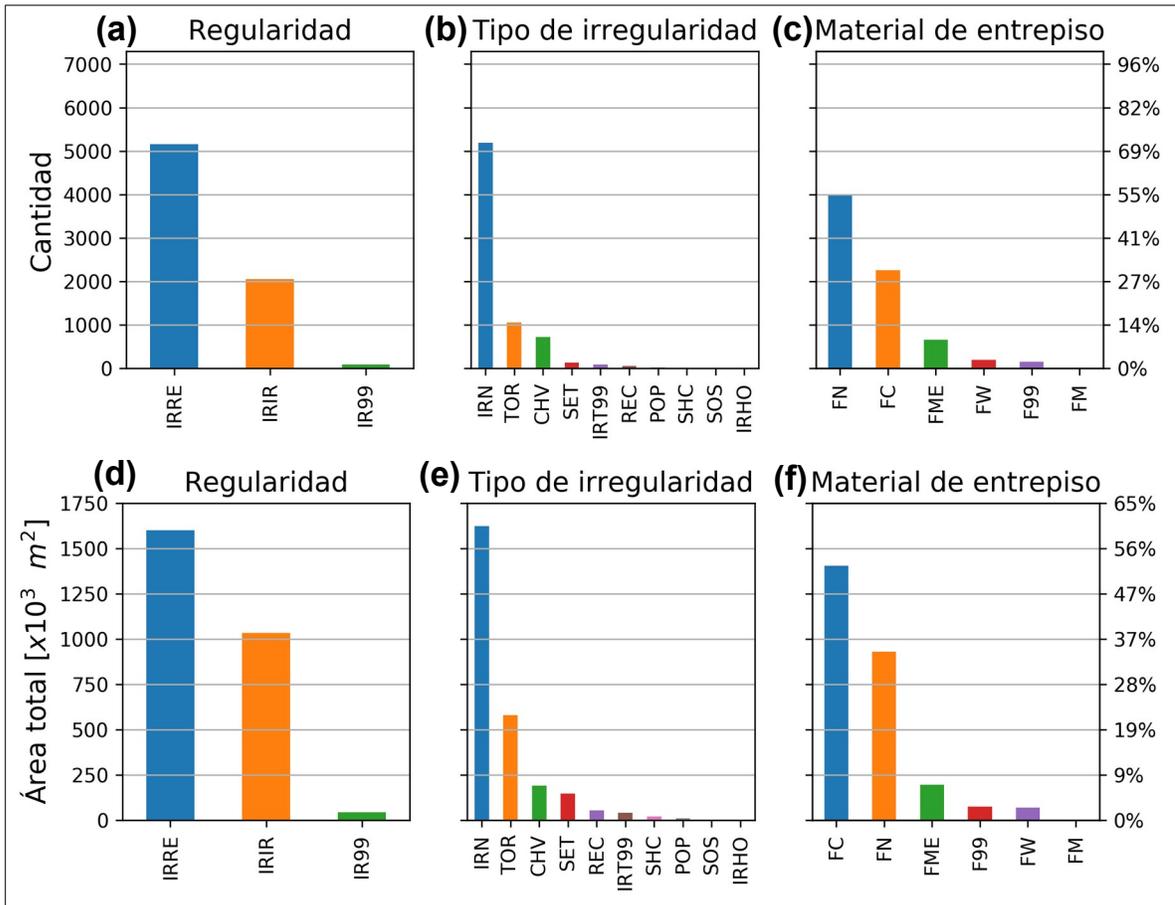


Figura 17: Distribución según regularidad, tipo de irregularidad y material de entrepiso.

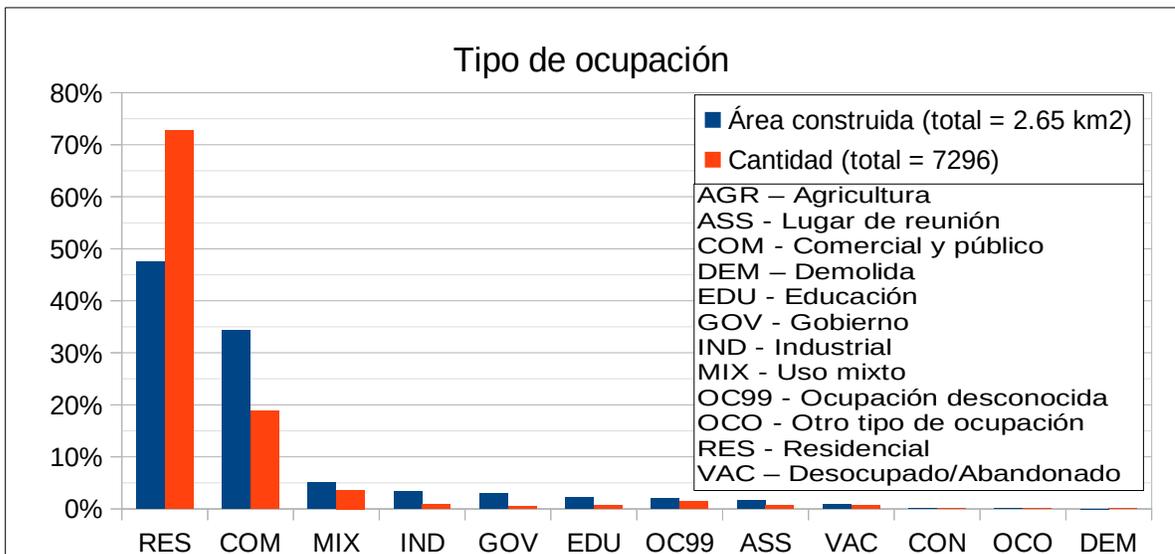


Figura 18: Distribución según tipo de ocupación.

6.1.2 Revisión de coherencia de datos

En total se realizaron cuatro revisiones de coherencia de datos (ver apartado 5.2.4) en distintos momentos del proyecto, específicamente, en octubre 2018, febrero, junio y agosto 2019. En cada revisión se aplicaron correcciones a 104, 27, 23 y 104 edificaciones, respectivamente, para un total de 258 estructuras, un 3.5 % del total de la muestra trabajada.

Cuadro 6: Resultados de revisión de coherencia de datos.

Tabla cruzada de tipo de material – LLRS del 1er de octubre 2018 (izquierda) y 16 de agosto 2019 (derecha).

llrs	L99	LDUAL	LFBR	LFINF	LFM	LH	LN	LWAL
mat_type								
C99	1	0	0	0	0	0	0	0
CR	0	44	4	36	42	0	0	46
CU	0	1	0	0	0	0	0	10
ER	0	0	0	0	0	0	0	2
M99	0	0	0	0	0	0	0	3
MAT99	21	0	0	0	0	0	0	4
MATO	0	0	0	0	0	0	0	1
MCF	0	0	0	0	0	0	0	98
MCR	10	33	0	1	1	1	0	4128
ME	0	0	0	0	0	0	0	1
MR	0	0	0	0	0	0	0	4
S	2	1	6	4	181	1	0	2
SRC	0	0	0	1	1	0	0	0
W	0	0	0	0	5	0	1	289

llrs	L99	LDUAL	LFBR	LFINF	LFM	LWAL
mat_type						
CR	0	77	0	58	56	106
ER	0	0	0	0	0	2
MAT99	37	0	0	0	0	0
MCF	0	1	0	0	0	165
MCR	0	44	0	0	0	6072
S	0	0	8	4	243	0
W	0	0	0	0	6	417

La tabla cruzada de los atributos “tipo de material” (mat_type) y “sistema resistente a cargas laterales” (LLRS), al inicio contaba con 34 combinaciones de este par de atributos. Al finalizar la última revisión, el número de combinaciones bajó a 5 combinaciones, como se aprecia en la siguiente figura.

6.2 Inventario de edificaciones

El inventario de edificaciones o modelo de exposición parcial consiste en la distribución porcentual de cada clase o tipología definida, así como la distribución espacial de estas, a nivel de cantón, distrito y barrio. Para ello, se asignó una clase a cada estructura que compone la muestra,

siguiendo lo explicado en el apartado 5.2.5. En esta sección se muestran los resultados de dicha asignación.

Hay dos puntos por aclarar antes de presentar los resultados. El primero y más importante es que la distribución de clases puede hacerse en función de: la cantidad de estructuras para cada clase o del área construida total para cada clase. En este trabajo se le da prioridad al área construida por tener una mejor correlación con la estimación de pérdidas por costo de reposición u otra figura de costo seleccionada. El segundo se refiere a que la representación del modelo puede ser gráfica o en forma de tabla. En este trabajo se utilizan ambas representaciones en función de lo que se quiera analizar, incluyendo en las tablas exclusivamente el área construida total para facilidad de lectura de datos.

6.2.1 Inventario a nivel de cantón

A continuación se muestra el inventario de edificaciones a nivel de cantón, en forma gráfica y de tabla. La gráfica incluye el parámetro de cantidad de edificaciones por clase y el área construida total por clase. Para posibilitar la comparación, se ordenó en forma descendente según el área construida.

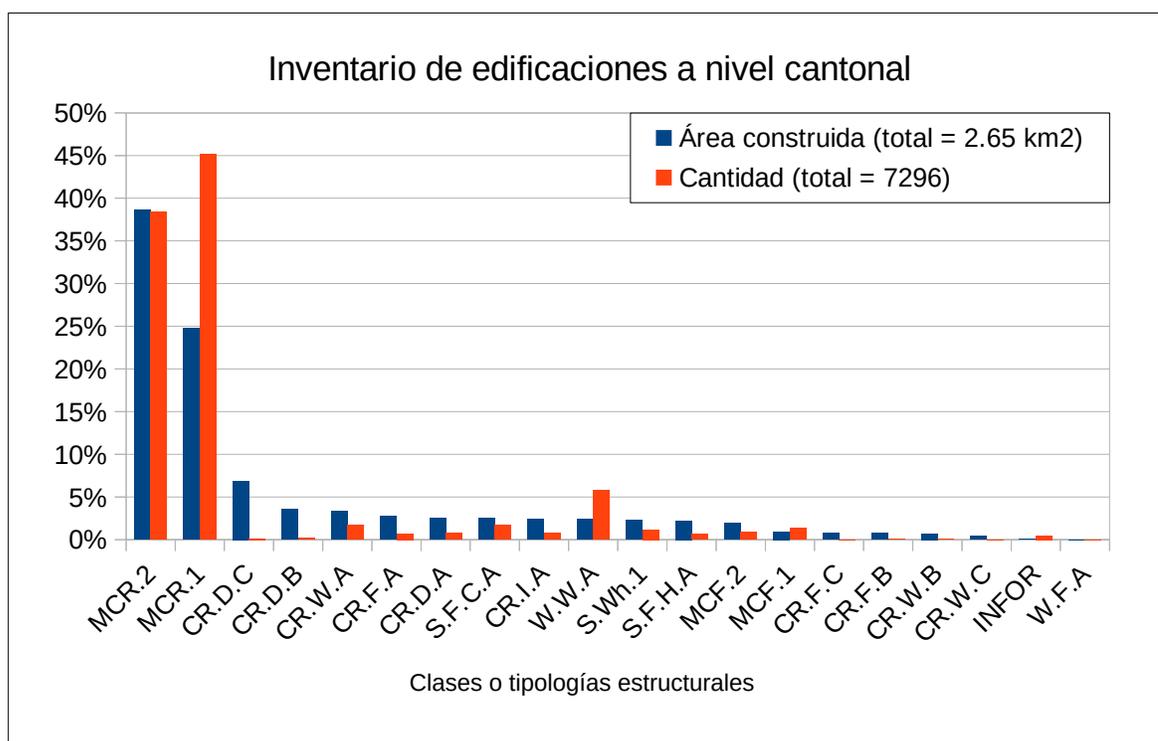


Figura 19: Inventario de edificaciones a nivel cantonal, según cantidad de estructuras y área construida total.

De la figura 19 se aprecia que las clases dominantes son las de mampostería confinada reforzada, tanto por área construida como por cantidad de estructuras. Luego, la distribución de frecuencias varía según la variable utilizada: área construida o la cantidad de estructuras, siguiendo en predominancia algunas clases de concreto reforzado o de madera, respectivamente. Además, se observa que las diferencias en la distribución de clases son mayores (más marcadas) si se utiliza el parámetro de cantidad de estructuras.

En el cuadro 7 se detalla el inventario según área construida total, pudiéndose notar que las clases mampostería confinada reforzada (MCR) componen el 63 % del total de edificaciones, seguida por algunas clases de concreto reforzado (CR), que representan el 19 %. El restante 18 % se reparte entre 13 tipologías, con porcentajes menores al 2.5 %.

Cuadro 7: Inventario a nivel cantonal según área construida total [$\times 10^3$ m²].

	1	2	3	4	5	6	7
Clase	MCR.2	MCR.1	CR.D.C	CR.D.B	CR.W.A	CR.F.A	CR.D.A
Total	1025.2	656.7	183.0	93.3	88.1	73.1	67.1
Relativa	38.7%	24.8%	6.9%	3.5%	3.3%	2.8%	2.5%
Acumulada	38.7%	63.4%	70.3%	73.8%	77.2%	79.9%	82.5%

	8	9	10	11	12	13	14
Clase	S.F.C.A	CR.I.A	W.W.A	S.Wh.1	S.F.H.A	MCF.2	MCF.1
Total	66.9	64.4	64.0	61.2	59.2	51.1	24.9
Relativa	2.5%	2.4%	2.4%	2.3%	2.2%	1.9%	0.9%
Acumulada	85.0%	87.4%	89.8%	92.1%	94.4%	96.3%	97.2%

	15	16	17	18	19	20	
Clase	CR.F.C	CR.F.B	CR.W.B	CR.W.C	INFOR	W.F.A	TOTAL
Total	20.6	20.5	18.7	10.7	2.7	0.3	2651.9
Relativa	0.8%	0.8%	0.7%	0.4%	0.1%	0.0%	100.00%
Acumulada	98.0%	98.8%	99.5%	99.9%	100.0%	100.0%	

6.2.2 Inventario a nivel de distrito

A nivel de distrito, y aún más a nivel de barrio, el presentar resultados incluyendo la totalidad de clases de edificaciones hace que las gráficas no transmitan de la mejor manera la información. Por esta razón, se hace una agrupación de las clases, tanto a nivel de distrito como de barrio, trabajando con un total de cinco clases agrupadas, en lugar de la 20 clases desagrupadas. El criterio de agrupación utilizado se basó en el material del LLRS. Por ejemplo, se creó una sola clase llamada “mampostería”, que contiene las clases MCR.1, MCR.2, MCF.1 y MCF.2.

En la figura 20 se muestran los resultados en forma gráfica. Es importante aclarar que el gráfico se interrumpe al 30 % para poder capturar de mejor manera la variación de las clases distintas a la mampostería, ya que esta sigue siendo predominante en todos los distritos.

En esta figura, por ejemplo, se resalta que los distritos de El Carmen y Mata Redonda son los que cuentan con más estructuras de concreto reforzado, mientras el distrito Uruca concentra las edificaciones informales, posiblemente por el barrio de La Carpio.

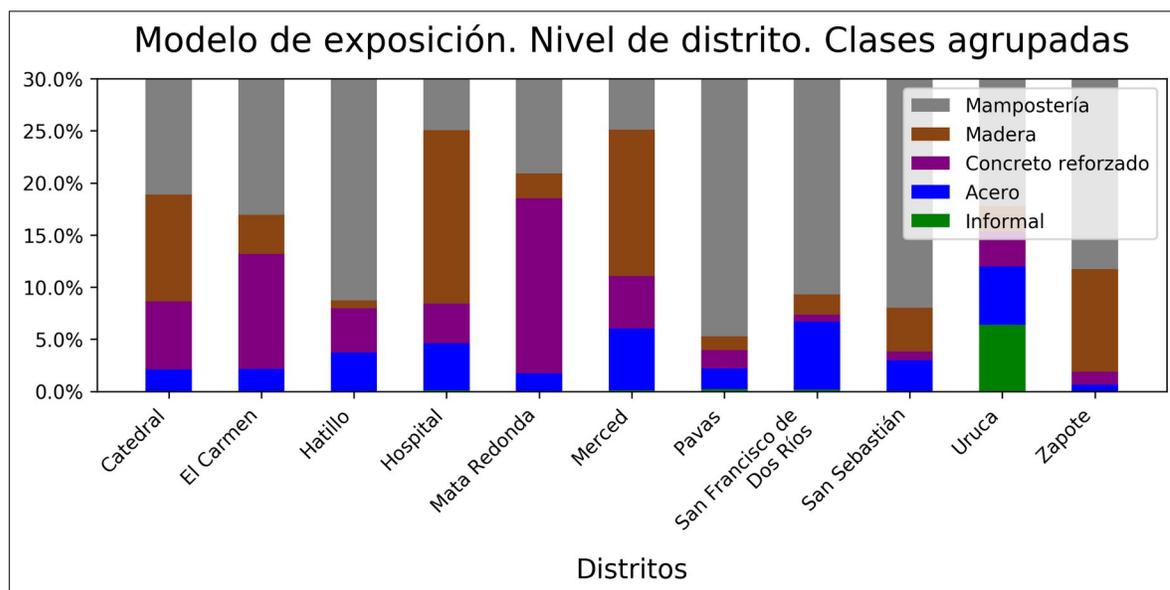
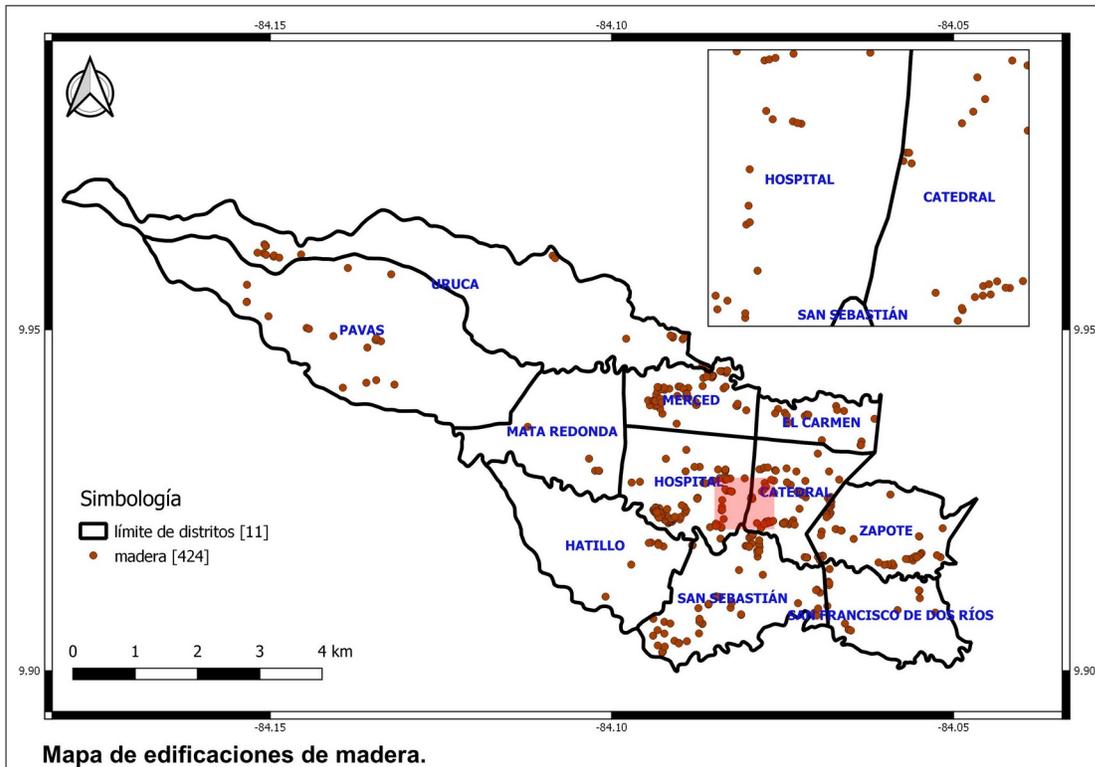


Figura 20: Inventario de edificaciones a nivel distrital, según área construida total con clases agrupadas.

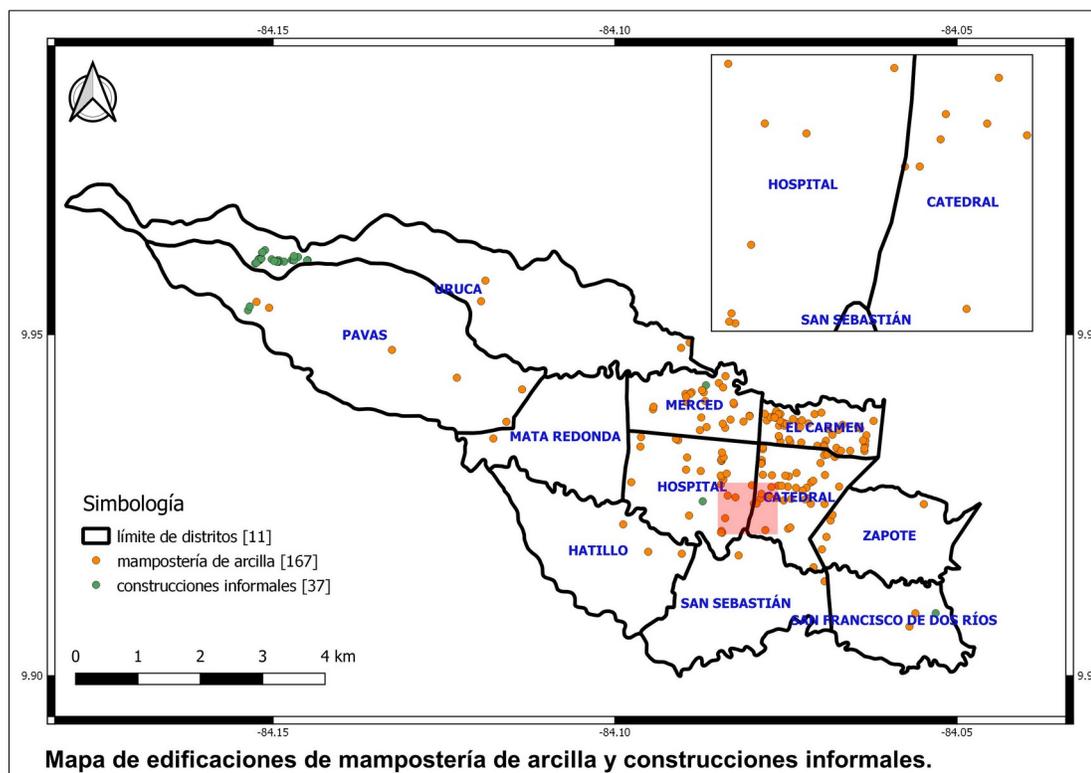
También se puede apreciar una presencia importante de estructuras de madera en los distritos Catedral, Hospital, Merced y Zapote. Esto se podría deber, según el Ing. Álvaro Poveda Vargas - docente de la Escuela de Ingeniería Civil (EIC) de la Universidad de Costa Rica (Poveda, 2018) -, a medidas constructivas adoptadas luego del terremoto de Cartago de 1910. La mayor de estas sería la prohibición de construir con adobe, calicanto y piedra, emitida el 12 de setiembre de 1910 por el presidente de ese entonces, Don Ricardo Jiménez (Castro, 2017).

Evidencia de lo anterior la expone Malavassi-Aguilar (2013) en su estudio sobre los “barrios del Sur” de San José y las viviendas de madera. La autora explica que a raíz de este terremoto, se suscitan migraciones internas hacia estos barrios, construyendo sus viviendas predominantemente en madera. A continuación se muestra un mapa con las edificaciones de madera, donde se aprecia se concentración hacia el este del cantón.



Mapa 5: Edificaciones de madera.

Otros casos en dónde se identificó una concentración espacial de tipo de edificaciones fue en las construidas con mampostería de arcilla y las denominadas construcciones informales. En el caso de las primeras, se concentran al este del cantón, mientras que las segundas se concentran en la parte oeste del distrito de la Uruca, con presencia en Pavas, Merced, Hospital y San Francisco de Dos Ríos, como se aprecia en los mapas y 6.



Mapa 6: Edificaciones de mampostería de arcilla y construcciones informales.

6.2.3 Inventario a nivel de barrio

Adicional a lo explicado en el apartado anterior, una dificultad adicional al presentar los resultados obtenidos a nivel de barrio es que hay 196 de estas unidades en el cantón de San José. Debido a esto, no es suficiente el agrupar las clases de edificaciones, sino que se pueden representar un máximo de 30 barrios por gráfico, para poder leer con claridad la información. Además, no se interrumpe el gráfico al 30 %, ya que a nivel de barrio no siempre es predominante la clase de mampostería. A continuación se muestra uno de los seis gráficos generados, el inventario completo se muestra en el apéndice C.

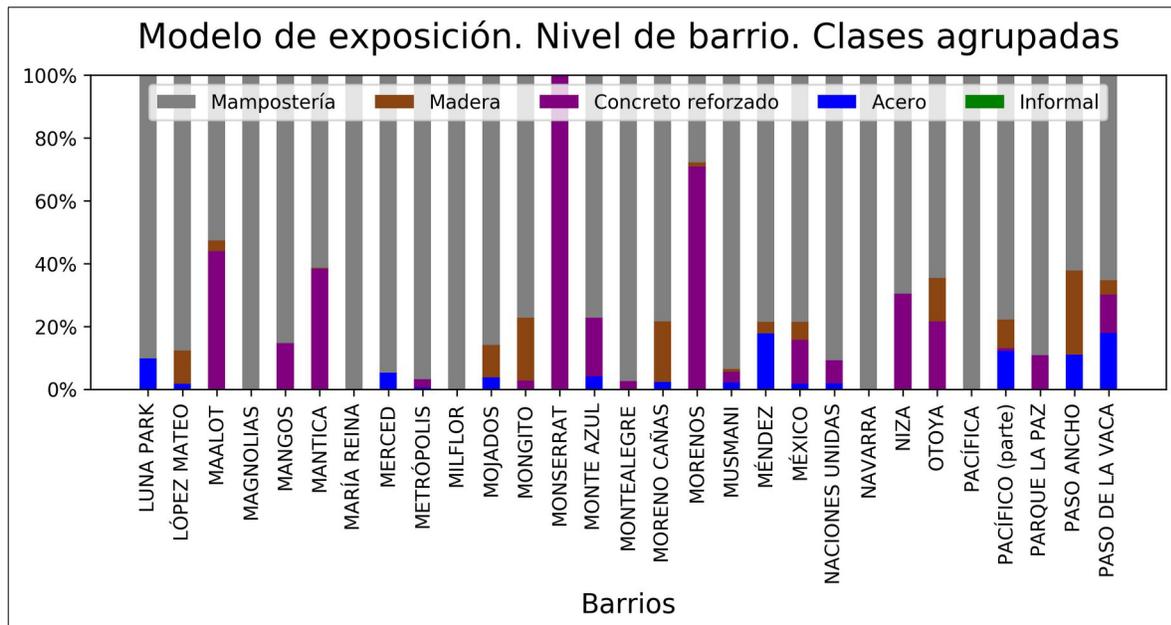


Figura 21: Inventario de edificaciones a nivel de barrio (ejemplo para 30 barrios), según área construida total con clases agrupadas.

De la figura 21, resalta que para el barrio Monserrat, la totalidad de edificaciones encuestadas son de la clase “Concreto reforzado”. También se observa que los barrios Maalot, Mantica, Morenos y Niza tienen una presencia importante de esta misma clase. El análisis anterior se puede aplicar, para cada barrio, en función de cada clase o tipología agrupada.

Para poder capturar esta distribución para todos los barrios en un solo gráfico, se generó un histograma que resume la cantidad de barrios en función del porcentaje de área construida por clase de edificación (ver figura 22). Por ejemplo, de esta figura, se interpreta que para 181 barrios, la tipología “Informal” representa menos del 10 % de su área construida. Se aprecia, entonces, que todas las tipologías excepto mampostería se concentran en este rango del 0 % al 10 %.

Por esta razón, se hizo otro gráfico interrumpiendo la cantidad de estructuras en 20, mostrado en la figura 23. En este gráfico es más sencillo apreciar, por ejemplo, que un total de cuatro barrios tiene más del 80 % de edificaciones del tipo “Concreto reforzado”.

Ejemplificando, si se asume que un material es predominante cuando el 60 % o más de sus edificaciones están fabricadas con este, se tiene que en 11 barrios el material predominante es el concreto reforzado, mientras que en cuatro es el acero. Por otro lado, para cuatro barrios las estructuras de maderas constituyen entre un 20 % a 40 % del total de sus edificaciones.

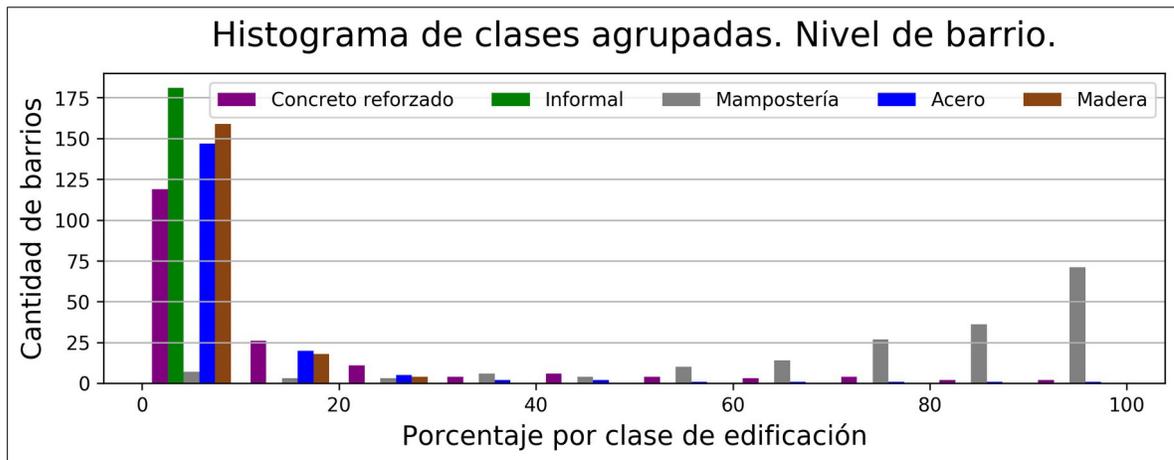


Figura 22: Histograma para clases agrupadas a nivel de barrios.

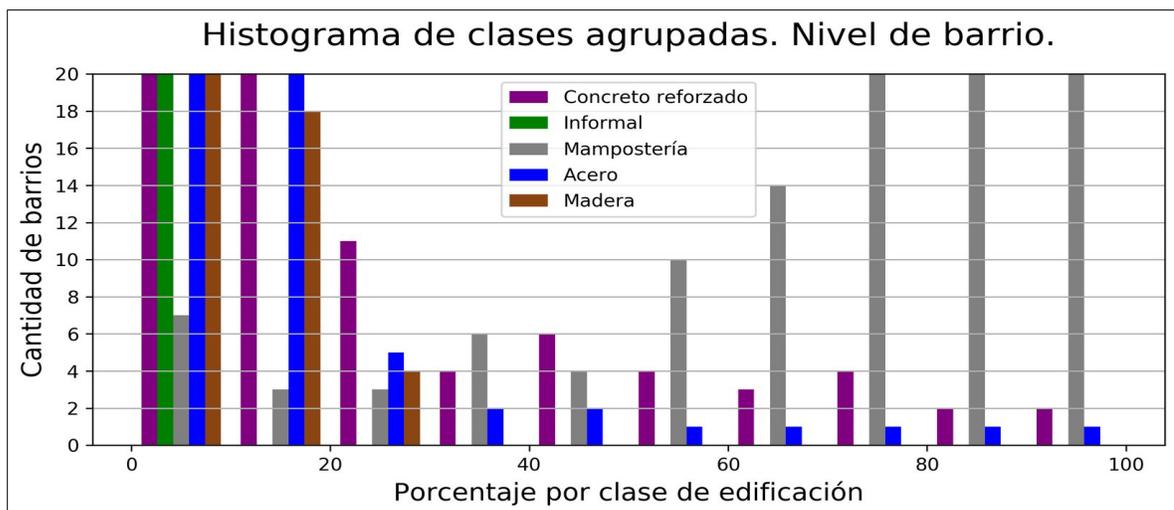


Figura 23: Histograma para clases agrupadas a nivel de barrios, interrumpida en 20 barrios.

El gráfico anterior puede generarse para cada material por separado, para facilitar la visualización. A continuación se muestran los correspondientes a las clases de mampostería y madera. En el primero, se evidencia que para aproximadamente 70 barrios, más del 90 % del área construida corresponde a clases de mampostería (última barra de la derecha), mientras que en el segundo se aprecia que el área construida de clases de madera no supera el 30 % para ningún barrio. Los cuatro gráficos restantes se muestran en el apéndice D.

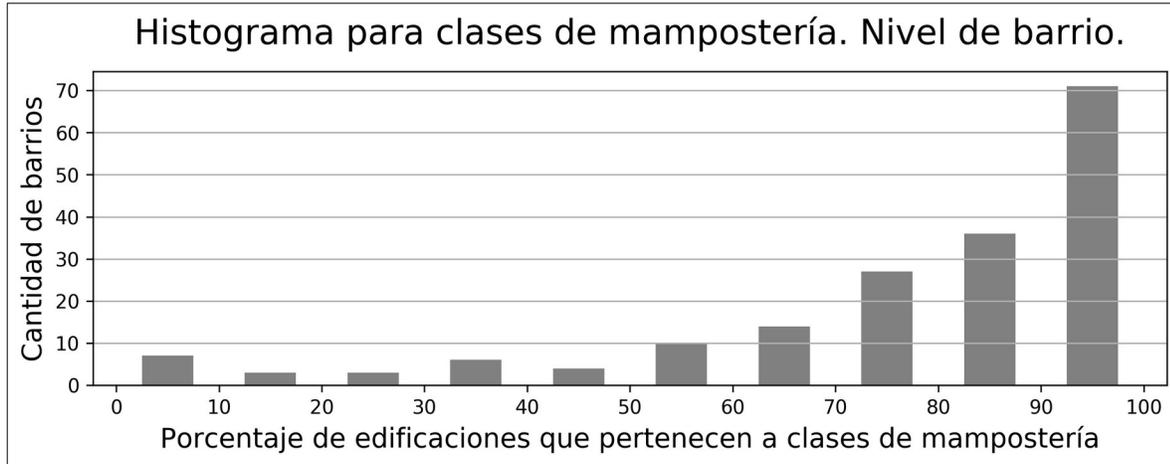


Figura 24: Histograma para clases de mampostería a nivel de barrios.

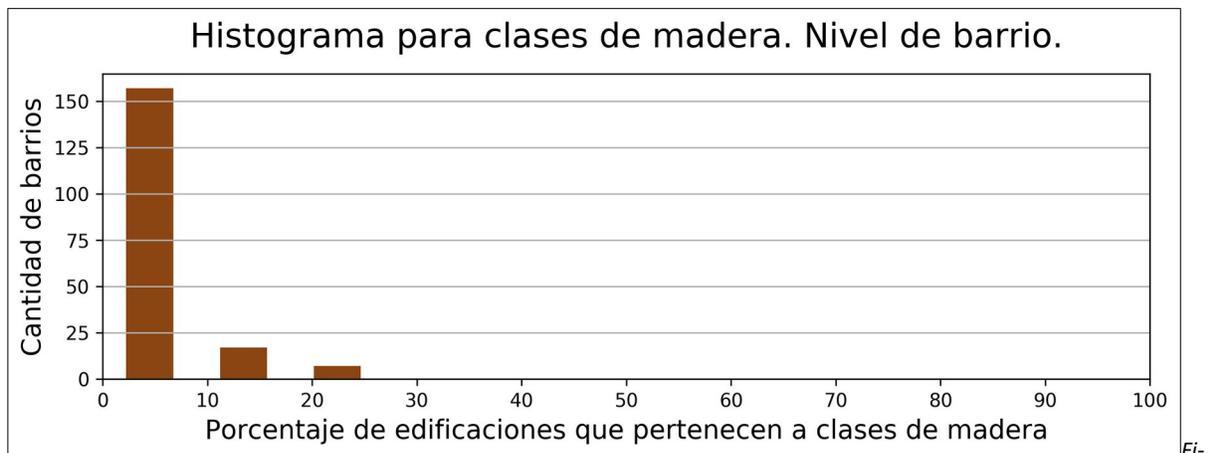
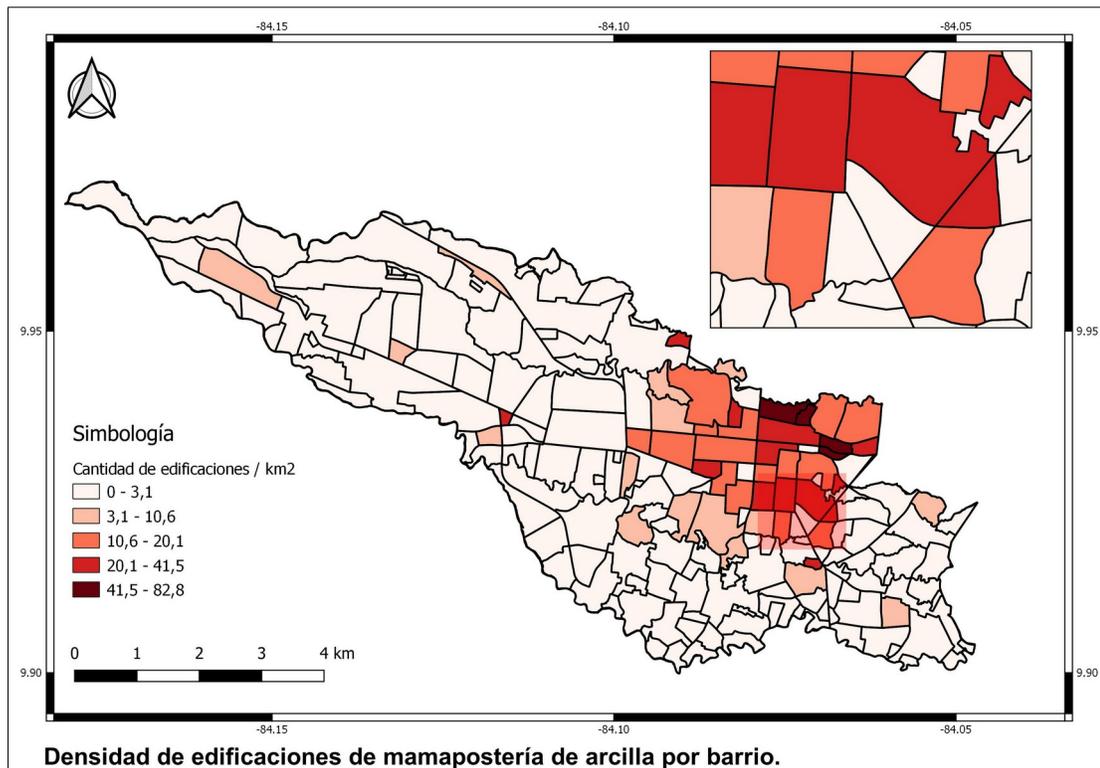
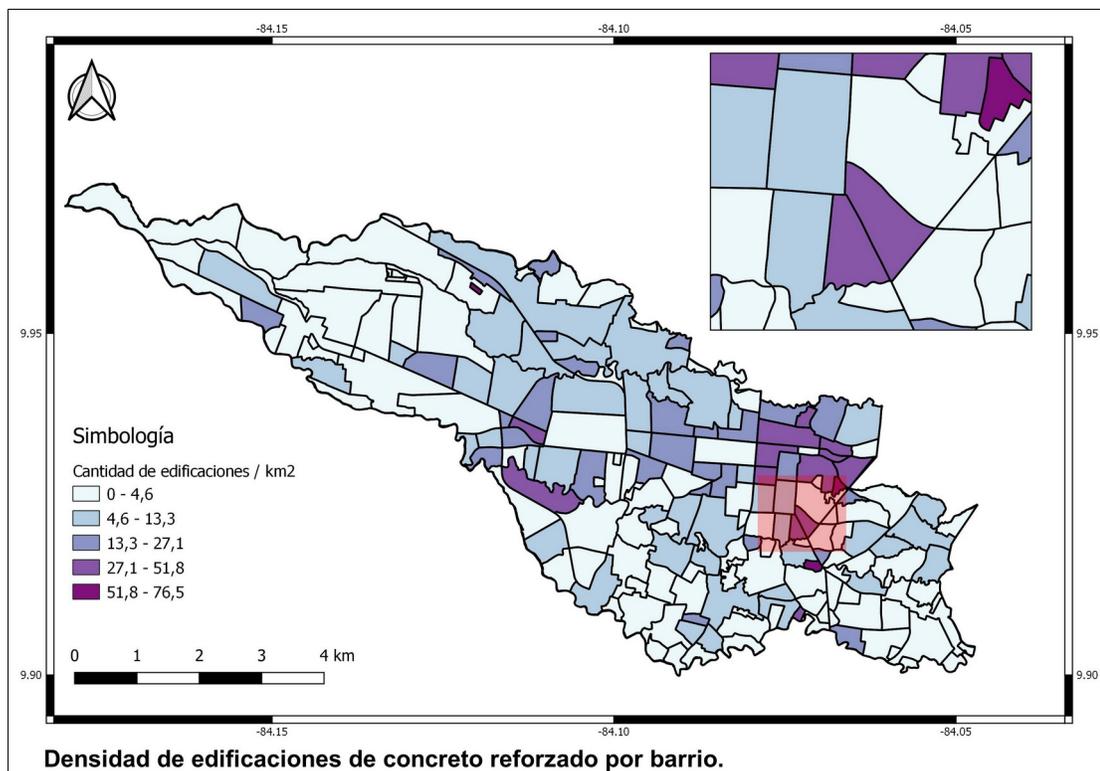


Figura 25: Histograma para clases de madera a nivel de barrios.

A nivel de barrios, se puede hacer un conteo de edificaciones de cada clase agrupada por kilómetro cuadrado y producir mapas para cada una de ellas, donde se utiliza una escala en gradiente para explorar concentraciones a nivel espacial. A modo de ejemplo, se muestran los mapas para las clases agrupadas de mampostería de arcilla y concreto reforzado, donde se aprecia una concentración hacia el nor-este para ambos materiales. Los mapas para las demás clases se muestran en el apéndice E.



Mapa 7: Densidad de edificaciones de mampostería de arcilla por barrio.



Mapa 8: Densidad de edificaciones de concreto reforzado por barrio.

6.3 Análisis del inventario generado

6.3.1 Margen de error e intervalos de confianza

Debido a que la muestra es de un tamaño importante, los márgenes de error asociados a las distribuciones de las clases constructivas se espera sean bajos. Sin embargo, se debe tener presente que este margen de error mide error por muestreo y no por otros factores, como por ejemplo la precisión del instrumento de encuesta, discutido en el siguiente apartado.

Utilizando las fórmulas presentadas en la sección 3.1.4, se calculó el margen de error y los intervalos de confianza para la proporción de cada clase constructiva utilizando áreas construidas totales. El tamaño de la muestra “n” es igual a 7 296, y el nivel de confianza es del 95 %. Los resultados se muestran a continuación:

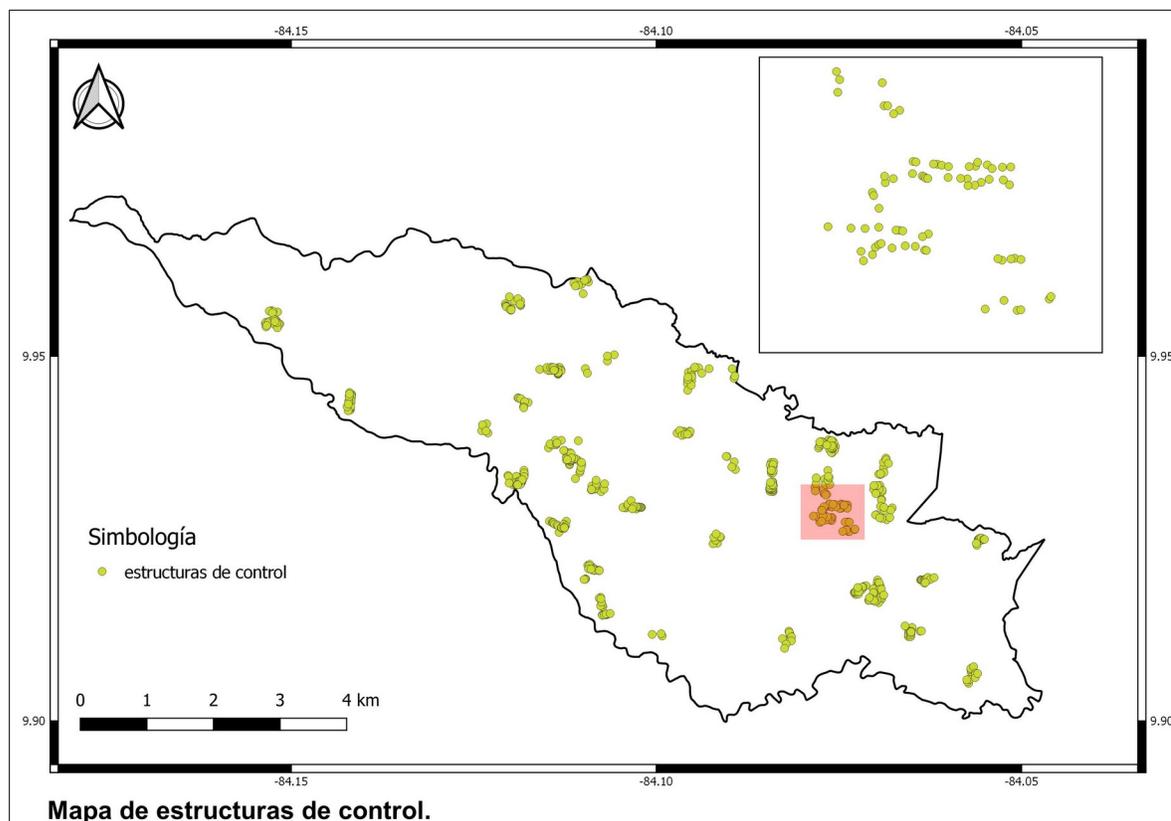
Cuadro 8: Margen de error e intervalos de confianza al 95 % para el modelo a nivel de cantón, utilizando áreas construidas totales.

Encuestas remotas (n=7 296), utilizando área construida				
Clase constructiva	Proporción de muestra \hat{p}	Margen de error (n.c.=95%)	Intervalo de confianza	
			Límite inferior	Límite superior
MCR.2	38.7%	1.12%	37.5%	39.8%
MCR.1	24.8%	0.99%	23.8%	25.8%
CR.D.C	6.9%	0.58%	6.3%	7.5%
CR.D.B	3.5%	0.42%	3.1%	3.9%
CR.W.A	3.3%	0.41%	2.9%	3.7%
CR.F.A	2.8%	0.38%	2.4%	3.1%
CR.D.A	2.5%	0.36%	2.2%	2.9%
S.F.C.A	2.5%	0.36%	2.2%	2.9%
CR.I.A	2.4%	0.35%	2.1%	2.8%
W.W.A	2.4%	0.35%	2.1%	2.8%
S.Wh.1	2.3%	0.34%	2.0%	2.7%
S.F.H.A	2.2%	0.34%	1.9%	2.6%
MCF.2	1.9%	0.32%	1.6%	2.2%
MCF.1	0.9%	0.22%	0.7%	1.2%
CR.F.C	0.8%	0.20%	0.6%	1.0%
CR.F.B	0.8%	0.20%	0.6%	1.0%
CR.W.B	0.7%	0.19%	0.5%	0.9%
CR.W.C	0.4%	0.15%	0.3%	0.5%
INFOR	0.1%	0.07%	0.0%	0.2%
W.F.A	0.0%	0.02%	0.0%	0.0%
	Máximo	1.12%		

Como se previó, el margen de error es bajo, siendo el máximo de ellos de 1.1 %, obteniendo intervalos de confianza con rangos estrechos.

6.3.2 Precisión de las encuestas remotas

Se aplicaron encuestas presenciales (in situ) a 538 estructuras, llamadas estructuras de control, las cuales habían sido previamente encuestadas de manera remota. De esta manera, se pudieron comparar los tipos de encuestas para identificar y analizar las diferencias entre cada una. A continuación se muestra la ubicación de las estructuras de control.



Mapa 9: Ubicación de estructuras de control.

Como hallazgo más importante, se tiene que existe una diferencia en la clase asignada, utilizando los atributos según cada tipo de encuesta, de cerca del 25 % de la edificaciones comparadas (136 estructuras). Si asumimos que la verdad razonable corresponde a las clases asignadas según los atributos recolectados en encuestas presenciales, se tendría un grado de precisión para encuestas remotas del 75 %. Lo anterior es congruente con lo encontrado por Stone (2017) en su tesis doctoral, que correspondió a un nivel de precisión del 72 % para el método de extracción de características estructurales de edificaciones aplicando encuestas remotas a fotografías omnidireccionales.

Cabe resaltar que un nivel de precisión del 75 % es considerado aceptable sujeto a mejoras, en comparación con la precisión de otros métodos, por ejemplo, inspecciones visuales rápidas efectuadas por personal poco capacitado, con una precisión alrededor del 50 % (Stone, 2017). Estas podrían compararse en alguna medida con la información de los censos poblacionales o habitacionales, ya que se llevan a cabo por personal no capacitado en ingeniería estructural y con fines distintos para información recolectada.

Otra consideración sobre esto es la de incluir otros factores (e.g. costo, tiempo de aplicación, utilidad), adicionales al de la precisión, para evaluar la pertinencia o aplicabilidad de estos métodos. Stone (2017) se dio a la tarea de estimar, para cada método que estudió, una medida de efectividad, que contemplaba el costo de aplicar el método, su precisión y capacidad de capturar atributos importantes, de utilidad para los estudios de riesgo sísmico.

Bajo esta medida, la utilización de fotografías omnidireccionales tiene el primer lugar en efectividad, con un 84 %, por encima inclusive de la inspección estructural detallada efectuada a lo interno de la estructura. Esto debido a que las inspecciones estructurales son sumamente costosas, lo que implica una baja importante en efectividad, aún cuando su nivel de precisión es el más alto, cerca del 100 %.

Retomando el valor de diferencias en asignación de clases del 25 %, se vuelve pertinente el analizar con mayor detalle su origen, el cual se resume en la siguiente gráfica.

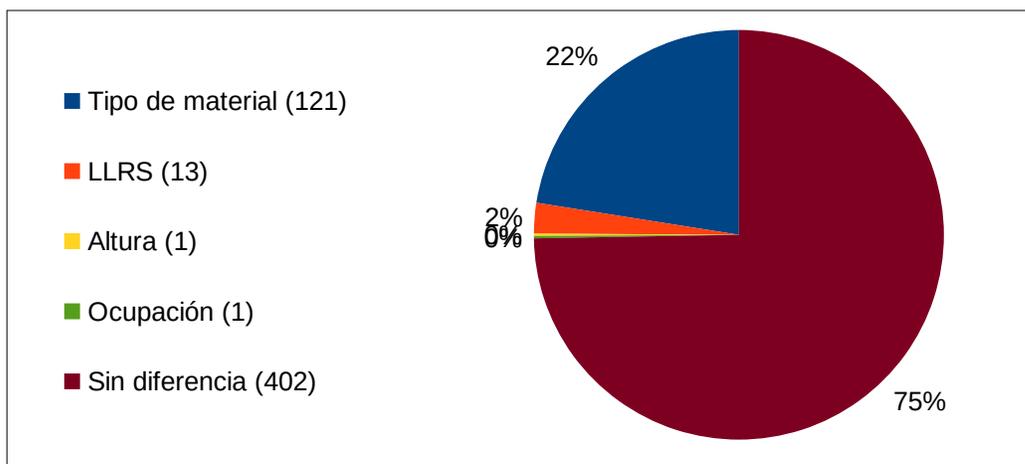


Figura 26: Diferencias entre asignación de clases por encuestas presenciales y remotas. Entre paréntesis se muestra la cantidad de edificaciones correspondiente a cada diferencia.

De la figura 26 se observa que la principal razón para una asignación de clases distinta entre encuestas presenciales y remotas es el tipo de material, representado un 22.5 % del total de diferencias (89 % del 25 % de diferencias). Estudiando más a fondo la naturaleza de estas diferencias, se obtiene el gráfico mostrado en la figura 27. De él, se concluye que del 22.5 % de las diferencias por tipo de material, un 14 % corresponde a los materiales de mampostería y concreto y un 8 % a los materiales de acero y madera.

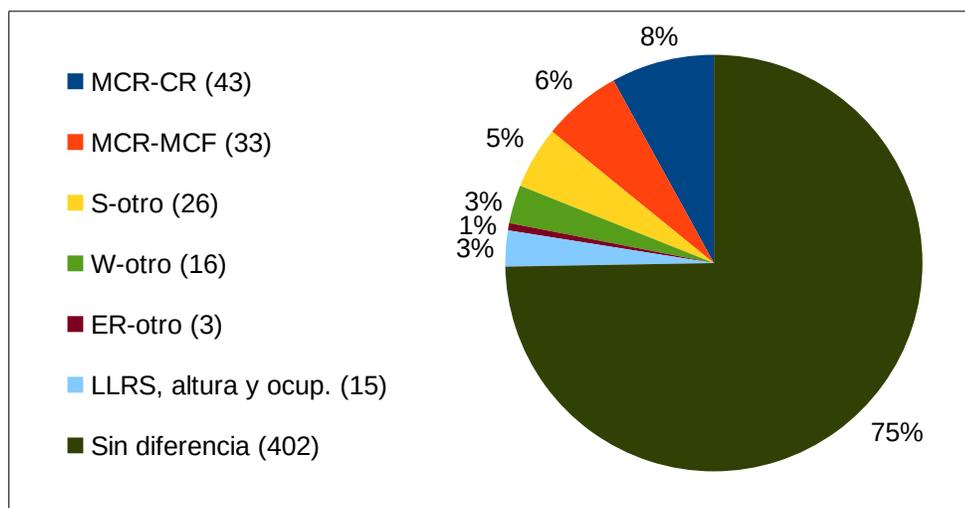


Figura 27: Diferencias entre asignación de clases detallando las debidas al tipo de material. Entre paréntesis se muestra la cantidad de edificaciones correspondiente a cada diferencia.

Estas diferencias se pueden deber a que los acabados de las edificaciones no permiten distinguir de manera correcta el material, utilizando solamente fotografías. También puede afectar la distancia a la que se tomaron las imágenes y su resolución, así como el nivel de capacitación del encuestador, especialmente sobre prácticas de construcción locales.

Para mejorar la precisión de la encuestas remotas se podría recomendar el mejorar la resolución de las fotografías, disminuir la distancia desde la cual se capturan las imágenes, proporcionar una capacitación aún mayor, más especializada, al personal encuestador, así como un control cruzado de asignación del material por medios remotos con información obtenida de otras fuentes, por ejemplo historia del barrio donde se encuentra la edificación.

También, sería sumamente valioso el poder integrar el nivel de precisión calculado para este inventario en las valoraciones de riesgo sísmico del cantón de San José que se hagan a futuro y que incluyan como insumo este inventario.

Una manera de hacer esto sería por medio de un cálculo de riesgo determinista (impacto), en donde se haga la estimación de pérdidas utilizando el inventario tal cual y otra utilizando el inventario “modificado”. Esta modificación consistiría en cambiar los tipos de material según los porcentajes mostrados en la figura 27, utilizando una distribución espacial al azar, para poder medir los efectos en la estimación de pérdidas.

6.3.3 Optimización del tamaño de muestra

Una vez obtenido el inventario, se realizó un análisis para determinar cuál habría sido el tamaño óptimo de muestra. Esto se logró reduciendo el tamaño de muestra progresivamente para encontrar cuándo se obtenía una diferencia total significativa con el modelo original, con tamaño de muestra de 7 296 edificaciones. Esta diferencia total es igual a la suma de las diferencias entre clases en valor absoluto, a continuación se muestra el gráfico que resume los resultados.

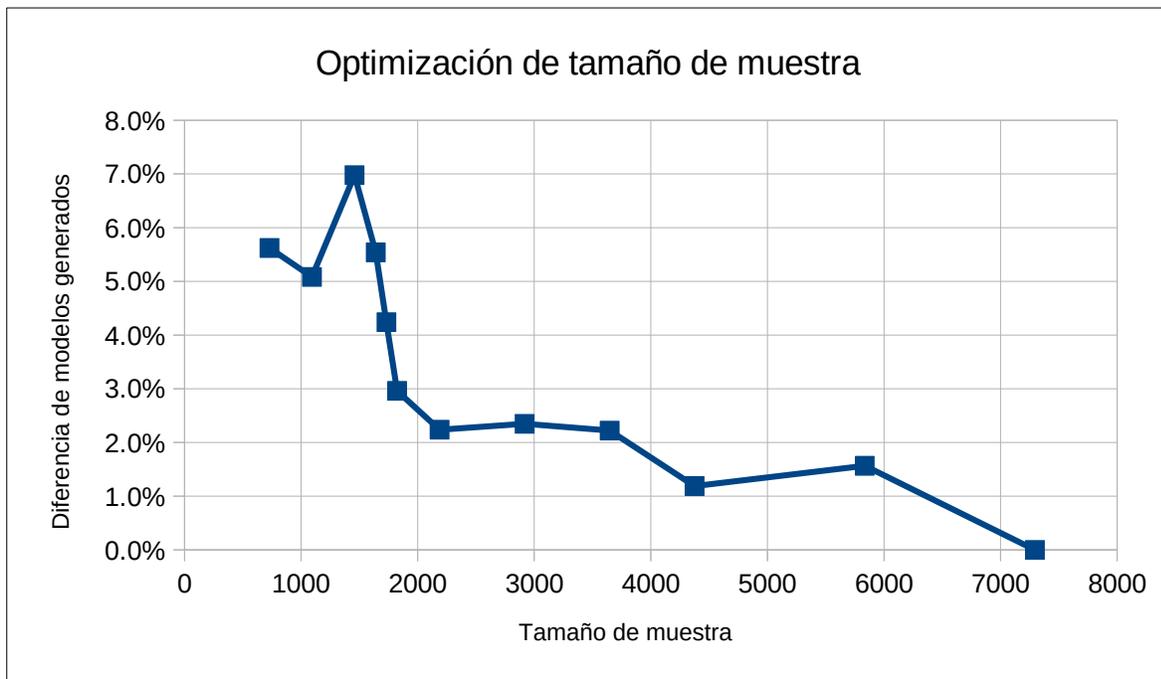


Figura 28: Optimización de tamaño de muestra.

En la figura 28 se muestra en el eje de las abscisas la variación del tamaño de muestra y en el eje de las ordenadas la diferencia entre los modelos generados para cada tamaño de muestra versus el modelo tomado como verdadero o real, con tamaño de muestra de 7 296. Se puede observar que la diferencia se mantiene por debajo del 1.5 % para tamaños de muestra mayores a 4 000

edificaciones, por debajo del 2.5 % para tamaños de muestra mayores a 2 000 y luego comienza a aumentar con una pendiente muy pronunciada. Consecuentemente, una propuesta del tamaño óptimo de muestra sería de aproximadamente 2 200 estructuras, representando un 2.6 % de la población para una diferencia con el modelo verdadero del 2.2 %.

Se considera oportuno analizar el margen de error y los intervalos de confianza asociados a los tamaños de muestra original (7 296) y óptimo propuesto (2 200), para asegurar que el efecto de reducir la muestra a 2 200 estructuras no implique un aumento inaceptable del error de muestreo, medido por medio del margen de error. Esto se realizó para las proporciones o distribuciones de clases constructivas en función de la cantidad de edificaciones (ver cuadro 9), que fue como se llegó a la propuesta de tamaño óptimo de muestra mencionado anteriormente.

Cuadro 9: Margen de error e intervalos de confianza al 95 % para muestra original (en gris) y muestra óptima propuesta.

Encuestas remotas, utilizando cantidad de edificaciones								
Clase constructiva	Para n = 7 296		Para n = 2 188		Para n = 7 296		Para n = 2 188	
	Prop. de muestra	Margen de error (n.c.=95%)	Prop. de muestra	Margen de error (n.c.=95%)	Intervalo de confianza (n.c.=95%)		Intervalo de confianza (n.c.=95%)	
	\hat{p}		\hat{p}		Límite inferior	Límite superior	Límite inferior	Límite superior
MCR.1	44.4%	1.14%	44.5%	2.08%	43.3%	45.6%	42.4%	46.6%
MCR.2	39.4%	1.12%	39.5%	2.05%	38.3%	40.5%	37.5%	41.6%
W.W.A	5.8%	0.54%	6.1%	1.00%	5.3%	6.3%	5.1%	7.1%
S.F.C.A	1.7%	0.29%	2.1%	0.59%	1.4%	2.0%	1.5%	2.7%
CR.W.A	1.4%	0.27%	1.2%	0.46%	1.1%	1.7%	0.8%	1.7%
MCF.1	1.4%	0.27%	1.1%	0.43%	1.1%	1.6%	0.6%	1.5%
S.Wh.1	1.2%	0.25%	1.2%	0.45%	0.9%	1.4%	0.7%	1.6%
MCF.2	0.9%	0.22%	0.7%	0.36%	0.7%	1.1%	0.4%	1.1%
CR.I.A	0.8%	0.20%	0.7%	0.36%	0.6%	1.0%	0.4%	1.1%
CR.D.A	0.8%	0.20%	0.7%	0.35%	0.6%	1.0%	0.3%	1.0%
CR.F.A	0.7%	0.19%	0.6%	0.33%	0.5%	0.9%	0.3%	1.0%
S.F.H.A	0.6%	0.18%	0.8%	0.37%	0.5%	0.8%	0.4%	1.1%
INFOR	0.5%	0.16%	0.4%	0.25%	0.3%	0.6%	0.1%	0.6%
CR.D.B	0.2%	0.09%	0.1%	0.13%	0.1%	0.3%	0.0%	0.2%
CR.D.C	0.1%	0.08%	0.2%	0.18%	0.0%	0.2%	0.0%	0.4%
CR.F.B	0.1%	0.05%	0.0%	0.09%	0.0%	0.1%	0.0%	0.1%
CR.W.B	0.0%	0.04%	0.0%	0.09%	0.0%	0.1%	0.0%	0.1%
CR.W.C	0.0%	0.03%	0.0%	0.09%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%
CR.F.C	0.0%	0.03%	0.0%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
W.F.A	0.0%	0.03%	0.0%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	Máximo	1.14%	Máximo	2.08%				

Del cuadro anterior, es claro que el aumento en el margen de error máximo es bajo y por lo tanto aceptable, pasando de un 1.1 % para 7 296 estructuras a un 2.1 % para aproximadamente 2 200. Además, a excepción de tres casos, los intervalos de confianza del tamaño de muestra óptimo

propuesto contienen a los de la muestra original (en gris), asegurándose así el capturar su promedio. Las excepciones: clase S.F.C.A límite inferior, clase MCF.1 límite superior, CR.D.B límite superior, no cumplen por 0.1 %.

Tomando en cuenta lo anterior, se concluye que el tamaño óptimo de muestra para la población de edificaciones del cantón de San José es de 2 200.

6.3.4 Comparación con modelos anteriores

La comparación con modelos anteriores debe realizarse con cuidado debido a que cada uno se generó siguiendo distintos criterios, por ejemplo límites espaciales, número de tipologías o portafolios específicos. Por ejemplo, el modelo generado por Cardona et al. (2009c), llamado aquí CAPRA-2009, no se incluye en la comparación debido a que los datos desagregados se muestran a nivel de provincia, imposibilitando una comparación a nivel de cantón o distrito.

A continuación se muestra un cuadro comparativo para la cantidad total de edificaciones y el área construida. Para ello, se muestran también las diferencias a nivel espacial, de portafolios abarcados y la cantidad de tipologías definidas, con el fin de establecer tres casos diferentes para el rubro de cantidad de edificaciones y así lograr ajustar el inventario generado en este estudio a las condiciones de los modelos anteriores para lograr una comparación válida. Entre paréntesis se muestra la diferencia, seguido del porcentaje que esta representa.

Para el inventario generado en este trabajo, al área construida total se obtiene al hacer una extrapolación lineal a partir del área construida de la muestra ($2.65 \times 10^6 \text{ m}^2$). La cantidad de edificaciones del portafolio residencial se obtiene al multiplicar el porcentaje de edificaciones residenciales de la muestra por el total de edificaciones del cantón.

Cuadro 10: Comparación de cantidad total de edificaciones y área construida con modelos anteriores.

	Este estudio	PREPARE-2016	Calderón-2016	ERN-2014
Nivel espacial	Cantón de San José (SJ)	Cantón de SJ	Nacional, desagregado a distrito. Se extrae solo cantón de SJ.	Cinco distritos: Catedral, El Carmen, Hospital, Merced y Mata Redonda
Portafolios	Todos	Todos	Residencial	Residencial, Gubernamental, Salud, Educación
continúa en la siguiente página				

Cantidad de tipologías constructivas	20	15	10	8
Edificaciones, todo el cantón, todos los portafolios	84 004 (1 796, 2.1%)	85 800	—	—
Edificaciones, todo el cantón, portafolio residencial	63919 (8 777, 13.7%)	—	72 696	—
Edificaciones, cinco distritos, cuatro portafolios	17 753 (2 273, 11%)	—	—	20 026
Área construida (x10⁶ m²)	30.5 (3.6, 11.8%)	26.9	—	—

En el cuadro 10 se aprecia que la menor y mayor diferencia entre cantidad total de edificaciones de este estudio con trabajos anteriores es del 2 %, con respecto a PREPARE-2016, y del 14 % con Calderón-2016, respectivamente. Lo anterior se podría deber a que el nivel espacial del modelo Calderón-2016 es nacional y se extrajo la información para el cantón de San José, así como el hecho de que ese modelo se construyó a partir de datos censales mayoritariamente, previéndose una mayor incertidumbre a nivel de cantón. Por otro lado, el modelo PREPARE-2016 tiene un nivel espacial de cantón, utilizó medios estadísticos y una muestra pequeña de encuestas presenciales para desarrollar su modelo, por lo cual es razonable que se acerca más a este estudio.

Con respecto al área total construida, la discrepancia con el modelo PREPARE-2016 es del 12 % (3.6 x10⁶ m²), haciendo pensar que existen desajustes en los datos de huella y/o número de pisos entre ambos modelos. Esto debido a que la diferencia en cantidad de edificaciones es de 1 796, lo cual implica que cada una de estas debería tener un área construida de 2 000 m², algo poco probable para tantas edificaciones.

La comparación de la distribución de las clases de edificaciones, también llamadas tipologías, es más complejo debido a que los modelos utilizan distintas clases, aunado a las diferencias mencionadas en los párrafos anteriores. Debido a que en el informe del modelo ERN-2014 no se

suministran datos de frecuencia de edificaciones en función de las tipologías, sino solamente en función de los portafolios, no se incluye la comparación de distribución de clases con este modelo.

A continuación se muestra el cuadro comparativo de distribución de clases entre el modelo generado en este estudio y el de PREPARE-2016. Se utilizó el parámetro de área construida para efectuar la comparación y se definieron seis clases agrupadas equivalentes para ambos estudios., en todos los casos se utilizó el promedio de las proporciones, debido a que ambos modelos las estimaron como un rango de valores posibles por medio de intervalos de confianza.

Cuadro 11: Comparación de distribución de clases con PREPARE-2016.

Clases agrupadas	Este estudio	PREPARE-2016	Diferencia
Mampostería	66.3%	69.0%	2.7%
CR marco o dual	19.7%	18.0%	1.7%
CR muro	4.4%	0.0%	4.4%
Acero estructural	4.5%	2.0%	2.5%
ALF o madera	5.0%	8.0%	3.0%
Informal	0.1%	3.0%	2.9%
TOTAL	100.0%	100.0%	17.2%

CR: concreto reforzado

ALF: acero laminado en frío

De este cuadro, se aprecia que las diferencias son bajas, siendo la más alta de 4.4 % para las estructuras de concreto reforzado con LLRS tipo muro. La clase informal también muestra una diferencia importante, que podría deberse a que se considera como construcción informal para cada modelo. También pudo afectar el acceso restringido a barrios marginales peligrosos al momento de tomar las fotografía panorámicas.

Un aspecto importante a comparar es el margen de error más alto reportado para las proporciones de clases constructivas estimadas para la población de edificaciones de ambos modelos. PREPARE-2016 reporta, en un memorandum al final de Miyamoto Internacional Inc. (2016b), un margen de error máximo del 4.1 %, mientras en este estudio es del 1.1 %. Lo anterior se debe a que la muestra utilizada para este estudio es significativamente mayor (una 10 veces) que la de PREPARE-2016.

En el caso de la comparación con el modelo de Calderón-2016, se tienen mayores diferencias, como se muestra en el cuadro 12. La mayor de ellas se tiene en las clases de mampostería y madera, sugiriendo que alguno de los dos modelos podría estar incluyendo un número importante de estructuras que realmente son de mampostería como madera, o viceversa.

Cuadro 12: Comparación de distribución de clases con Calderón-2016.

Clases agrupadas	Este estudio	Calderón-2016	Diferencia
Mampostería	89.7%	73.3%	16.4%
Concreto reforzado	1.9%	5.2%	3.3%
Acero	0.8%	0.0%	0.8%
Madera	7.0%	16.6%	9.6%
Informal	0.6%	4.9%	4.3%
TOTAL	100.0%	100.0%	34.3%

De nuevo las edificaciones informales tienen un mayor porcentaje en el modelo comparado con respecto al modelo de este estudio. Las razones podrían ser las mismas que las señaladas para PREPARE-2016. Al igual que para la cantidad total de edificaciones, otro origen de las diferencias, mucho mayores con el modelo Calderón-2016 que con respecto al modelo PREPARE-2016, es el nivel espacial y la metodología seguida para generar los modelos. El modelo Calderón-2016 es a nivel de país y se extrajo la información referente al cantón de San José, además se construyó mayoritariamente en base a información existente de censos poblacionales y habitacionales, presentado las dificultades señaladas anteriormente, cuando se discutió sobre la cantidad total de edificaciones.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

1. El cantón de San José cuenta con un total de 84 004 estructuras. En este número se incluyen los 196 barrios, se estimó a partir de la capa de huellas constructivas facilitada por la Municipalidad de San José, la cual se modificó para realizar correcciones a diversos polígonos e incluir las huellas del barrio La Carpio.
2. Se trabajó una muestra de 7 296 edificaciones, correspondiente al 8.7 % de la población de estructuras. El área construida para la muestra es de $2.65 \times 10^6 \text{ m}^2$. Haciendo una extrapolación lineal para la población, esta tendría un área construida de $30.5 \times 10^6 \text{ m}^2$.
3. El inventario de edificaciones puede representarse por medio de la cantidad de estructuras o el área construida. En este trabajo se obtienen resultados para ambos casos, pero se le da mayor importancia a los correspondientes al área construida. Por esto, a menos que se indique lo contrario, los datos que se presentan se refieren a este factor. Lo anterior debido a que captura mejor el impacto de estructuras de gran área, por ejemplo edificios altos o edificios de pocos pisos pero mucha huella, que podrían albergar una cantidad de residentes importante y representar pérdidas potenciales significativas.
4. El tipo de material y sistema resistente a cargas laterales (LLRS) predominantes es la mampostería confinada reforzada -MCR- con un 64 % y tipo muro -LWAL- con un 70 %, respectivamente. Están seguidos por los materiales de concreto reforzado -CR- (24 %) y el acero -S- (7 %), así como los LLRS del tipo dual -LDUAL- (14 %) y marco -LFM- (10 %).
5. Las diferencias entre los porcentajes presentados en la conclusión anterior aumentan considerablemente para el caso de cantidad de estructuras, así como el orden de importancia de los materiales y LLRS. Por ejemplo, los dos materiales predominantes son MCR con 83 % seguido de la madera -W- con 5 %. Aquí cambió el segundo material en importancia y la diferencia paso de un 40 % a 78 %.

6. La conclusión 5 evidencia que el tomar la cantidad de estructuras de manera exclusiva para generar el inventario podría dejar de capturar ciertos aspectos relevantes para el mismo.
7. Las estructuras de 1 o 2 pisos son ampliamente predominantes, representado un 75 % del total, seguidas de las 3 pisos, con un 6 %. Un 58 % de la edificaciones son regulares, dejando un 42 % de estructuras a las cuales se les identificó algún tipo de irregularidad estructural. Las tres irregularidades estructurales más frecuentes son excentricidad torsional -TOR- (22 %), cambio del LLRS en altura -CHV- (7 %) y entrantes o “setbacks” en inglés -SET- (5%).
8. Con respecto al tipo de ocupación, se tiene que un 48 % corresponde a residencial y un 34 % a comercial. Le siguen los usos mixto, industrial y gobierno, con 5 %, 3 % y 3 % respectivamente. El restante 7 % se divide en otros siete tipos de ocupación.
9. El realizar revisiones de coherencia de los datos de manera periódica probó ser una herramienta útil para depurar la base de datos. Varios de los errores encontrados fueron descuidos por parte de los encuestadores, mientras otros eran errores de interpretación o concepto que necesitaron de explicación por parte de los supervisores.
10. Se definieron 20 clases o tipologías estructurales descritas por medio de la taxonomía de GEM, tomando en cuenta siete tipos de atributos, cuyo peso se muestra entre paréntesis: tipo de material (0.30), tipo de LLRS (0.25), número de pisos (restricción), tecnología del material (0.15), tipo de ocupación (0.15), tipo de entrepiso (0.075) y regularidad estructural (0.075). Se tienen cuatro clases con tipo de material mampostería, 10 clases para el concreto reforzado, tres clases para el acero, dos para la madera y una clase para edificaciones informales. Con 11 tipologías, se cubre el 92.1 % del total de edificaciones estudiadas.
11. La clase MCR.2, de material mampostería confinada reforzada, LLRS tipo muro de 2 o más pisos, representa el 38.7 % de las edificaciones, seguida de MCR.1 (1 piso), con un 24.8 %. La siguiente clase en importancia es la CR.D.C, de material concreto reforzado, LLRS tipo dual de 11 o más pisos, con un 6.9 %.
12. Se definieron cinco clases o tipologías agrupadas en función del material, con el fin de facilitar la visualización de resultados a nivel de distrito y de barrio, a saber: mampostería, concreto

reforzado, acero, madera e informal, representando 66.3 %, 24.1 %, 7.1 %, 2.4 % y 0.1 %, respectivamente.

13. A nivel distrital, la tipología de mampostería continúa siendo predominante para los 11 distritos. Sin embargo, se encontró que Catedral, Hospital, Merced y Zapote concentran las estructuras de madera, mientras que El Carmen y Mata Redonda las de concreto reforzado y Uruca las edificaciones informales.
14. La concentración de edificaciones de madera en los distritos mencionado se podría deber, según el Ing. Álvaro Poveda Vargas, a medidas constructivas adoptadas luego del terremoto de Cartago de 1910. La mayor de estas sería la prohibición de construir con adobe, calicanto y piedra, emitida el 12 de setiembre de 1910 por el presidente de ese entonces, Don Ricardo Jiménez (Castro, 2017). Evidencia de esto lo expone Malavassi-Aguilar (2013) en su estudio sobre los “barrios del Sur” de San José y las viviendas de madera. La autora explica que a raíz de este terremoto, se suscitan migraciones internas hacia estos barrios, construyendo sus viviendas predominantemente en madera.
15. A nivel de barrio, la mampostería no es predominante para los 196 barrios. Si se asume que un material es predominante cuando el 60 % o más de sus edificaciones están fabricadas con este, se tiene que en 11 barrios el material predominante es el concreto reforzado, en 4 el acero, mientras en 4 barrios las estructuras de maderas constituyen entre un 20 % a 40 % del total de sus edificaciones.
16. Se encontró que la diferencia en la clase o tipología estructural asignada entre encuestas presenciales y remotas, aplicadas a 538 edificaciones llamadas “estructuras de control”, es de un 25 % (136 estructuras). Si asumimos que la verdad razonable corresponde a las clases asignadas según los atributos recolectados en encuestas presenciales, se tendría un grado de precisión para encuestas remotas del 75 %. Esto es congruente con lo encontrado por Stone (2017) en su tesis doctoral, que correspondió a un nivel de precisión del 72 % para el método de extracción de características estructurales de edificaciones aplicando encuestas remotas a fotografías omnidireccionales.
17. Cabe resaltar que un nivel de precisión del 75 % es considerado aceptable sujeto a mejoras, en comparación con la precisión de otros métodos, por ejemplo, de cerca del 50 % para

inspecciones visuales rápidas efectuadas por personal poco capacitado (Stone, 2017). Estas podrían compararse en alguna medida con la información de los censos poblacionales o habitacionales, ya que se llevan a cabo por personal no capacitado en ingeniería estructural y con fines distintos para información recolectada.

18. Del 25 % de diferencia entre las encuestas presenciales y remotas, el 22.5 % (121) corresponde a diferencias en el tipo de material identificado, el 2.4 % (13) a diferencias en el LLRS y el 0.4 % (2) a diferencias en número de pisos y ocupación. Del 22.5 % de diferencias por tipo de material, 14 % corresponde a los materiales de mampostería y concreto reforzado, el 8 % corresponde a acero y madera y el 0.5 % a materiales que utilizan tierra. Estas diferencias se pueden deber a que los acabados de las edificaciones no permitieran distinguir de manera correcta el material, utilizando solamente fotografías. También puede afectar la distancia a la que se tomaron las imágenes y su resolución, así como el nivel de capacitación del encuestador, especialmente sobre prácticas de construcción locales.
19. En las dos conclusiones anteriores se refleja la importancia de determinar con certeza un atributo estructural que muchas veces se piensa es muy sencillo de identificar, el tipo de material. Lo anterior aumentaría el nivel de precisión del inventario generado de forma considerable.
20. Se determinó que el tamaño de muestra óptimo es de 2 200 edificaciones, representado un 2.6 % de la población de estructuras. La diferencia esperada en la asignación de clases al utilizar el tamaño de muestra óptimo en lugar del original sería solamente del 2.2 %. Además, se tiene un 95 % de confianza de que el margen de error para la proporción correspondiente a la clase MCR.2 con el tamaño original es a lo sumo del 1.1 %, mientras que para el tamaño óptimo propuesto es del 2.0 %, lo cual se considera satisfactorio.
21. La conclusión anterior supone una reducción del 70 % del tamaño de muestra utilizado en este estudio, traduciéndose en una reducción del tiempo efectivo de aplicación de encuestas, con la misma cantidad de asistentes, de 14 meses a 4.5 meses.
22. La menor y mayor diferencia entre cantidad total de edificaciones de este estudio con trabajos anteriores es del 2 %, con respecto al modelo denominado PREPARE-2016, y del 14 % con el modelo denominado Calderón-2016, respectivamente. Lo anterior se podría deber a que el

nivel espacial del modelo Calderón-2016 es nacional y se extrajo la información para el cantón de San José, así como el hecho de que ese modelo se construyó a partir de datos censales mayoritariamente, previéndose una mayor incertidumbre a nivel de cantón. Por otro lado, el modelo PREPARE-2016 tiene un nivel espacial de cantón, utilizó medios estadísticos y una muestra pequeña de encuestas presenciales para desarrollar su modelo, por lo cual es razonable que se acerca más a este estudio.

23. Con respecto al área total construida, la discrepancia con el modelo PREPARE-2016 es del 12 % ($3.6 \times 10^6 \text{ m}^2$), haciendo pensar que existen desajustes en los datos de huella y/o número de pisos entre ambos modelos. Esto debido a que la diferencia en cantidad de edificaciones es de 1 796, lo cual implica que cada una de estas debería tener un área construida de 2 000 m^2 , algo poco probable para tantas edificaciones.
24. Las diferencias para la distribución de clases agrupadas definidas para la comparación con PREPARE-2016 es baja, siendo la más alta de 4.4 % para las estructuras de concreto reforzado con LLRS tipo muro. La clase informal también muestra una diferencia importante (2.9 %), que podría deberse a qué se considera como construcción informal para cada modelo. También pudo afectar el acceso restringido a barrios marginales peligrosos al momento de tomar las fotografía panorámicas.
25. En el caso de la comparación con el modelo de Calderón-2016, se tienen mayores diferencias. La mayor de ellas se tiene en las clases de mampostería y madera (16.4 %), sugiriendo que alguno de los dos modelos podría estar incluyendo un número importante de estructuras que realmente son de mampostería como madera, o viceversa.
26. Una posible explicación a que las diferencias con el modelo PREPARE-2016 sean menores a las del modelo Calderón-2016 es que, el último se basa en información de censos principalmente para la generación del modelo. Además, el mismo tiene un nivel espacial de país, con una unidad mínima de distrito, por lo que era de esperar que las diferencias fueran mayores a las de PREPARE-2016, el cual se realizó a nivel de cantón.

7.2 Recomendaciones

1. Automatizar, por medio de un script en Python por ejemplo, las revisiones de coherencia de datos, para poder realizarlas más frecuentemente, ya que probó ser una excelente herramienta para depurar la base de datos e identificar errores de interpretación o conceptuales por parte de los encuestadores.
2. Valorar el disminuir el tamaño de la muestra a utilizar en la generación de otros inventarios según los resultados obtenidos, teniendo en consideración las diferencias entre las zonas de estudio. Esto junto con el aumento de las horas asistente, haría que el tiempo total dedicado a la caracterización remota de la edificaciones se reduzca drásticamente sin sacrificar la precisión.
3. Valorar que los encuestadores sean ingenieros estructurales locales de experiencia. El haber reducido el tamaño de muestra podría volver factible esta opción.
4. Comparar la información recolectada remotamente con encuestas presenciales, para poder estimar la precisión de las encuestas remotas realizadas.
5. Mejorar la precisión de la encuestas remotas por medio del aumento de la resolución de las fotografías, disminuir la distancia desde la cual se toma capturan las imágenes, proporcionar una capacitación aún mayor, más especializada, al personal encuestador, así como un control cruzado de asignación del material por medios remotos con información obtenida de otras fuentes, por ejemplo historia del barrio donde se encuentra la edificación.
6. Estructurar un taller de capacitación para asistentes, donde se inviten profesores de la Escuela de Ingeniería Civil para impartir charlas sobre LLRS, materiales, métodos constructivos y tipos de edificaciones comunes en Costa Rica. Deberán tener un componente importante de cómo poder identificarlos desde “la acera”.
7. Efectuar un análisis de sensibilidad con respecto a la asignación de pesos para los atributos a utilizar en la generación del esquema de clases, con el objetivo de lograr reducir el peso de los atributos que se comprobaron es más difícil identificar de manera remota.
8. Integrar el nivel de precisión calculado para este inventario en las valoraciones de riesgo sísmico del cantón de San José que se hagan a futuro y que incluyan como insumo este

inventario. Una manera de hacer esto sería por medio de un cálculo de riesgo determinista (impacto), en donde se haga la estimación de pérdidas utilizando el inventario tal cual y otra utilizando el inventario “modificado”. Esta modificación consistiría en cambiar los tipos de material según los porcentajes mostrados en la figura 27, utilizando una distribución espacial al azar, para poder medir los efectos en la estimación de pérdidas.

9. Incluir las fechas, aunque sean aproximadas, de construcción de las edificaciones. Con esto se podría asociar una versión del Código Sísmico a la edificación (asumiendo que fue construida siguiendo el código) y una consecuente ductilidad al LLRS, que podría afectar las curvas de fragilidad y por lo tanto el cálculo del riesgo. Se podría implementar por medio de un análisis del crecimiento de la mancha urbana o por medio de otras fuentes como documentos históricos, instituciones pertinentes (e.g. Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo) o criterio de experto.
10. Estimar las diferencias con el modelo PREPARE-2016 a nivel de barrio y, si es posible, aplicar el método de asignación de clases por medio de puntajes con números difusos a las estructuras encuestadas presencialmente en PREPARE-2016, para que la cuantificación de diferencias sea directa. Con esto se espera evaluar de mejor formas ambas metodologías para asegurar que producen o no los mismos resultados.
11. Investigar acerca de la auto-correlación espacial y otros parámetros de análisis exploratorio de datos espaciales para la zona de estudio de este trabajo, con el fin de que se utilicen como indicadores de la posibilidad de generalización de resultados hacia otras zonas geográficas.
12. Comparar mapas de atributos extraídos de las encuestas remotas, por ejemplo del tipo de material, con mapas de indicadores socio-económicos, por ejemplo nivel de ingresos, para explorar y establecer relaciones entre estos.
13. Coordinar la toma de fotografías panorámicas con instituciones como las municipalidad respectivas, comités cantonales o fuerza pública, con el fin de poder visitar los barrios menos seguros y poder asegurar su completa integración en los inventarios de edificaciones, y por lo tanto en el cálculo del riesgo sísmico.

REFERENCIAS

- Alvarado, G. E., Benito, B., Staller, A., Climent, Á., Camacho, E., Rojas, W., Marroquín, G., Molina, E., Talavera, J. E., Martínez-Cuevas, S., & Lindholm, C. (2017). The new Central American seismic hazard zonation: Mutual consensus based on up to day seismotectonic framework. *Tectonophysics*, 721(March), 462–476. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.10.013>
- Boundless. (2018). *PostGIS.net*. <http://workshops.boundlessgeo.com/postgis-intro/introduction.html>
- Brzev, S., Scawthorn, C., Charleson, A. W., Allen, L., Greene, M., Jaiswal, K., & Silva, V. (2013). GEM Building taxonomy version 2.0. *GEM Technical Report*, 188. <https://doi.org/doi:10.13117/GEM.EXP-MOD.TR2013.02>.
- Calderón, A. (2016). Probabilistic Earthquake Loss Assessment for Costa Rica. In *Masters Thesis*. Earthquake and Seismology Engineering. Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia.
- Calderón, A., & Silva, V. (2019). Probabilistic seismic vulnerability and loss assessment of the residential building stock in Costa Rica. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(3), 1257–1284. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0499-1>
- Calderón, E. (2018). *Curvas de fragilidad según el método del espectro de capacidad para tipologías estructurales definidas en el Código Sísmico de Costa Rica*. Universidad de Costa Rica.
- Cardona, O., Yamín, L., Bernal, G., Ordaz, M., Reinoso, E., Barbat, A., & Carreño, M. (2009a). T2-2 Recursos de información disponibles. *Informe de CAPRA Costa Rica*, 39. <https://www.ecapra.org/documentos/documentos-capra-costarica>
- Cardona, O., Yamín, L., Bernal, G., Ordaz, M., Reinoso, E., Barbat, A., & Carreño, M. (2009b). T2-3 Modelación probabilista de amenazas naturales. *Informe de CAPRA Costa Rica*, 93. <https://www.ecapra.org/documentos/documentos-capra-costarica>
- Cardona, O., Yamín, L., Bernal, G., Ordaz, M., Reinoso, E., Barbat, A., & Carreño, M. (2009c). T2-4 Inventario de elementos expuestos. *Informe de CAPRA Costa Rica*, 1–42. <https://www.ecapra.org/documentos/documentos-capra-costarica>

- Cardona, O., Yamín, L., Bernal, G., Ordaz, M., Reinoso, E., Barbat, A., & Carreño, M. (2009d). T2-5 Caracterización local de la vulnerabilidad de edificaciones. *Informe de CAPRA Costa Rica*, 1–66. <https://www.ecapra.org/documentos/documentos-capra-costa-rica>
- Castro, M. (2017). *Entre temblores y cemento*. Cambio Político. <https://cambiopolitico.com/entre-temblores-y-cemento/88801/>
- Climent, Á., Rojas, W., Alvarado, G. E., & Benito, B. (2008). Proyecto Resis II: Evaluación de la amenaza sísmica en Costa Rica. In *Red Sismológica Nacional, Universidad de Costa Rica, Instituto Costarricense de Electricidad, Universidad Politécnica de Madrid*.
- De Bono, A., & Chatenoux, B. (2014). A global exposure model for GAR15. *Global Assessment Report*, 1–20. <https://doi.org/10.1002/ejoc.201200111>
- De Bono, A., & Mora, M. G. (2014). A global exposure model for disaster risk assessment. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 10(PB), 442–451. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2014.05.008>
- Environmental Systems Research Institute. (2000). *Understanding Map Projections*.
- Environmental Systems Research Institute. (2012). *What is GIS?* (Vol. 113, Issue C, p. doi:10.1029/2008JB005610 ST-Deformation, seismi). <http://www.esri.com/what-is-gis/index.html>
- Evaluación de Riesgos Naturales y Antropogénicos. (2014). Valoración de la vulnerabilidad física y riesgo ante sismos en distritos clave del Cantón de San José. *ERN*, 153.
- Federal Emergency Management Agency. (2013). Hazus–MH 2.1: Technical Manual. *FEMA*, 718. www.fema.gov/plan/prevent/hazus
- Federal Emergency Management Agency. (2015). P-154 Rapid Visual Screening of buildings for potential seismic hazards: a handbook. *FEMA*, January, 388. <https://doi.org/10.4231/D3-M90238V>
- Gamba, P. (2014). GEM Global exposure database – scientific features. *GEM Technical Report*, 46. <https://doi.org/10.13117/GEM.EXP-MOD.TR2014.10>
- Ghesquiere, F., Prashant, Reid, R., Kellett, J., Shyam, K., & CampbellJack. (2012). The Sendai report. *GFDRR-World Bank*, 68. <http://documents.worldbank.org/curated/en/851321468339912993/pdf/806080WPOSend00Box379809B00PUBLIC0.pdf>
- Guha-Sapir, D. (2019). *EM-DAT: The Emergency Events Database*. Universidad Católica de Louvain - CRED. www.emdat.be
- Gunasekera, R., Ishizawa, O., Aubrecht, C., Blankespoor, B., Murray, S., Pomonis, A., & Daniell, J. (2015). Developing an adaptive global exposure model to support the generation of country

- disaster risk profiles. *Earth-Science Reviews*, 150, 594–608. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2015.08.012>
- INEC. (2013). *Instituto de Estadística y Censos (INEC): Resultados Generales del X Censo Nacional de Población y VI de Vivienda 2011*. 1432. http://www.cipacdh.org/pdf/Resultados_Generales_Censo_2011.pdf
- Jaiswal, K., Wald, D., & Porter, K. (2010). A global building inventory for earthquake loss estimation and risk management. *Earthquake Spectra*, 26(3), 731–748. <https://doi.org/10.1193/1.3450316>
- Japan Building Disaster Prevention Association. (2001). Seismic Evaluation of Existing Reinforced Concrete Buildings. *JBDPA*, 320.
- King, A. B., & Bell, R. (2006). Riskscape New Zealand - A Multihazard Loss Modelling Tool. 2006 *New Zealand Society of Earthquake Engineering Conference*, 9.
- Lohr, S. (2000). *Sampling: Design and Analysis* (M. Julet (ed.); 2da ed.). CENGAGE Learning. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Malavassi-Aguilar, R. (2013). Los “barrios del sur” del Cantón de San José, Costa Rica. Los corredores históricos y la vivienda de madera, 1910-1955. In M. Aguilar Bonilla & O. Niglio (Eds.), *La conservación del patrimonio en Costa Rica* (pp. 447–469).
- Mattew, N., & Stones, R. (2005). *Beginning databases with PostgreSQL* (J. Gilmore (ed.); 2nd ed.). Apress. <https://doi.org/10.1007/978-1-4302-0018-5>
- Miyamoto Internacional Inc. (2016a). Apéndice A: Datos suplementarios. *The USAID / OFDA PREPARE Program. Phase I.*, 1–143.
- Miyamoto Internacional Inc. (2016b). Appendix B: Building Exposure Model. *The USAID / OFDA PREPARE Program. Phase I.*, 28.
- Miyamoto Internacional Inc. (2016c). Assessment of Earthquakes Risks. *The USAID / OFDA PREPARE Program. Phase I., December*, 1–59.
- Montero, W. (1986). Períodos de recurrencia y tipos de secuencias sísmicas de los temblores interplaca e intraplaca en la región de Costa Rica. *Rev. Geol. Amér. Central*, 5, 35–72.
- Montero, W. (1999). El terremoto del 4 de marzo de 1924 (Ms 7,0): ¿ un gran temblor interplaca relacionado al límite incipiente entre la placa caribe y la microplaca de panamá? *Revista Geológica de América Central*, 22, 25–62.
- Montero, W. (2001). *Neotectónica De La Región Central De Costa Rica*. 29–56.

- Municipalidad de San José. (2016). Diagnóstico cantonal 2016. *Dirección de Planificación y Evaluación*, 236. [https://www.msj.go.cr/MSJ/Municipalidad/Lists/Diagnostico Cantonal/DispForm.aspx?ID=2&Source=https%3A%2F%2Fwww.msj.go.cr%2FMSJ%2FMunicipalidad%2FSitePages%2FSJC_diagnostico_cantonal.ASPX&ContentTypeld=0x0100455673D594F2D14DADEBA26-DA2A907DA](https://www.msj.go.cr/MSJ/Municipalidad/Lists/Diagnostico%20Cantonal/DispForm.aspx?ID=2&Source=https%3A%2F%2Fwww.msj.go.cr%2FMSJ%2FMunicipalidad%2FSitePages%2FSJC_diagnostico_cantonal.ASPX&ContentTypeld=0x0100455673D594F2D14DADEBA26-DA2A907DA)
- Nadimpalli, K., Edwards, M., & Mullaly, D. (2007). National Exposure Information System (Nexis) For Australia: Risk Assessment Opportunities. *Modsim 2007: International Congress on Modelling and Simulation: Land, Water and Environmental Management: Integrated Systems for Sustainability, October*, 1674–1680.
- Novelli, V. I., D’Ayala, D., Makhloufi, N., Benouar, D., & Zekagh, A. (2015). A procedure for the identification of the seismic vulnerability at territorial scale. Application to the Casbah of Algiers. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(1), 177–202. <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9666-1>
- Parolai, S. (2016). DB3 Guidelines of the mobile mapping system and remote rapid visual screening. *SIBYL Project Derivable*, 1–36.
- Pérez, F., & Granger, B. E. (2007). IPython: A system for interactive scientific computing. *Computing in Science and Engineering*, 9(3), 21–29. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.53>
- Pierre-Louis, K. (2017). *There’s actually no such thing as a natural disaster*. Popular Science. <https://doi.org/10.4324/9780203625460>
- Pittore, M. (2014). D3.5 Sampling framework. *SENSUM Project Derivable*, 1–72.
- Pittore, M., Grant, D., Parolai, S., Free, M., Mambetalyev, E., & Sheraliev, T. (2017). *Exposure and vulnerability assessment via the integration of remote and in situ information : case study of Kyrgyzstan*.
- Pittore, M., Haas, M., & Megalooikonomou, K. G. (2018). Risk-Oriented, Bottom-Up Modeling of Building Portfolios With Faceted Taxonomies. *Frontiers in Built Environment*, 4(October), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00041>
- Porter, K. (2019). A Beginner ’ s Guide to Fragility, Vulnerability, and Risk. *University of Colorado Boulder, 2019(November)*, 134. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-93837-0>
- Poveda, Á. (2018). *Comunicación personal, reunión en el LIS del 7 de marzo*.
- Protti, M., Gündel, F., & McNally, K. (1994). The geometry of the Wadati-Benioff zone under southern Central America and its tectonic significance: results from a high-resolution local seismographic network. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 84(1–4), 271–287. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(94\)90046-9](https://doi.org/10.1016/0031-9201(94)90046-9)

- R Core Team. (2014). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <http://www.r-project.org/>
- Rainer, J. H., Allen, D. E., & Jablonski, A. M. (1993). Manual for screening of buildings for seismic investigation. In *National Research Council Canada*. <https://doi.org/10.1007/s10815-014-0382-1>
- Rojas, W., Bungum, H., & Lindholm, C. (1993). Historical and recent earthquakes in Central America. *Revista Geológica de América Central*, *16*(1), 5–22.
- Rumsey, D. (2010). *Statistics essentials for dummies*. Wiley.
- Santa-María, H., Hube, M. A., Rivera, F., Yepes-Estrada, C., & Valcárcel, J. A. (2017). Development of national and local exposure models of residential structures in Chile. *Natural Hazards*, *86*, 55–79. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2518-3>
- Simpson, A., Murnane, R., Saito, K., Phillips, E., Reid, R., & Himmelfarb, A. (2014). Understanding risk. In *GFDRR-World Bank*. World Bank. <https://doi.org/10.1136/bmj.329.7474.1086>
- Stone, H. (2017). *Exposure and vulnerability for seismic risk evaluations* [University College London]. <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10051591>
- Taubenböck, H., Geib, C., & Klotz, M. (2013). D.2.1 Present day and future remote sensing data. *SENSUM Project Derivable*, 1–59.
- The PostgreSQL Global Development Group. (2017). *PostgreSQL 9.5.10*.
- UNISDR. (2009). 2009 UNISDR Terminology on disaster risk reduction. In *International Strategy for Disaster Reduction (ISDR)*. United Nations International Strategy for Disaster Reduction. <https://doi.org/978-600-6937-11-3>
- Wieland, M. (2013). D3.1 Storing database system. *SENSUM Project Derivable*, 1–24.
- Wieland, M., Pittore, M., Parolai, S., Begaliev, U., Yasunov, P., Tyagunov, S., Moldobekov, B., Saidiy, S., Ilyasov, I., & T, A. (2015). A Multiscale Exposure Model for Seismic Risk Assessment in Central Asia. *Seismological Research Letter*, *86*(1), 210–222. <https://doi.org/10.1785/0220140130>
- Wieland, M., Pittore, M., Parolai, S., Zschau, J., Moldobekov, B., & Begaliev, U. (2012). Estimating building inventory for rapid seismic vulnerability assessment : Towards an integrated approach based on multi-source imaging. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *36*, 70–83. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.01.003>
- Yepes-Estrada, C., Silva, V., Valcárcel, J., Acevedo, A. B., Tarque, N., Hube, M. A., Coronel, G., & María, H. S. (2017). Modeling the Residential Building Inventory in South America for Seismic Risk Assessment. *Earthquake Spectra*, *33*(1), 299–322. <https://doi.org/10.1193/101915EQS155DP>

APÉNDICES

A Detalle de la base de datos REM

El Rem db está compuesta por ocho esquemas (ver figura 29), los cuales agrupan las distintas tablas que conforman la base de datos, mostradas en el cuadro 13. Cada uno de los esquemas es descrito brevemente a continuación, incluyendo una explicación concisa de cada una de las tablas que lo componen, ordenadas en viñetas.

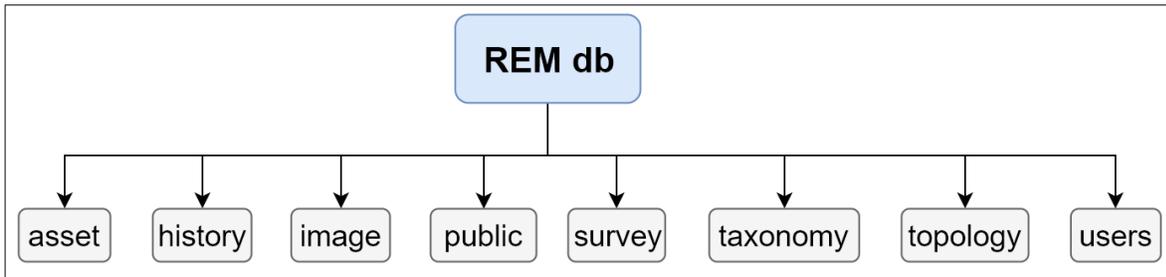


Figura 29: Esquemas que componen el REM db.

Cuadro 13: Tablas de cada esquema de la REM db.

Esquemas	assets	history	image	public
Tablas	object	logged_actions	img	barrios_wgs
	object_attribute		image_type	map_sample_bdgs
	object_attribute_qualifier		gps	paths
			gpano_metadata	proc_expo
				sample_buildings_wgs
			spatial_ref_sys	
Esquemas	survey	taxonomy	topology	users
Tablas	survey	dic_attribute_type	layer	roles
	survey_type	dic_attribute_value	topology	roles_users
		dic_hazard		tasks
		dic_qualifier_type		tasks_users
		dic_qualifier_value		users
		dic_taxonomy		

A.1 Esquema assets

Alberga la información asociada a cada estructura que compone la muestra de la población a encuestar, a las cuales se le denomina “objeto” en la REM db.

- i. `assets.object`: contiene la forma del polígono que demarca la huella de cada estructura, así como la fuente de la que se tomó esta forma geométrica.
- ii. `assets.object_attribute`: contiene los atributos o características de todas las estructuras (e.g. sistema sismorresistente, tipo de material, irregularidad estructural, altura, edad, etc.). Para las estructuras a las cuales no se ha completado el cuestionario del RRVS, se muestran los valores por defecto (de tipo desconocido, e.g. MAT99 – material desconocido).
- iii. `assets.object_attribute_qualifier`: contiene los índices de confianza asociados a la asignación de cada característica o atributo. En el formato actual de la REM db, estos datos no se utilizan por lo que contienen valores por defecto.

A.2 Esquema history

Contiene la información de los tiempos de transacción de cada proceso invocado en la REM db, manejando el componente de tiempo transaccional del esquema bi-temporal. En la versión actual de la REM db, este esquema no se utiliza.

- i. `history.logged_actions`: contiene los tiempos de transacción para cada proceso realizado en la REM db, junto con el esquema intervenido, usuario que ejecuta el cambio y el tipo de transacción.

A.3 Esquema image

Contiene la información de todas las imágenes tomadas en la fase de recolección de datos utilizando el sistema GFZ-MOMA.

- i. `image.img`: contiene el nombre de cada uno de las imágenes capturadas con el GFZ-MOMA, así como la hora de captura y el repositorio donde se encuentran almacenadas en el servidor.
- ii. `image.image_type`: contiene los tipos de imagen que maneja la REM db, imagen omnidireccional o simple. En este caso, todas las imágenes con que se trabaja son del tipo omnidireccional.
- iii. `image.gps`: contiene la información de la ubicación asociada a cada una de las imágenes almacenadas en el repositorio del servidor.

iv. `image.gpano_metadata`: contiene la información técnica de cada una de las imágenes capturadas (tipo de visualizador, software para la captura, ángulo de inclinación, tipo de proyección, etc.).

A.4 Esquema public

Este es un esquema que se genera por defecto a la hora de crear una base de datos en PostgreSQL. En el REM db se utiliza para albergar tablas propias de cada proyecto específico en donde se utilice esta base de datos.

i. `public.barrios_wgs`: contiene la información relacionada a los 196 barrios en que se divide el cantón de San José, como lo son sus nombres, distrito al que pertenecen y la geometría del polígono que los delimita.

ii. `public.map_sample_bdgs`: contiene la identificación de los edificios seleccionados para componer la muestra de la población de estructuras.

iii. `public.paths`: contiene la ruta seguida por GFZ-MOMA para la captura de imágenes.

iv. `public.proc_expo`: contiene la información de los atributos exclusivamente de las estructuras para las cuales se ha completado el cuestionario del RRVS (`rrvs_startus = COMPLETED`). Además, incluye una columna adicional llamada 'btype', la cual contiene el código de la tipología asignada a la estructura.

v. `public.sample_buildings_wgs`: contiene los polígonos que demarcan la huella de las estructuras que forman parte de la muestra, en el sistema de coordenadas WGS.

vi. `public.spatial_ref_sys`: contiene información acerca de los sistemas de referencia espacial utilizados.

A.5 Esquema survey

Alberga información general de la encuesta aplicada por medio del GFZ-MOMA.

i. `survey.survey`: contiene el nombre, la descripción, el tipo y los responsables de cada encuesta realizada.

ii. `survey.type`: contiene los tipos de encuesta, e.g. RRVS, RVS, IDCT, otros.

A.6 Esquema taxonomy

Contiene la información acerca de las taxonomías utilizadas para la caracterización de las estructuras. Las tablas de este esquema son llamadas diccionarios, deben pensarse como repositorios de los códigos utilizados en el cuestionario del RRVS y en la REM db en general.

- i. `taxonomy.dic_attribute_type`: contiene los códigos de los tipos de atributos, su descripción y la fuente (e.g. `MAT_TYPE`, tipo de material, `GEM20`).
- ii. `taxonomy.dic_attribute_value`: contiene los códigos y descripciones de todos los valores que pueden tomar cada uno de los tipos de atributos enlistados en la tabla `taxonomy.dic_attribute_type`. Por ejemplo, contiene los valores que se pueden asignar al tipo de material, como 'CR - concreto reforzado', 'S - acero', 'W - madera', entre otros.
- iii. `taxonomy.dic_hazzard`: contiene los códigos y descripciones del tipo de amenaza, así como la asignación del tipo de amenaza a la cual pertenecen cada uno de los tipos de atributos.
- iv. `taxonomy.dic_qualifier_type`: contiene los tipos de índices que maneja la REM db, a saber, de confianza, calidad, fuente y tiempo válido.
- v. `taxonomy.dic_qualifier_value`: contiene los valores que pueden tomar cada uno de los tipos de índices.
- vi. `taxonomy.dic_taxonomy`: contiene las distintas taxonomías con las que se pueden caracterizar y/o clasificar las estructuras.

A.7 Esquema topology

Contiene la información relacionada con la topología de la REM db, es decir, las relaciones espaciales entre características cercanas o adyacentes.

- i. `topology.layer`: contiene información de la tipología por capa, esquema y tabla.
- ii. `topology.topology`: contiene los tipos de topologías utilizados.

A.8 Esquema users

Alberga la información correspondiente de los roles, usuarios y tareas.

- i. `users.roles`: contiene los tipos de roles que cada usuario puede tener.
- ii. `users.roles_users`: contiene los roles asignados a cada uno de ellos.
- iii. `users.tasks`: contiene la totalidad de las tareas, las cuales consisten en grupos de objetos de la muestra y las imágenes correspondientes a estos objetos.
- iv. `users.tasks_users`: contiene las tareas asignadas a cada usuario.
- v. `users.users`: contiene la totalidad de usuarios que puede ingresar a la plataforma RRVS.

B Definición del esquema de clases

Reinforced confined masonry of concrete hollow blocks with flexible diaphragm for 1 storey buildings
and rigid for 2 or + storeys

```
# Class 1: MCR.1 = MCR+CBH/LWAL/HEX:1/IRRE/FN
bmod_schema_sanjose['MCR.1']={
  bmod_schema_sanjose['MCR.1']['mat_type']={'MCR':'+++','M99':'++','MCF':'---','W':'---'} #excludes MCF & wood
  bmod_schema_sanjose['MCR.1']['mat_tech']={'CBH':'+++','CB99':'+', 'MO':'+'}
  bmod_schema_sanjose['MCR.1']['llrs']={'LWAL':'+++','L99':'++','LFINF':'---','LFBR':'---'} #excludes LFINF, material of frame
  bmod_schema_sanjose['MCR.1']['occupy_dt']={'for All ':'+++'} #don't punish score for occupy_dt
  bmod_schema_sanjose['MCR.1']['str_irreg']={'IRRE':'+++','IRIR':'+'}
  bmod_schema_sanjose['MCR.1']['floor_mat']={'FN':'+++'}
  bmod_schema_sanjose['MCR.1']['height_1']={'H_MIN':1,'H_MAX':1}
```

```
# Class 2: MCR.2 = MCR+CBH/LWAL/H_BET:2:/IRRE/FC
bmod_schema_sanjose['MCR.2']={
  bmod_schema_sanjose['MCR.2']['mat_type']={'MCR':'+++','M99':'++','MCF':'---','W':'---'} #excludes MCF & wood
  bmod_schema_sanjose['MCR.2']['mat_tech']={'CBH':'+++','CB99':'+', 'MO':'+'}
  bmod_schema_sanjose['MCR.2']['llrs']={'LWAL':'+++','L99':'++','LFINF':'---','LFBR':'---'} #excludes LFINF, material of frame
  bmod_schema_sanjose['MCR.2']['occupy_dt']={'for All ':'+++'} #don't punish score for occupy_dt
  bmod_schema_sanjose['MCR.2']['str_irreg']={'IRRE':'+++','IRIR':'+'}
  bmod_schema_sanjose['MCR.2']['floor_mat']={'FC':'+++','FME':'+', 'FW':'+', 'FN':'---'}
  bmod_schema_sanjose['MCR.2']['height_1']={'H_MIN':2,'H_MAX':50}
```

Confined masonry of fire clay solid blocks with flexible diaphragm for 1 storey buildings and rigid for 2 or + storeys

```
# Class 3: MCF.1 = MCF+CLBRS/LWAL/HEX:1/IRRE/FN
bmod_schema_sanjose['MCF.1']={
  bmod_schema_sanjose['MCF.1']['mat_type']={'MCF':'+++','M99':'+', 'MCR':'---','W':'---'} #excludes MCR & wood
  bmod_schema_sanjose['MCF.1']['mat_tech']={'CLBRS':'+++','CLBRH':'++','CLBLH':'++','CL99':'+'}
  bmod_schema_sanjose['MCF.1']['llrs']={'LWAL':'+++','L99':'++','LFINF':'---','LFBR':'---'} #excludes LFINF, material of frame
  bmod_schema_sanjose['MCF.1']['occupy_dt']={'for All ':'+++'} #don't punish score for occupy_dt
  bmod_schema_sanjose['MCF.1']['str_irreg']={'IRRE':'+++','IRIR':'+'}
  bmod_schema_sanjose['MCF.1']['floor_mat']={'FN':'+++'}
  bmod_schema_sanjose['MCF.1']['height_1']={'H_MIN':1,'H_MAX':1}
```

```
# Class 4: MCF.2 = MCF+CLBRS/LWAL/H_BET:2:/IRRE/FC
bmod_schema_sanjose['MCF.2']={
  bmod_schema_sanjose['MCF.2']['mat_type']={'MCF':'+++','M99':'+', 'MCR':'---','W':'---'} #excludes MCR & wood
  bmod_schema_sanjose['MCF.2']['mat_tech']={'CLBRS':'+++','CLBRH':'++','CLBLH':'++','CL99':'+'}
  bmod_schema_sanjose['MCF.2']['llrs']={'LWAL':'+++','L99':'++','LFINF':'---','LFBR':'---'} #excludes LFINF, material of frame
  bmod_schema_sanjose['MCF.2']['occupy_dt']={'for All ':'+++'} #don't punish score for occupy_dt
  bmod_schema_sanjose['MCF.2']['str_irreg']={'IRRE':'+++','IRIR':'+'}
  bmod_schema_sanjose['MCF.2']['floor_mat']={'FC':'+++','FME':'+', 'FW':'+', 'FN':'---'}
  bmod_schema_sanjose['MCF.2']['height_1']={'H_MIN':1,'H_MAX':50}
```

Reinforced concrete with rigid diaphragms

```
# Class 5: CR.D.A = CR/LDUAL/H_BET:1:5/IRRE/FC
bmod_schema_sanjose['CR.D.A']={
  bmod_schema_sanjose['CR.D.A']['mat_type']={'CR':'+++','C99':'++','MCR':'--','MCF':'--','W':'---'}
  bmod_schema_sanjose['CR.D.A']['mat_tech']={'CIP':'+++','PC':'++','CIPPS':'++','PCPS':'++','CT99':'+'}
  bmod_schema_sanjose['CR.D.A']['llrs']={'LDUAL':'+++','LFINF':'---','LFM':'---','LWAL':'---','LFBR':'---'}
  bmod_schema_sanjose['CR.D.A']['occupy_dt']={'for All ':'+++'} #don't punish score for occupy_dt
  bmod_schema_sanjose['CR.D.A']['str_irreg']={'IRRE':'+++','IRIR':'+'}
```

```
bmod_schema_sanjose['CR.D.A']['floor_mat']={'FC':'+', 'FME':'+', 'FW':+'}
bmod_schema_sanjose['CR.D.A']['height_1']={'H_MIN':1, 'H_MAX':5}
```

```
# Class 6: CR.D.B = CR/LDUAL/H_BET:6:10/IRRE/FC
```

```
bmod_schema_sanjose['CR.D.B']={}
bmod_schema_sanjose['CR.D.B']['mat_type']={'CR':'+', 'C99':+', 'MCR':--, 'MCF':--, 'W':---}
bmod_schema_sanjose['CR.D.B']['mat_tech']={'CIP':'+', 'PC':+', 'CIPPS':+', 'PCPS':+', 'CT99':+'}
bmod_schema_sanjose['CR.D.B']['llrs']={'LDUAL':'+', 'LFINF':---, 'LFM':---, 'LWAL':---, 'LFBR':---}
bmod_schema_sanjose['CR.D.B']['occupy_dt']={'for All':+'} #don't punish score for occupy_dt
bmod_schema_sanjose['CR.D.B']['str_irreg']={'IRRE':'+', 'IRIR':+'}
bmod_schema_sanjose['CR.D.B']['floor_mat']={'FC':'+', 'FME':'+', 'FW':+'}
bmod_schema_sanjose['CR.D.B']['height_1']={'H_MIN':6, 'H_MAX':10}
```

```
# Class 7: CR.D.C = CR/LDUAL/H_BET:11:+/IRRE/FC
```

```
bmod_schema_sanjose['CR.D.C']={}
bmod_schema_sanjose['CR.D.C']['mat_type']={'CR':'+', 'C99':+', 'MCR':--, 'MCF':--, 'W':---}
bmod_schema_sanjose['CR.D.C']['mat_tech']={'CIP':'+', 'PC':+', 'CIPPS':+', 'PCPS':+', 'CT99':+'}
bmod_schema_sanjose['CR.D.C']['llrs']={'LDUAL':'+', 'LFINF':---, 'LFM':---, 'LWAL':---, 'LFBR':---}
bmod_schema_sanjose['CR.D.C']['occupy_dt']={'for All':+'} #don't punish score for occupy_dt
bmod_schema_sanjose['CR.D.C']['str_irreg']={'IRRE':'+', 'IRIR':+'}
bmod_schema_sanjose['CR.D.C']['floor_mat']={'FC':'+', 'FME':'+', 'FW':+'}
bmod_schema_sanjose['CR.D.C']['height_1']={'H_MIN':11, 'H_MAX':50}
```

```
# Class 8: CR.I.A = CR/LFINF/H_BET:1:5/IRRE/FC
```

```
bmod_schema_sanjose['CR.I.A']={}
bmod_schema_sanjose['CR.I.A']['mat_type']={'CR':'+', 'C99':+', 'MCR':--, 'MCF':--, 'W':---}
bmod_schema_sanjose['CR.I.A']['mat_tech']={'CIP':'+', 'PC':+', 'CIPPS':+', 'PCPS':+', 'CT99':+'}
bmod_schema_sanjose['CR.I.A']['llrs']={'LDUAL':---, 'FINF':'+', 'LFM':---, 'LWAL':---, 'LFBR':---}
bmod_schema_sanjose['CR.I.A']['occupy_dt']={'for All':+'} #don't punish score for occupy_dt
bmod_schema_sanjose['CR.I.A']['str_irreg']={'IRRE':'+', 'IRIR':+'}
bmod_schema_sanjose['CR.I.A']['floor_mat']={'FC':'+', 'FME':'+', 'FW':+'}
bmod_schema_sanjose['CR.I.A']['height_1']={'H_MIN':1, 'H_MAX':5}
```

```
# Class 9: CR.F.A = CR/LFM/H_BET:1:5/IRRE/FC
```

```
bmod_schema_sanjose['CR.F.A']={}
bmod_schema_sanjose['CR.F.A']['mat_type']={'CR':'+', 'C99':+', 'MCR':--, 'MCF':--, 'W':---}
bmod_schema_sanjose['CR.F.A']['mat_tech']={'CIP':'+', 'PC':+', 'CIPPS':+', 'PCPS':+', 'CT99':+'}
bmod_schema_sanjose['CR.F.A']['llrs']={'LDUAL':---, 'LFINF':---, 'LFM':'+', 'LWAL':---, 'LFBR':---}
bmod_schema_sanjose['CR.F.A']['occupy_dt']={'for All':+'} #don't punish score for occupy_dt
bmod_schema_sanjose['CR.F.A']['str_irreg']={'IRRE':'+', 'IRIR':+'}
bmod_schema_sanjose['CR.F.A']['floor_mat']={'FC':'+', 'FME':'+', 'FW':+'}
bmod_schema_sanjose['CR.F.A']['height_1']={'H_MIN':1, 'H_MAX':5}
```

```
# Class 10: CR.F.B = CR/LFM/H_BET:6:10/IRRE/FC
```

```
bmod_schema_sanjose['CR.F.B']={}
bmod_schema_sanjose['CR.F.B']['mat_type']={'CR':'+', 'C99':+', 'MCR':--, 'MCF':--, 'W':---}
bmod_schema_sanjose['CR.F.B']['mat_tech']={'CIP':'+', 'PC':+', 'CIPPS':+', 'PCPS':+', 'CT99':+'}
bmod_schema_sanjose['CR.F.B']['llrs']={'LDUAL':---, 'LFINF':---, 'LFM':'+', 'LWAL':---, 'LFBR':---}
bmod_schema_sanjose['CR.F.B']['occupy_dt']={'for All':+'} #don't punish score for occupy_dt
bmod_schema_sanjose['CR.F.B']['str_irreg']={'IRRE':'+', 'IRIR':+'}
bmod_schema_sanjose['CR.F.B']['floor_mat']={'FC':'+', 'FME':'+', 'FW':+'}
bmod_schema_sanjose['CR.F.B']['height_1']={'H_MIN':6, 'H_MAX':10}
```

```
# Class 11: CR.F.C = CR/LFM/H_BET:11:+/IRRE/FC
```

```
bmod_schema_sanjose['CR.F.C']={}
bmod_schema_sanjose['CR.F.C']['mat_type']={'CR':'+', 'C99':+', 'MCR':--, 'MCF':--, 'W':---}
```

```

bmod_schema_sanjose['CR.F.C']['mat_tech']={'CIP':'+++','PC':'++','CIPPS':'++','PCPS':'++','CT99':'+'}
bmod_schema_sanjose['CR.F.C']['llrs']={'LDUAL':'---','LFINF':'---','LFM':'+++','LWAL':'---','LFBR':'---'}
bmod_schema_sanjose['CR.F.C']['occupy_dt']={for All ':'+++} #don't punish score for occupy_dt
bmod_schema_sanjose['CR.F.C']['str_irreg']={'IRRE':'+++','IRIR':'+'}
bmod_schema_sanjose['CR.F.C']['floor_mat']={'FC':'+++','FME':'+', 'FW':'+'}
bmod_schema_sanjose['CR.F.C']['height_1']={'H_MIN':11,'H_MAX':50}

```

Class 12: CR.W.A = CR/LWAL/H_BET:1:5/IRRE/FC

```

bmod_schema_sanjose['CR.W.A']={}
bmod_schema_sanjose['CR.W.A']['mat_type']={'CR':'+++','C99':'++','MCR':'--','MCF':'--','W':'---'}
bmod_schema_sanjose['CR.W.A']['mat_tech']={'CIP':'+++','PC':'++','CIPPS':'++','PCPS':'++','CT99':'+'}
bmod_schema_sanjose['CR.W.A']['llrs']={'LDUAL':'---','LFINF':'---','LFM':'---','LWAL':'+++','LFBR':'---'}
bmod_schema_sanjose['CR.W.A']['occupy_dt']={for All ':'+++} #don't punish score for occupy_dt
bmod_schema_sanjose['CR.W.A']['str_irreg']={'IRRE':'+++','IRIR':'+'}
bmod_schema_sanjose['CR.W.A']['floor_mat']={'FC':'+++','FME':'+', 'FW':'+'}
bmod_schema_sanjose['CR.W.A']['height_1']={'H_MIN':1,'H_MAX':5}

```

Class 13: CR.W.B = CR/LWAL/H_BET:6:10/IRRE/FC

```

bmod_schema_sanjose['CR.W.B']={}
bmod_schema_sanjose['CR.W.B']['mat_type']={'CR':'+++','C99':'++','MCR':'--','MCF':'--','W':'---'}
bmod_schema_sanjose['CR.W.B']['mat_tech']={'CIP':'+++','PC':'++','CIPPS':'++','PCPS':'++','CT99':'+'}
bmod_schema_sanjose['CR.W.B']['llrs']={'LDUAL':'---','LFINF':'---','LFM':'---','LWAL':'+++','LFBR':'---'}
bmod_schema_sanjose['CR.W.B']['occupy_dt']={for All ':'+++} #don't punish score for occupy_dt
bmod_schema_sanjose['CR.W.B']['str_irreg']={'IRRE':'+++','IRIR':'+'}
bmod_schema_sanjose['CR.W.B']['floor_mat']={'FC':'+++','FME':'+', 'FW':'+'}
bmod_schema_sanjose['CR.W.B']['height_1']={'H_MIN':6,'H_MAX':10}

```

Class 14: CR.W.C = CR/LWAL/H_BET:11:+/IRRE/FC

```

bmod_schema_sanjose['CR.W.C']={}
bmod_schema_sanjose['CR.W.C']['mat_type']={'CR':'+++','C99':'++','MCR':'--','MCF':'--','W':'---'}
bmod_schema_sanjose['CR.W.C']['mat_tech']={'CIP':'+++','PC':'++','CIPPS':'++','PCPS':'++','CT99':'+'}
bmod_schema_sanjose['CR.W.C']['llrs']={'LDUAL':'---','LFINF':'---','LFM':'---','LWAL':'+++','LFBR':'---'}
bmod_schema_sanjose['CR.W.C']['occupy_dt']={for All ':'+++} #don't punish score for occupy_dt
bmod_schema_sanjose['CR.W.C']['str_irreg']={'IRRE':'+++','IRIR':'+'}
bmod_schema_sanjose['CR.W.C']['floor_mat']={'FC':'+++','FME':'+', 'FW':'+'}
bmod_schema_sanjose['CR.W.C']['height_1']={'H_MIN':11,'H_MAX':50}

```

Steel, separating warehouses from buildings, also cold formed (flexible diahragm) from hot rolled (rigid diaphragm)

Class 15: S.Wh.1 = S+SR/LFM/HEX:1/IRRE/FN warehouses, occupy_dt = COM2 or COM3

```

bmod_schema_sanjose['S.Wh.1']={}
bmod_schema_sanjose['S.Wh.1']['mat_type']={'S':'+++','W':'---'}
bmod_schema_sanjose['S.Wh.1']['mat_tech']={'SL':'+++','SR':'+++','SO':'++','S99':'+'}
bmod_schema_sanjose['S.Wh.1']['llrs']={'LDUAL':'---','LFM':'+++','LWAL':'---','LFBR':'+++'}
bmod_schema_sanjose['S.Wh.1']['occupy_dt']={'COM2':'+++','COM3':'+++','Rest':'---'} #punish score for occupy_dt
bmod_schema_sanjose['S.Wh.1']['str_irreg']={'IRRE':'+++','IRIR':'+'}
bmod_schema_sanjose['S.Wh.1']['floor_mat']={'FN':'+++','FME':'+++'}
bmod_schema_sanjose['S.Wh.1']['height_1']={'H_MIN':1,'H_MAX':1}

```

Class 16: S.F.C.A = S+SL/LFM/H_BET:1:5/IRRE/FME

```

bmod_schema_sanjose['S.F.C.A']={}
bmod_schema_sanjose['S.F.C.A']['mat_type']={'S':'+++','W':'---'}
bmod_schema_sanjose['S.F.C.A']['mat_tech']={'SL':'+++','SR':'---','SO':'++','S99':'+'}
bmod_schema_sanjose['S.F.C.A']['llrs']={'LDUAL':'---','LFM':'+++','LWAL':'---'}
bmod_schema_sanjose['S.F.C.A']['occupy_dt']={'COM2':'---','COM3':'---','Rest':'+++'} #punish score for occupy_dt
bmod_schema_sanjose['S.F.C.A']['str_irreg']={'IRRE':'+++','IRIR':'+'}

```

```

bmod_schema_sanjose['S.F.C.A']['floor_mat']={'FME':+'+', 'FW':+'+'}
bmod_schema_sanjose['S.F.C.A']['height_1']={'H_MIN':1,'H_MAX':5}

# Class 17: S.F.H.A = S/LFM/H_BET:1:5/IRRE/FC
bmod_schema_sanjose['S.F.H.A']={}
bmod_schema_sanjose['S.F.H.A']['mat_type']={'S':+'+', 'W':+'---'}
bmod_schema_sanjose['S.F.H.A']['mat_tech']={'SL':+'---', 'SR':+'+', 'SO':+'+', 'S99':+'+'}
bmod_schema_sanjose['S.F.H.A']['llrs']={'LDUAL':+'---', 'LFM':+'+', 'LWAL':+'---'}
bmod_schema_sanjose['S.F.H.A']['occupy_dt']={'COM2':+'---', 'COM3':+'---', Rest: '+'+'+'} #punish score for occupy_dt
bmod_schema_sanjose['S.F.H.A']['str_irreg']={'IRRE':+'+', 'IRIR':+'+'}
bmod_schema_sanjose['S.F.H.A']['floor_mat']={'FC':+'+'}
bmod_schema_sanjose['S.F.H.A']['height_1']={'H_MIN':1,'H_MAX':5}

## Wood structures, flexible diaphragm

# Class 18: W.F.1 = W/LFM/H_BET:1:5/IRRE/FW
bmod_schema_sanjose['W.F.A']={}
bmod_schema_sanjose['W.F.A']['mat_type']={'W':+'+', 'C99':+'---', 'M99':+'---', 'E99':+'---'}
bmod_schema_sanjose['W.F.A']['mat_tech']={'WHE':+'+', 'WS':+'+', 'WLI':+'+', 'WO':+'+', 'W99':+'+'}
bmod_schema_sanjose['W.F.A']['llrs']={'LMF':+'+', 'LWAL':+'---'}
bmod_schema_sanjose['W.F.A']['occupy_dt']={'for All':+'+'} #don't punish score for occupy_dt
bmod_schema_sanjose['W.F.A']['str_irreg']={'IRRE':+'+', 'IRIR':+'+'}
bmod_schema_sanjose['W.F.A']['floor_mat']={'FME':+'+', 'FW':+'+'}
bmod_schema_sanjose['W.F.A']['height_1']={'H_MIN':1,'H_MAX':5}

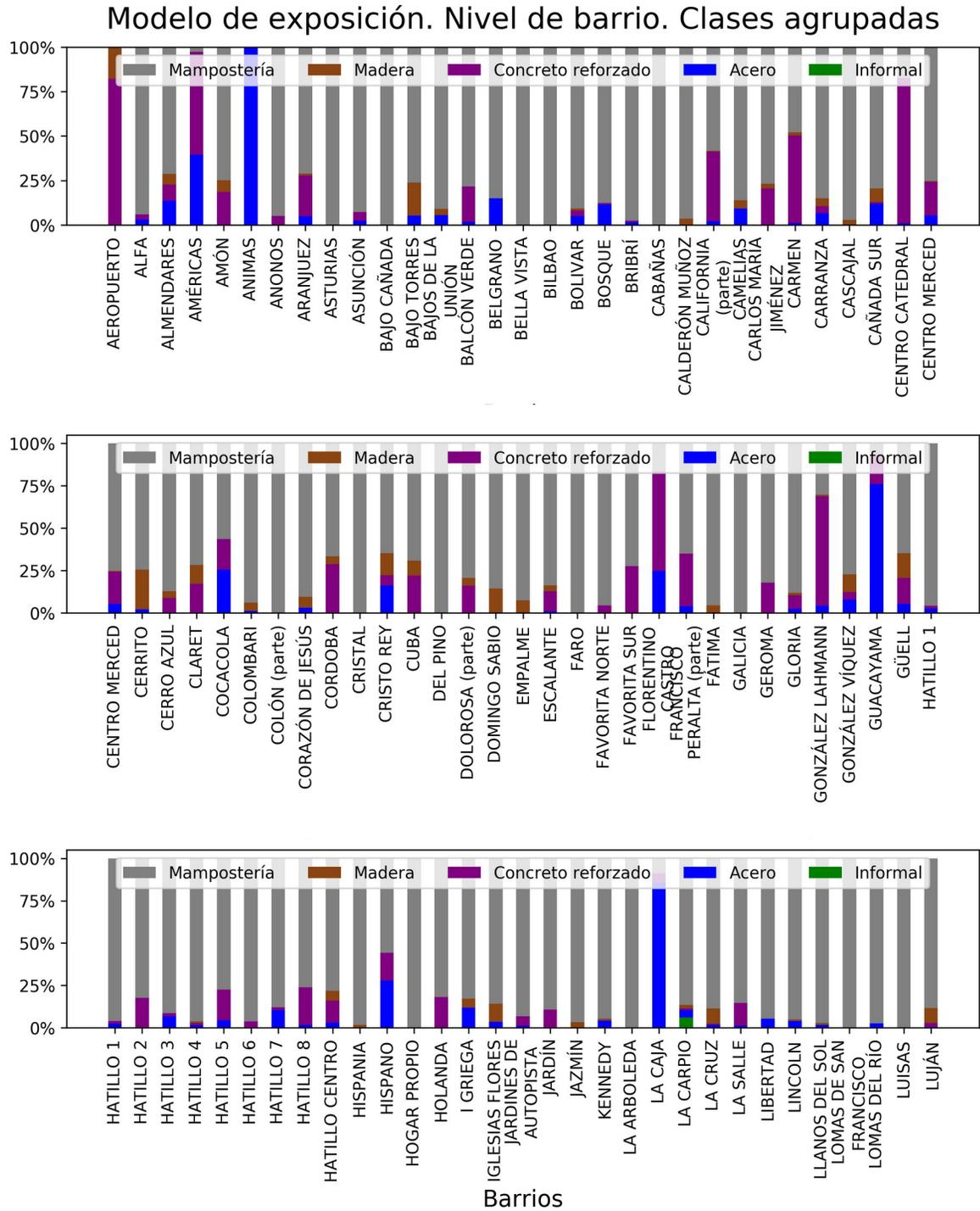
# Class 19: W.W.1 = W/LWAL/H_BET:1:5/IRRE/FW
bmod_schema_sanjose['W.W.A']={}
bmod_schema_sanjose['W.W.A']['mat_type']={'W':+'+', 'C99':+'---', 'M99':+'---', 'E99':+'---'}
bmod_schema_sanjose['W.W.A']['mat_tech']={'WHE':+'+', 'WS':+'+', 'WLI':+'+', 'WO':+'+', 'W99':+'+'}
bmod_schema_sanjose['W.W.A']['llrs']={'LMF':+'---', 'LWAL':+'+'}
bmod_schema_sanjose['W.W.A']['occupy_dt']={'for All':+'+'} #don't punish score for occupy_dt
bmod_schema_sanjose['W.W.A']['str_irreg']={'IRRE':+'+', 'IRIR':+'+'}
bmod_schema_sanjose['W.W.A']['floor_mat']={'FME':+'+', 'FW':+'+'}
bmod_schema_sanjose['W.W.A']['height_1']={'H_MIN':1,'H_MAX':5}

## Informal constructions

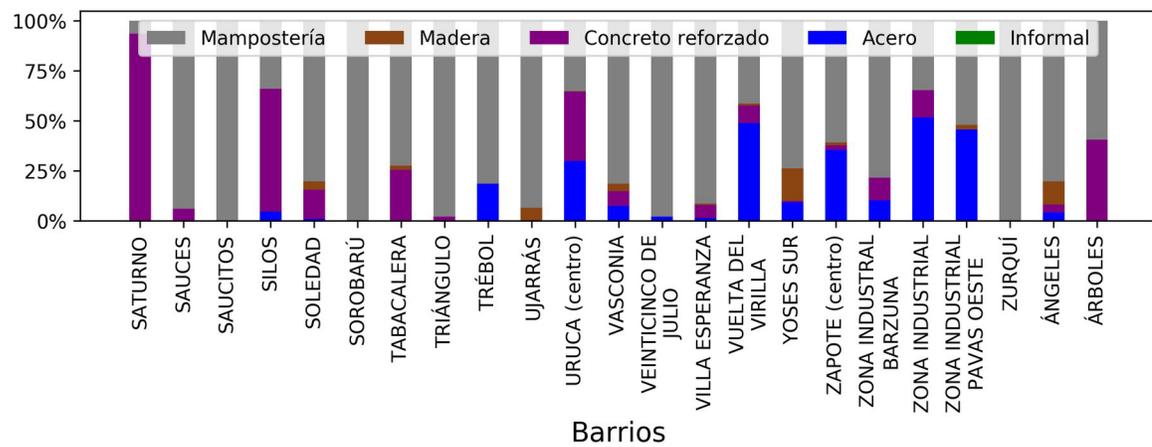
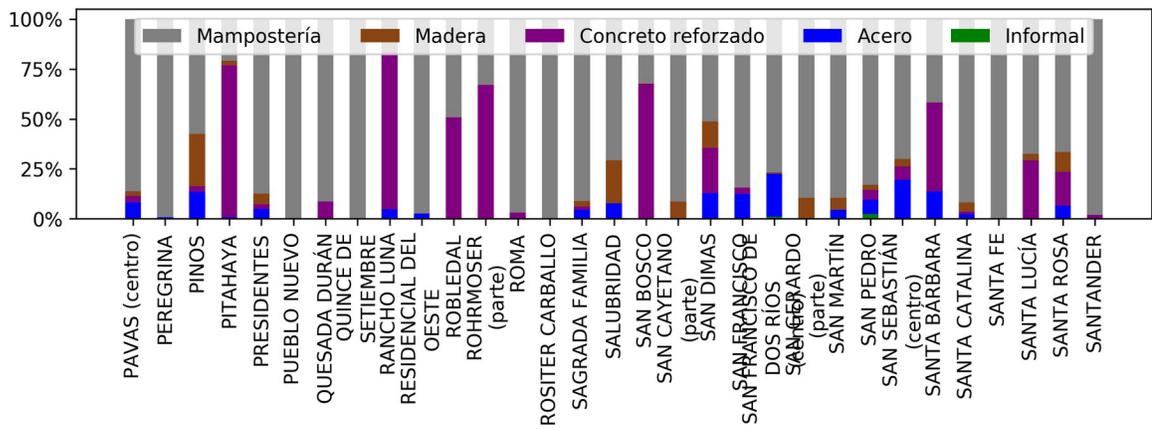
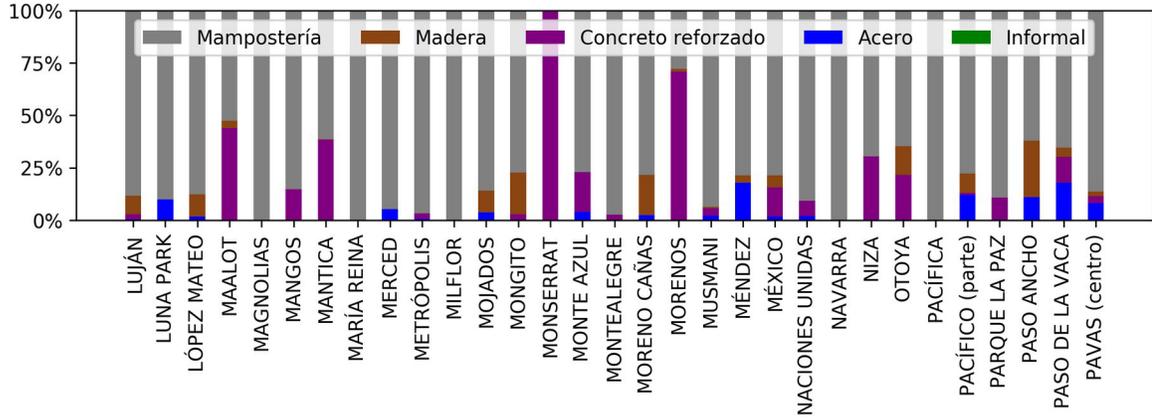
# Class 20: INFOR = RES6
bmod_schema_sanjose['INFOR']={}
bmod_schema_sanjose['INFOR']['mat_type']={'MAT99':+'+'}
bmod_schema_sanjose['INFOR']['mat_tech']={'MATT99':+'+'}
bmod_schema_sanjose['INFOR']['llrs']={'L99':+'+'}
bmod_schema_sanjose['INFOR']['occupy_dt']={'RES6':+'+', Rest:'---'} #punish score for occupy_dt
bmod_schema_sanjose['INFOR']['str_irreg']={'IR99':+'+'}
bmod_schema_sanjose['INFOR']['floor_mat']={'F99':+'+'}
bmod_schema_sanjose['INFOR']['height_1']={'H_MIN':1,'H_MAX':5}

```

C Inventario a nivel de barrios completo

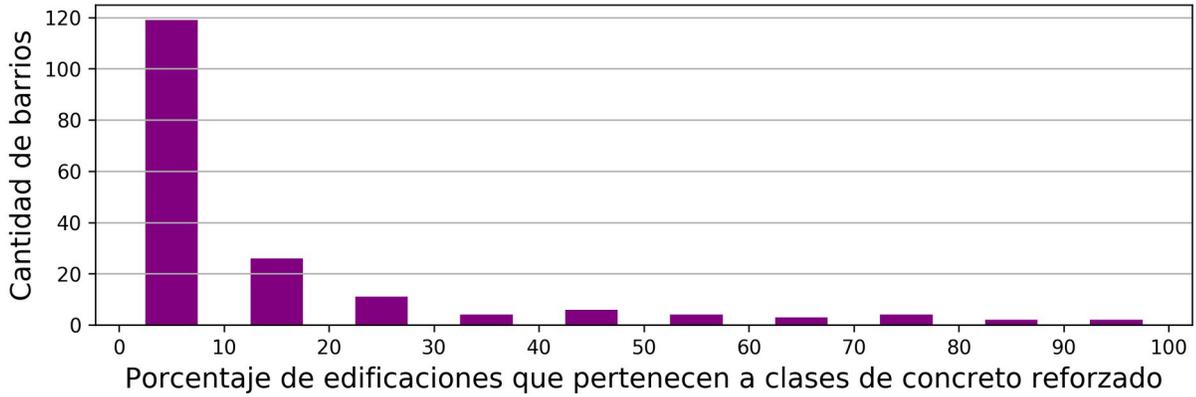


Modelo de exposición. Nivel de barrio. Clases agrupadas

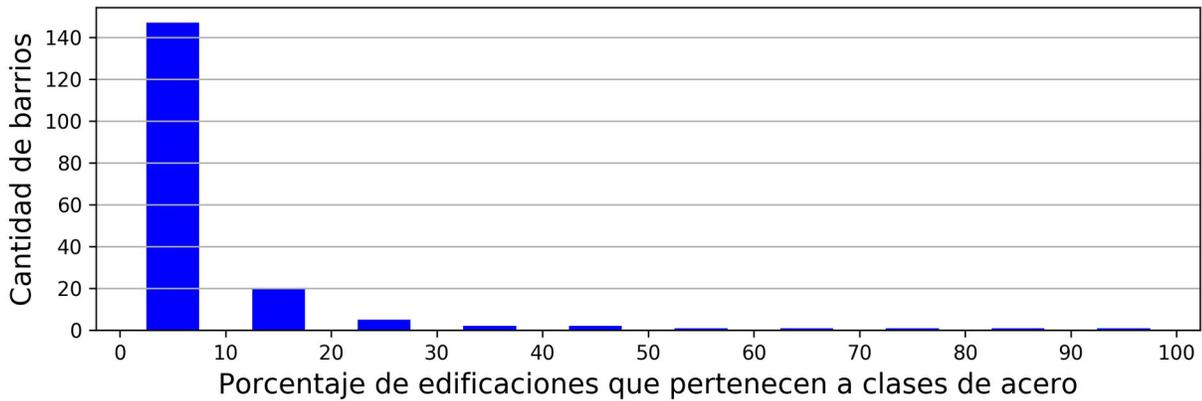


D Histogramas para clases agrupadas a nivel de barrios

Histograma para clases de concreto reforzado. Nivel de barrio.



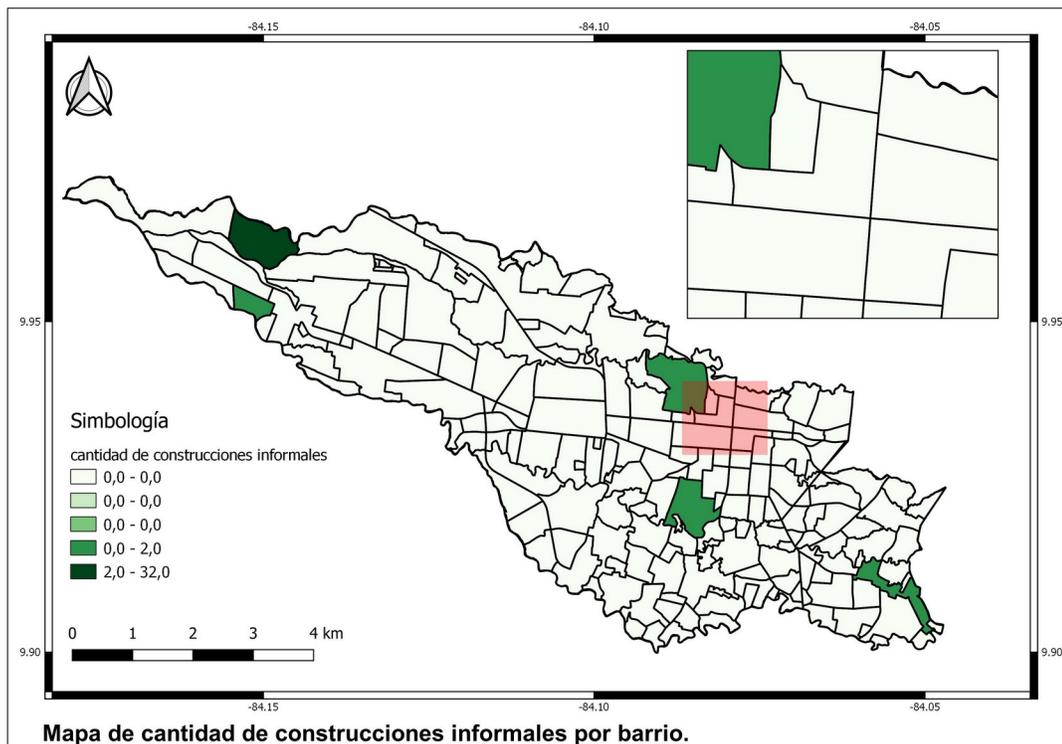
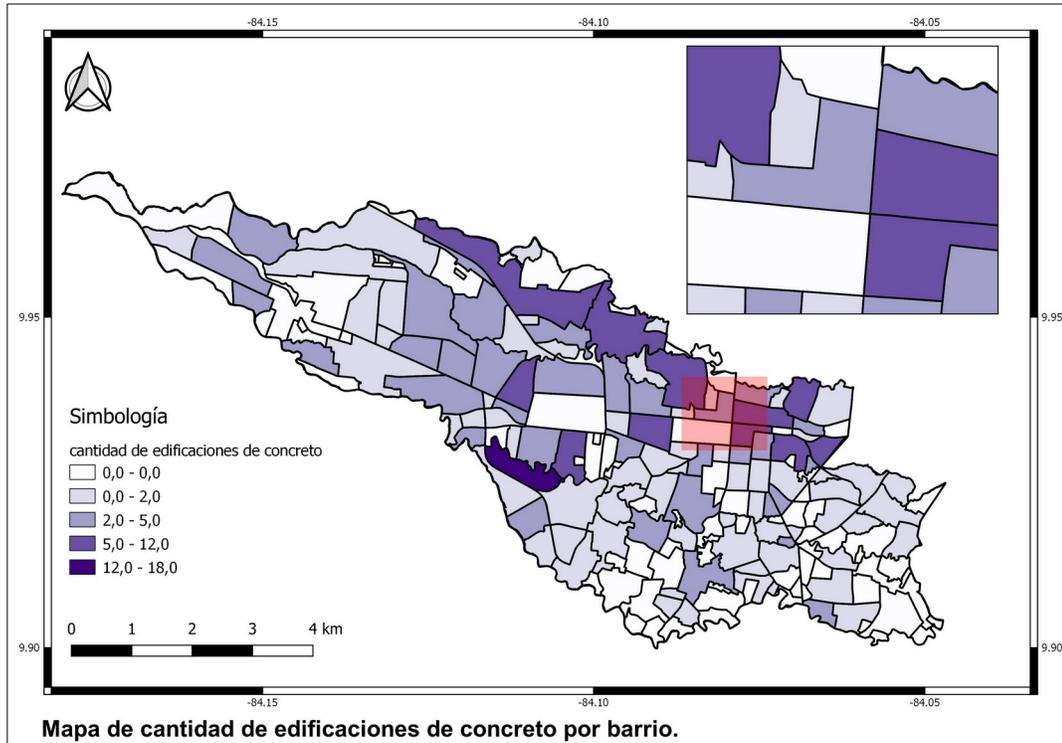
Histograma para clases de acero. Nivel de barrio.

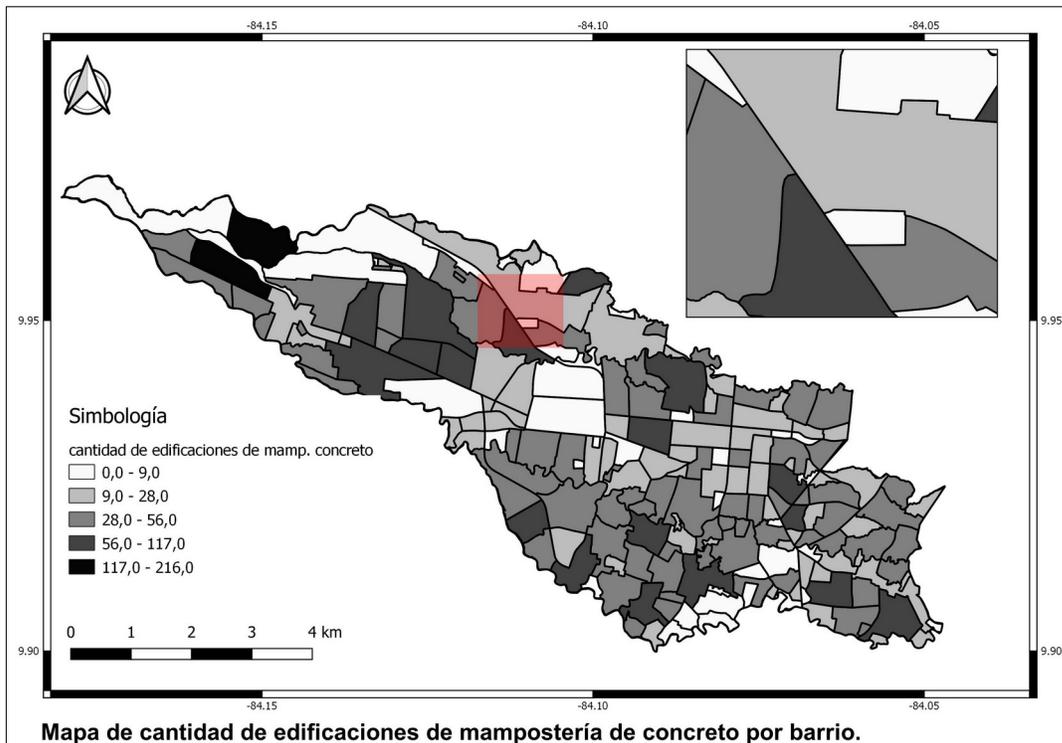
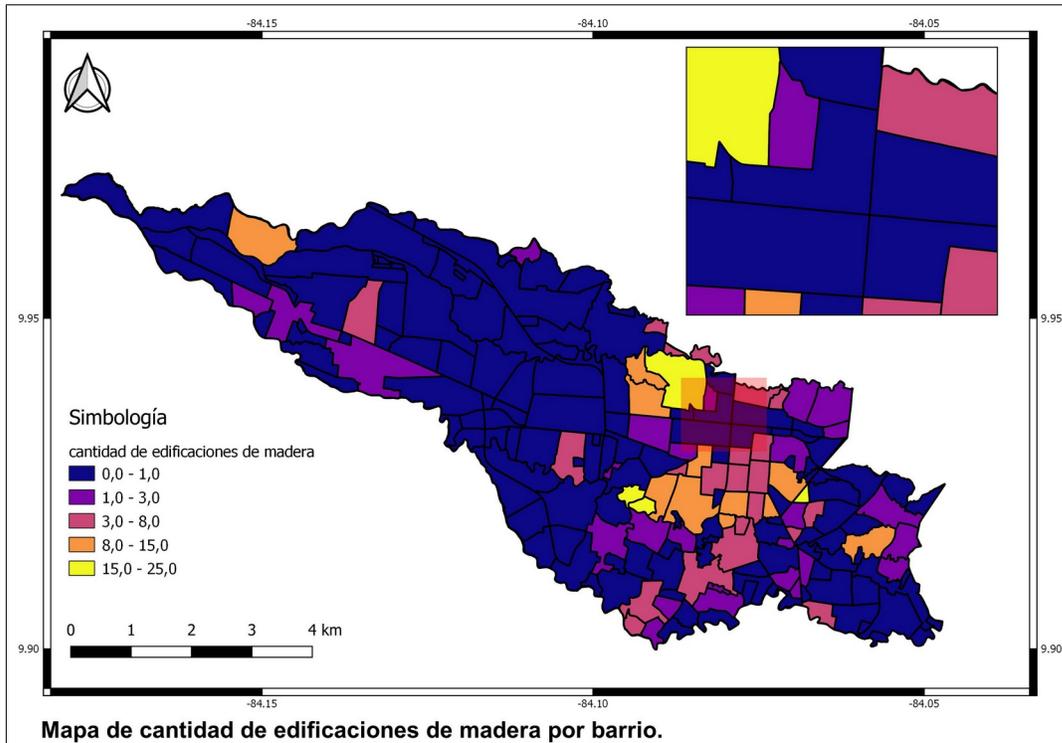


Histograma para clases Informal. Nivel de barrio.



E Mapas de clases constructivas agrupadas por barrio





ANEXOS

A Encuesta aplicada

Id	Material	id	Irregularidad estructural
1	Tipo de material	16	Detalle de la irregularidad estructural
2	Tecnología de material	17	Tipo de irregularidad estructural
3	Propiedades del material	18	Segunda irregularidad estructural
	Sistema sismorresistente (LLRS)	19	Detalle de la segunda irregularidad estructural
4	Sistema sismorresistente	20	Tipo de la segunda irregularidad estructural
5	Ductilidad del sistema sismorresistente		Muros exteriores
	Altura	21	Material de muros exteriores
6	Tipo de altura		Techo
7	Valor de altura	22	Forma del techo/azotea
8	Segundo tipo de altura	23	Material de la cubierta de techo/azotea
9	Segundo valor de altura	24	Material del sistema de techo/azotea
	Edad	25	Tipo del sistema de techo/azotea
10	Tipo de fecha de construcción	26	Conexiones del techo/azotea
11	Fecha de construcción		Entrepiso
	Ocupación	27	Material del entrepiso
12	Tipo de ocupación	28	Tipo de entrepiso
13	Detalles de la ocupación	29	Conexiones de entrepiso
	Planta y posición		Sistema de cimentaciones
14	Forma de la planta	30	Sistema de fundaciones
15	Posición		Opcional
		31	Comentarios
		32	Vulnerabilidad EMS-98