



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ANÁLISIS DE ESTRUCTURACIÓN EN PLANTA A PARTIR DE PLANOS DE
ARQUITECTURA E INGENIERÍA PARA EDIFICIOS CON MUROS DE HORMIGÓN
ARMADO EN CHILE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

EDGAR ANDRE FONSECA SAN MARTÍN

PROFESOR GUÍA:
LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
FABIÁN ROJAS BARRALES
RAFAEL RUIZ GARCÍA

SANTIAGO DE CHILE
2020

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: EDGAR ANDRE FONSECA SAN MARTÍN
FECHA: ABRIL 2020
PROF. GUÍA: LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ

ANÁLISIS DE ESTRUCTURACIÓN EN PLANTA A PARTIR DE PLANOS DE ARQUITECTURA E INGENIERÍA PARA EDIFICIOS CON MUROS DE HORMIGÓN ARMADO EN CHILE

El objetivo de este trabajo consiste en generar y analizar una base de datos con información representativa de edificios de hormigón armado destinados a uso habitacional en Chile. La información corresponde a 171 proyectos diseñados entre los años 2003 y 2018.

Para cada proyecto se tiene información de características descriptivas e indicadores estructurales. Además se cuenta con los planos en AutoCAD de la primera propuesta de arquitectura y la última revisión de ingeniería para los niveles: piso subterráneo, primer piso y piso tipo.

La consolidación de la base de datos se realiza mediante el procesamiento de los planos para obtener propiedades geométricas como el área e inercia de muros estructurales en planta. Con estos datos se calcula la densidad de muros para cada piso.

El análisis se divide en dos partes: la primera se basa en el estudio de los parámetros H/T (altura/período) y densidad de muros. Los resultados se comparan con estudios anteriores en torno a la caracterización de edificios de hormigón armado. La segunda parte, estudia las modificaciones en la estructuración entre el primer diseño de arquitectura en planta y la última revisión de ingeniería.

En última instancia, dado el auge de técnicas de Inteligencia Artificial para resolver problemas complejos en Ingeniería Civil, se lleva a cabo una metodología para estimar el período de vibración para un edificio. Para esto se utilizan las propiedades geométricas: área en planta, inercia de muros, altura del edificio y número de pisos. El coeficiente de determinación R^2 de la expresión obtenida es de 0.78 en la dirección transversal del edificio.

Las conclusiones indican que los parámetros estructurales para los edificios de la muestra se mantienen en los rangos aceptables, con valores similares a los obtenidos en estudios previos. En cuanto al proceso de estructuración, las principales modificaciones se concentran en cambios del espesor de muros, específicamente en los niveles del primer piso y piso subterráneo.

Para mi familia, por su apoyo y amor incondicional

Tabla de Contenido

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Alcance por capítulos	4
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Introducción	5
2.2. Caracterización de Edificios de hormigón armado en Chile	6
2.3. Revisión de métodos de Inteligencia Artificial en Ingeniería Civil	17
3. RECOPIACIÓN Y PROCESAMIENTO DE LA MUESTRA	22
3.1. Introducción	22
3.2. Información de muestra RLE	23
3.3. Procesamiento de planos	25
3.4. Cálculo propiedades geométricas en planta	28
4. DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE EDIFICIOS	30
4.1. Introducción	30
4.2. Descripción general de proyectos	31
4.3. Análisis de características estructurales	36
4.4. Estudio de cambios en etapa de diseño de edificios	53
5. ESTIMACIÓN DEL PERÍODO CON APRENDIZAJE AUTOMÁTICO	62
5.1. Introducción	62
5.2. Período en función del número de pisos	63
5.3. Exploración de datos	65
5.4. Cálculo de propiedades físicas y geométricas	68
5.5. Modelo de Regresión Lineal	71
6. CONCLUSIÓN Y COMENTARIOS FINALES	78
Bibliografía	81
Anexo A	83
Anexo B	86

Índice de Tablas

2.1. Clasificación de rigidez de edificios, unidades en <i>m/seg</i> (Guendelman et al., 2017)	7
2.2. Desempeño esperado a partir de la deriva total (Lagos et al., 2012)	9
2.3. Rango de valores actualizados para indicadores (Guendelman et al., 2017)	12
4.1. Distribución de proyectos según zona sísmica y tipo de suelo	35
4.2. Densidad de muros promedio por dirección y piso	43
4.3. Densidad de muros promedio según el tipo de suelo	45
4.4. Densidad de muros promedio según zona sísmica	46
4.5. Medias para el valor promedio del espesor de muros en cada piso para especialidad de arquitectura e ingeniería	55
4.6. Variación promedio del centro de masas entre especialidades para cada piso y dirección de análisis	61
5.1. Valor promedio y mediana para las inercias calculadas en cada piso	67
5.2. Porcentaje de datos que se conservan luego de eliminar valores atípicos	73
5.3. Resultados para expresión $T = kH^\alpha I^\beta M^\gamma$	74
6.1. Resumen de funciones obtenidas para cada caso	79
6.2. Función: $T = kH^\alpha I^\beta M^\gamma$	86
6.3. Función: $T = k + \alpha H + \beta I + \gamma M$	87
6.4. Función: $T = k(M/I)^\alpha H^\beta$	88
6.5. Función: $T = \alpha H + \beta(M/I) + k$	89
6.6. Función: $T = kH^\alpha$	90

Índice de Ilustraciones

2.1. Histograma del Número de Pisos, muestra original de Perfil Bio-Sísmico (Guendelman, 2014)	6
2.2. Altura total vs Período (Guendelman et al., 2017)	7
2.3. Altura sobre nivel de terreno vs Período (Guendelman et al., 2017)	8
2.4. Altura sobre nivel de terreno vs Período fisurado (Guendelman et al., 2017)	8
2.5. Área de muros/Peso total sobre primer piso (Gómez, 2001; Calderón, 2007)	11
2.6. Área de muros/Área de planta en primer piso (Gómez, 2001; Calderón, 2007)	11
2.7. Concepto del espectro de desempeño (Lagos et al., 2017)	13
2.8. Edificios de hormigón armado típicos en Chile (Lagos et al., 2012)	14
2.9. Interrelación de diferentes técnicas de inteligencia computacional (Salehi y Burgueño, 2018)	18
2.10. Publicaciones de investigación sobre el uso de diferentes ramas de IA en ingeniería civil (Salehi y Burgueño, 2018)	19
3.1. Ejemplo de muros y borde de losa para plano de ingeniería en AutoCAD	25
3.2. Ejemplo de muros y borde de losa para plano de ingeniería en AutoCAD	26
3.3. Descripción de archivo .txt generado con rutina Lisp	26
3.4. Superposición de muros de arquitectura e ingeniería	27
4.1. Distribución del número de pisos sobre nivel de terreno	31
4.2. Distribución del número de subterráneos	31
4.3. Distribución de proyectos por año	32
4.4. Ubicación geográfica de proyectos: (a) en todo Chile, (b) Región Metropolitana y (c) Regiones de Tarapacá y Antofagasta.	33
4.5. Distribución del tipo de suelo según DS61.	34
4.6. Distribución de la zona sísmica según norma NCh433Of96	35
4.7. Distribución de H/T según dirección de análisis	36
4.8. Valores de H/T de la muestra entre los años 2003 y 2018	37
4.9. Altura Total versus Período para cada proyecto	38
4.10. Altura Total de proyectos entre los años 2003 y 2018	38
4.11. Distribución de la densidad de muros en el piso tipo de la muestra	40
4.12. Distribución de la densidad de muros en el primer piso de la muestra	41
4.13. Distribución de la densidad de muros en el piso subterráneo de la muestra	42
4.14. Diagramas de caja para densidad de muros por piso y dirección	42
4.15. Variación de la densidad de muros entre los años 2003 y 2018	43
4.16. Densidad de muros según clasificación de suelo según DS61 para piso subterráneo	44

4.17. Densidad de muros según clasificación de suelo según DS61 para primer piso	45
4.18. Densidad de muros según clasificación de suelo según DS61 para piso tipo . .	46
4.19. Densidad de muros zona sísmica para la muestra en estudio	47
4.20. Distribución de la densidad d_{np} en la dirección X	49
4.21. Distribución de la densidad d_{np} en la dirección Y	50
4.22. Variación de la densidad de muros d_{np} entre los años 2003 y 2018	50
4.23. Espesor promedio de muros por piso en la muestra	51
4.24. Distribución de espesor promedio de muros en subterráneo por especialidad .	53
4.25. Distribución de espesor promedio de muros en primer piso por especialidad .	54
4.26. Distribución de espesor promedio de muros en piso tipo por especialidad . .	54
4.27. Cambio en el área total y espesor promedio de muros durante el proceso de diseño estructural	56
4.28. Planta Cielo Primer Piso de proyecto habitacional para especialidades de ar- quitectura e ingeniería	57
4.29. Tolerancia α para la ubicación de un muro en planta	58
4.30. Cambio en el área total y espesor promedio de muros durante el proceso de diseño estructural	59
4.31. Ejemplo de proyecto con baja (a) y alta (b) intersección de área de muros . .	60
4.32. Cambio en el área total y espesor promedio de muros durante el proceso de diseño estructural	61
5.1. Estimación $N/20$ versus el período del edificio en ambas direcciones en conjunto	63
5.2. Estimación del período con regresión lineal versus período real, en cada direc- ción de análisis	64
5.3. Ajuste de la expresión $T = \alpha N$ en cada dirección	64
5.4. Distribución del área en planta por nivel	65
5.5. Distribución de los valores para la inercia no acoplada en cada piso	66
5.6. Distribución de los valores para la inercia acoplada en cada piso	67
5.7. Matriz de correlación con atributos considerados para la estimación del período	68
5.8. Distribución de la masa de cada proyecto con y sin subterráneos en su cálculo	69
5.9. Modelo del edificio con carga puntual junto con diagramas de momento e inercia	70
5.10. Valores atípicos para la inercia equivalente y masa total en conjunto	72
5.11. Ajuste de la expresión $T = \alpha N$ en cada dirección	75
5.12. Variación de R^2 considerando altura e inercia	76
5.13. Variación de R^2 considerando altura y masa	76
5.14. Variación de R^2 considerando masa e inercia	77

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Introducción

Chile es catalogado como uno de los países con mayor actividad sísmica del mundo. En efecto, se estima que cada 83 ± 9 años ocurra un gran sismo en la zona central del país (Lagos et al., 2017). Debido a esto, se han creados diferentes normativas que incorporan esta componente en el diseño de estructuras. Todas presentan requerimientos que tienen por objetivo asegurar la vida frente a un evento de gran magnitud (Lagos et al., 2012).

En el caso particular de edificios habitacionales, la experiencia y requerimientos constructivos han permitido homogenizar los criterios de diseño, dando como resultado lo que hoy se conoce como el “Edificio Chileno”. Este se caracteriza por tener muchos muros estructurales (redundancia estructural) y por ende una alta densidad de muros. De esta forma, se tienen estructuras de gran rigidez que reducen los desplazamientos totales y por ende el daño generado por el sismo (Calderón, 2007).

A través de los años se han realizado diferentes estudios e investigaciones con el fin de caracterizar las estructuras de hormigón armado mediante parámetros representativos. Sin embargo, con el creciente auge en el área de la construcción y nuevos requerimientos arquitectónicos en la concepción de los proyectos, surge la necesidad de recopilar y analizar información de edificios construidos en la última década. Esto permitirá comparar con valores típicos que se tienen sobre la edificación en Chile y estudiar posibles cambios.

Por otra parte, la información recopilada se puede estructurar de tal forma que permita consolidar una base de datos que contenga una serie de atributos relacionados a cada edificio de la muestra. De esta manera, al tener una cantidad importante de proyectos surge la oportunidad de generar nuevo conocimiento a partir de estos. Sin embargo, se requieren técnicas sofisticadas para procesar y analizar la información. En particular, técnicas provenientes del área de la Inteligencia Artificial (IA) son utilizadas para este propósito.

A grandes rasgos la IA corresponde a una rama de las Ciencias de la Computación, cuya finalidad es simular la capacidad de cognición humana a través de la manipulación de símbolos y datos estructurados para resolver problemas de ingeniería que desafían a las soluciones

obtenidas gracias a los métodos convencionales (Salehi y Burgueño, 2018). Debido a esto, su aplicación ha aumentado en el último tiempo en todos los dominios de la ingeniería.

En el caso particular de la Ingeniería Civil, existen múltiples problemas con altos grados de incertidumbre, en donde las metodologías tradicionales entregan soluciones aproximadas y donde la experiencia del ingeniero a cargo es fundamental. Por lo tanto, la IA aparece como una alternativa entregando soluciones óptimas basada en conocimiento histórico de respuestas que se dieron a problemas similares. Es así como se han aplicado diferentes técnicas para la detección de daño estructural, diseño estructural, optimización de la construcción, entre otros.

De esta manera, el presente trabajo consiste en el análisis de 171 edificios de muros de hormigón armado destinados a uso residencial. Todos estos fueron realizados por la oficina de cálculo estructural René Lagos Engineers (RLE) entre los años 2003 y 2018. La muestra se compone por planos de planta de las especialidades de arquitectura e ingeniería de los niveles: primer subterráneo, primer piso y piso tipo. Además se cuenta con información representativa como la ubicación del proyecto, períodos de vibración, factores de reducción, entre otros.

La metodología comienza con la recopilación de la información desde la oficina de RLE. Luego, los planos se procesan con la finalidad de generar una base de datos ordenada y obtener propiedades geométricas a partir de estos. Los diferentes atributos se comparan con estudios previos realizados en torno a la caracterización de edificios chilenos. Además, con la información de los planos del diseño preliminar de arquitectura y la última revisión de ingeniería, se realiza un análisis de los cambios en la etapa de estructuración en edificios chilenos.

Por último, se aplican métodos de aprendizaje automático (o aprendizaje en máquinas), un campo dentro de la Inteligencia Artificial, para estimar el período en edificios a partir de las propiedades geométricas de los elementos que conforman el sistema estructural. Lo anterior corresponde a una aproximación de cómo se utilizan estas herramientas actualmente en la Ingeniería Civil.

1.2. Objetivos

Generales

- Generar y analizar una base de datos con información representativa de edificios de hormigón armado destinados al uso habitacional en Chile.

Específicos

- Recopilar la información correspondiente a los 171 proyectos desde la oficina RLE.
- Procesar los planos de arquitectura e ingeniería en función de la estructura definida para la base de datos.
- Obtener de parámetros a partir de los planos como por ejemplo: área de planta, cuantía de muros, entre otros.
- Analizar valores de indicadores sísmicos en la estructuración final y comparar con estudios previos sobre caracterización de edificios chilenos.
- Estudiar los cambios en la estructuración a partir de la información obtenida de los planos de arquitectura e ingeniería.
- Implementar metodologías de aprendizaje automático sobre la muestra con el fin de estimar el período de una estructura a partir de las propiedades geométricas de muros y planta.

1.3. Alcance por capítulos

Capítulo 2: Revisión Bibliográfica

En primera instancia, se analizan estudios realizados en torno a la caracterización de edificios de hormigón armado. Con esto se obtiene un contexto histórico sobre la edificación en Chile, conociendo los principales indicadores que permiten evaluar el diseño. De esta forma, el posterior análisis a realizar sobre la muestra puede ser comparado con los resultados obtenidos en investigaciones anteriores.

Por otra parte, se hace una revisión general de las aplicaciones de Inteligencia Artificial dentro de la Ingeniería Civil, con la finalidad de ejemplificar las metodologías optadas para resolver problemas complejos en la profesión. Además, constituye una guía para su posterior aplicación en la muestra de estudio.

Capítulo 3: Recopilación y procesamiento de la muestra

En esta sección, se describe la totalidad de la información facilitada por la oficina de RLE. Luego, se exponen los atributos escogidos para ser incluidos en la base de datos. En cuanto a los planos de arquitectura e ingeniería, se describe el procedimiento seguido para rescatar la información de los muros estructurales y cómo, a partir de estos, se determinan atributos adicionales como la densidad de muros, inercias, entre otros. Por último, se listan todas las variables que componen la base de datos, con una descripción de qué característica del edificio representa cada una.

Capítulo 4: Descripción y análisis de edificios

Con la base de datos consolidada, se realiza un análisis en tres etapas: la primera consiste en una descripción general de la muestra como la ubicación de los proyectos, el número de pisos y clasificación normativa. La segunda etapa, es una análisis cuyo fin es caracterizar la muestra en torno a los principales indicadores señalados en la revisión bibliográfica. Por último, se estudian las modificaciones que tienen los proyectos entre la primera arquitectura y la última ingeniería, con el fin de cuantificar cambios en la cantidad y ubicación de muros.

Capítulo 5: Estimación del período con aprendizaje automático

Al conocer las principales propiedades geométricas de las estructuras que componen la base de datos, se propone aplicar herramientas de aprendizaje en máquinas o “Machine Learning” sobre la muestra y así obtener una expresión que permita estimar el período de vibración de una estructura en cualquier dirección de análisis.

Capítulo 6: Conclusión y comentarios finales

Finalmente, con lo obtenido del análisis de la muestra, se discuten los principales resultados en torno a la caracterización de edificios de hormigón armado. Para esto, se hace un contraste con valores obtenidos de estudios previos y de la comparación entre arquitectura e ingeniería. Además se discute la validez de la estimación del período con aprendizaje automático. Por último se hacen comentarios y propuestas de las futuras direcciones a seguir para la continuación del trabajo.

Capítulo 2

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Introducción

Los antecedentes que a continuación se exponen se dividen en dos partes. La primera corresponde a una recopilación de estudios e investigaciones realizadas con el fin de caracterizar la edificación en hormigón armado. La segunda parte, hace una revisión de diferentes aplicaciones de Inteligencia Artificial en la Ingeniería Civil y una descripción de “Machine Learning” o Aprendizaje Automático, un área dentro de la Inteligencia Artificial.

La revisión entorno a edificios en Chile permitirá entender lo que hoy se conoce como el “Edificio Chileno”, cuyos parámetros representativos como la rigidez H/T y densidad de muros, se encuentran dentro de rangos bien definidos. Esto permite definir un punto de comparación para los resultados que se obtengan una vez procesados los datos que componen la muestra en estudio.

Por su parte, el marco teórico en torno a la aplicación de IA dentro de la Ingeniería Civil tiene un carácter expositivo, es decir, muestra cómo las nuevas metodologías ofrecen soluciones óptimas a problemas complejos. Para esto, se describen de forma general en que consiste la IA y su auge en la última década. Además se realiza una descripción de Aprendizaje Automático, que corresponde al área más amplia dentro de la IA y que será utilizada posteriormente para estimar el período de edificios.

En definitiva, el objetivo del capítulo es exponer la bibliografía consultada que guía el trabajo de investigación, comenzando con las características de los edificios chilenos y luego describiendo en qué consiste la IA y sus aplicaciones. Esto último considera la utilización de estas metodologías para obtener nuevo conocimiento de los datos almacenados.

2.2. Caracterización de Edificios de hormigón armado en Chile

De los múltiples trabajos relacionados con la caracterización de edificios de hormigón armado, se destaca el Perfil Bio-sísmico de Guendelman et al. (1997). Este consiste en un instrumento que determina valores y rangos confiables para diferentes indicadores sísmicos, los cuales se sugieren emplear para la calificar el desempeño de un edificio frente a eventos sísmicos.

En un comienzo se utilizaron 585 proyectos (figura 2.1), los cuales fueron analizados en dos direcciones para definir 13 indicadores sísmicos. A través de los años, la base de datos se fue nutriendo con más proyectos llegando a un total 4105 edificios en su última versión, lo cual constituyen 8210 casos de análisis. Cabe destacar, que también se agregaron edificios de gran altura lo que ha permitido generalizar la validez de los indicadores más allá de los 30 pisos que constituían la primera muestra. Además, se aumentó el número de indicadores de 13 a 21 en total Guendelman et al. (2017).

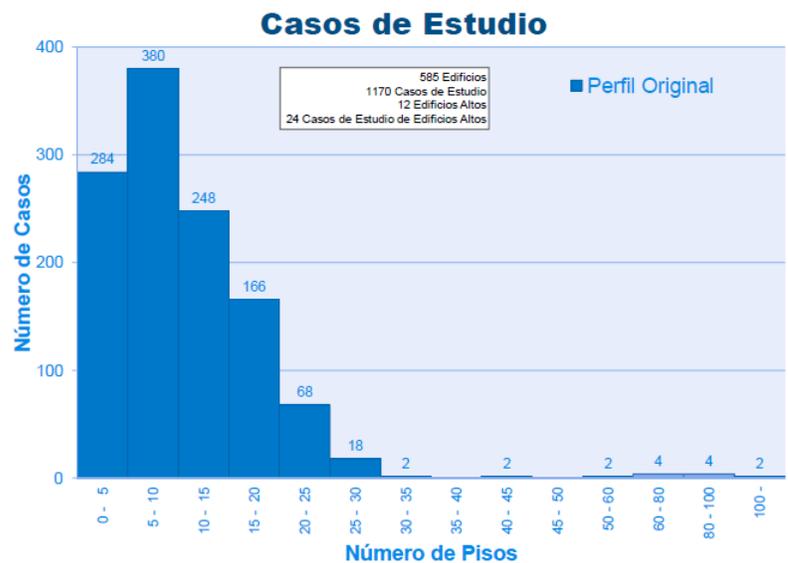


Figura 2.1: Histograma del Número de Pisos, muestra original de Perfil Bio-Sísmico (Guendelman, 2014)

A pesar de que no todos los indicadores se encuentran dentro de la normativa chilena, estos son ampliamente aceptados por los ingenieros estructurales de la región para evaluar la eficiencia y detectar problemas en la estructura (Lagos et al., 2019). Esto se debe a la validez que los indicadores presentan en cada actualización sobre una base de datos que actualmente es 7 veces más grande a la original.

En lo que respecta a los indicadores, estos se dividen en cuatro grupos: indicadores de rigidez; de acoplamiento ; de redundancia estructural y demanda de ductilidad; y de densidad de muros. A continuación se describen los indicadores asociados a cada grupo, a partir de la última actualización de Guendelman et al. (2017):

Indicadores de rigidez

Uno de los indicadores más importantes dentro de este grupo corresponde al cociente entre la altura y el período fundamental de vibración. Se definen diferentes rangos de valores según la altura y período considerados en el análisis (tabla 2.1).

- H/T : Con dimensiones de velocidad, este indicador considera la altura total de la estructura dividida por el período dominante de traslación en la dirección de análisis. Este indicador es utilizado en el análisis modal espectral definido por la norma sísmica y corresponde a la definición original para H/T definida en el primer Perfil Bio-sísmico. Guendelman et al. (1997).
- H_o/T : En este caso, H_o corresponde a la altura medida desde el nivel de terreno. Este indicador se utiliza cuando la rigidez de los subterráneos es lo suficientemente grande para concentrar los mayores desplazamientos en los pisos superiores. En general, éste representa de mejor forma los modos de vibración de la estructura (Lagos et al., 2012).
- H_o/T_{cr} : Se mantiene la definición para H_o sobre nivel de terreno, mientras que T_{cr} corresponde al período fundamental de vibración considerando elementos estructurales de hormigón agrietados. A partir de la normativa, se puede asumir $T_{cr} = 1,5T$, donde T es el período obtenido del análisis modal. Este indicador es importante para determinar la rigidez residual de un edificio tras un sismo de gran intensidad, en donde se consideran elementos de hormigón agrietados debido a las grandes sollicitaciones que sufre la estructura.

En las figuras 2.2 a 2.4 se expone la clasificación de los 8210 casos pertenecientes a la última actualización para los tres indicadores definidos anteriormente.

Tabla 2.1: Clasificación de rigidez de edificios, unidades en m/seg (Guendelman et al., 2017)

caso	fuera de rango	flexible	normal	rígido	fuera de rango
H/T	<20	20 a 40	40 a 80	80 a 150	>150
H_o/T	<16	16 a 32	32 a 64	64 a 120	>120
H_o/T_{cr}	<11	11 a 21	21 a 43	43 a 80	>80

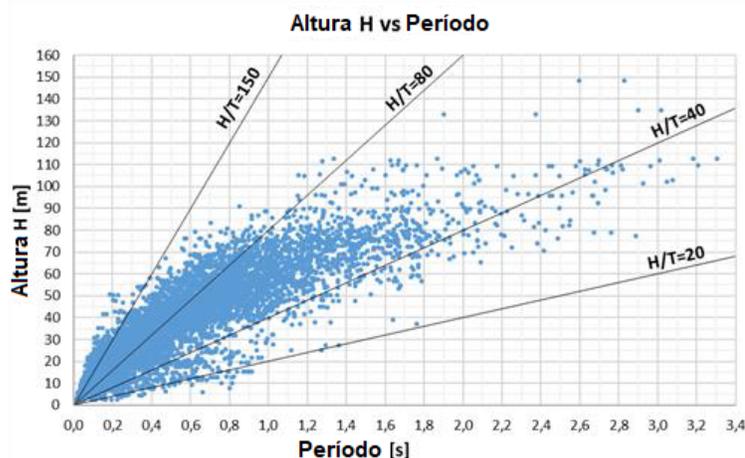


Figura 2.2: Altura total vs Período (Guendelman et al., 2017)

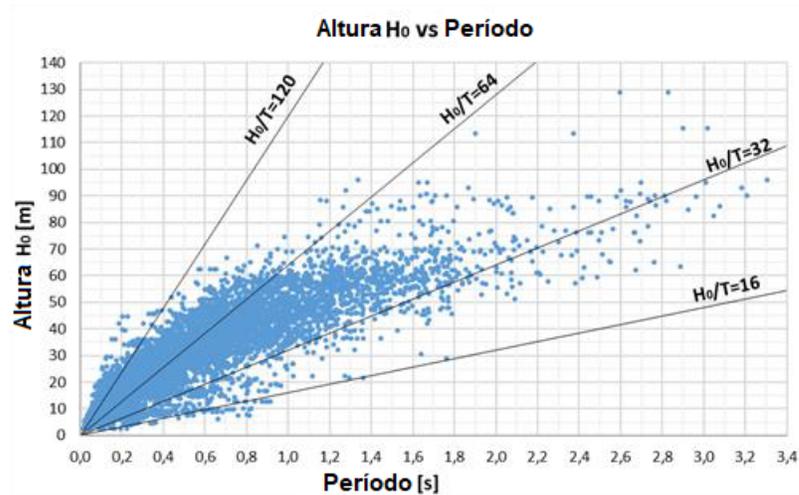


Figura 2.3: Altura sobre nivel de terreno vs Período (Guendelman et al., 2017)

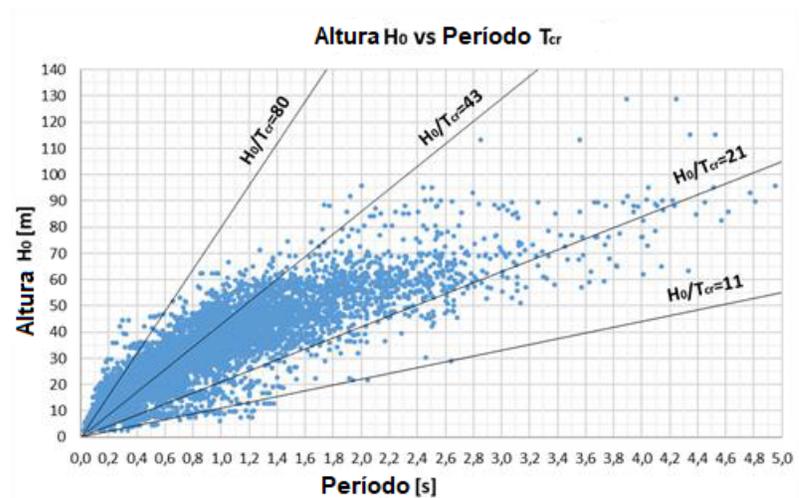


Figura 2.4: Altura sobre nivel de terreno vs Período fisurado (Guendelman et al., 2017)

- Efecto P- Δ : Corresponde al cociente entre el momento flector basal generado por los productos acumulados de los pesos de cada piso por sus respectivos desplazamientos laterales ($M_{P-\Delta}$), y el momento volcante basal (M_{base}) debido a la acción sísmica. Su efecto es ignorado para valores menores a 0.05, lo cual es ampliamente cumplido en los edificios chilenos (Guendelman et al., 1997).
- δ/H : Se define como el desplazamiento de techo resultante del análisis modal definido por la norma sísmica, dividido por la altura total de la estructura. Este parámetro no está de forma explícita en la norma, sino de forma indirecta mediante el control de los desplazamientos relativos. Los valores típicos se encuentran entre 1 y 2 por mil de la altura total en edificios flexibles, para edificios de rigidez normal en torno a 0.5 por mil. Se recomienda no estar bajo el 0.2 por mil, lo que se traduce en una rigidez excesiva de la estructura.
- δ/H_0 : A diferencia del indicador anterior, se define la altura desde el nivel de terreno. Además, éste permite definir el desempeño esperado de la estructura tal como se muestra en la tabla 2.7.

Tabla 2.2: Desempeño esperado a partir de la deriva total (Lagos et al., 2012)

Objetivo de Desempeño	Deriva
Completamente operativo	$d/H_o \leq 0.002$
operativo	$d/H_o \leq 0.005$
vida segura	$d/H_o \leq 0.015$

- δ_u/H_o : Desplazamiento de techo para elementos agrietados de hormigón armado, dividido por la altura desde el nivel de terreno, donde δ_u se define como (INN, 2011):

$$\delta_u = 1,3S_{de}(T_{cr}) \quad (2.1)$$

Donde S_{de} corresponde al espectro elástico de desplazamientos para un 5% de amortiguamiento:

$$S_{de} = \frac{T_n^2}{4\pi^2} \alpha A_o C_d^* \quad (2.2)$$

- $\delta_{\text{centro gravedad}}/h$: desplazamiento entre los centro de gravedad de pisos consecutivos, dividido por la altura entrepiso. A partir de lo señalado en el párrafo 5.9.2 de la norma sísmica, el valor límite para éste indicador es 2 por mil la altura de piso.
- $\delta_{\text{extremo}}/h$: Deriva entrepiso máxima adicional en los bordes, resultante del análisis sísmico. El párrafo 5.9.3 de la norma, limita el valor máximo respecto al de los centros de masa, a 1 por mil de la altura h .

Indicadores de acoplamiento

El objetivo de estos indicadores es evitar el fenómeno de sintonía modal, que corresponde a la amplificación de la respuesta dinámica debido a la similitud de los períodos traslacionales y rotacional. De esta forma se recomienda una diferencia del 20% entre los diferentes períodos.

Sin embargo, el hecho de considerar sólo el cociente entre los períodos es insuficiente al momento de evaluar el grado de acoplamiento. Para el efecto de acoplamiento rotacional se considera la masa rotacional acoplada como fracción de la masa traslacional directa, y la excentricidad dinámica que se define como el momento basal tursor dividido por el esfuerzo de corte basal. Para el acoplamiento traslacional, se registran valores para masas equivalentes traslacionales, acoplada y directa. Además, para los efectos del acoplamiento traslacional, se calculan esfuerzos de corte y de momento tanto acoplados como directos.

A continuación, se definen los indicadores asociados a éste grupo:

- $T_{\text{rotacional}}/T_{\text{traslacional}}$: Período fundamental rotacional dividido por el período fundamental traslacional (en la dirección de análisis).
- $T_{\text{traslacional acoplado}}/T_{\text{traslacional}}$: Cociente entre el período fundamental acoplado en la dirección de análisis y el período fundamental traslacional en la misma dirección.
- $Masa_{\text{rot. eq. acoplada}}/Masa_{\text{trasl. eq. directa}}$: Cociente entre la masa rotacional acoplada equivalente y la masa traslacional directa equivalente, ambas para el modo traslacional predominante en la dirección de análisis.

- $M_{\text{trasl. eq. acoplada}}/M_{\text{trasl. eq. directa}}$: Cociente entre la masa traslacional acoplada equivalente y la masa traslacional directa equivalente, ambas para el modo traslacional predominante en la dirección de análisis.
- $Q_{\text{basal acoplado}}/Q_{\text{basal directo}}$: Corte basal acoplado dividido por el corte basal directo, resultantes de la combinación de cargas definida por la norma sísmica.
- $M_{\text{basal acoplado}}/M_{\text{basal directo}}$: Momento volcante basal acoplado dividido por el momento volcante basal directo, resultantes de la combinación de cargas definida por la norma sísmica.
- $(M_{\text{basal directo}}/Q_{\text{basal directo}}/H)$: Altura de corte resultante dividida por la altura total del edificio. La altura de corte resultante corresponde al cociente entre el momento volcante directo y el corte directo, ambos en la base para la misma dirección de análisis.
- $(M_{\text{torsional directo}}/Q_{\text{basal directo}}/H)$: Excentricidad dinámica dividida por la altura total del edificio. La excentricidad dinámica se define como el cociente del momento torsional en la base alrededor del eje vertical y el corte directo en la dirección de análisis.

Indicadores de redundancia estructural y demanda de ductilidad

- Número de elementos relevantes en la resistencia sísmica: La redundancia estructural es un parámetro asociado a la redistribución de esfuerzos en la estructura. De esta forma, el número de elementos permite conocer las reservas de resistencia que se poseen una vez que ciertos miembros se encuentren en el rango no lineal.
- Factor de Reducción Espectral Efectivo (R^{**}): La dificultad de realizar un análisis no lineal en edificios, conlleva analizar el edificio suponiendo un comportamiento lineal y elástico. Para ello, se determina un factor que modifica la acción sísmica y establece un sismo de diseño en base a la ductilidad que presenta la estructura, limitado por el corte mínimo y máximo.

En general, R^{**} está bajo 7 y con una alta concentración cercano a 4. Además, de acuerdo a la práctica chilena se establece los siguientes criterios durante el diseño (Guendelman et al., 1997):

- Para $R^{**} \leq 3$ no es necesario una verificación.
- Para R^{**} entre 3 y 7 se sugiere el uso de procedimientos tipo carga-desplazamiento, con una demanda definida por el espectro elástico de aceleraciones.
- Para $R^{**} \geq 3$ es imprescindible un análisis Tiempo-Historia

La tendencia muestra que para estructuras con período natural bajo 1.5 *seg* los valores de R^{**} se encuentra entre 1 y 4. Para edificios con períodos cercanos a 0.5 *seg*, la zona donde controla el corte mínimo, se observan valores de R^{**} entre 4 y 5.5 (Lagos et al., 2012).

Densidad de muros

- Densidad de muros para control de compresión (d_{np}): área de la sección transversal de muros en una dirección en cualquier piso, dividido por el peso total encima de este.

En los últimos 25 años, la figura 2.5 muestra un valor promedio cercano a 0.002 $m^2/ton.f$ con un mínimo de 0.001 $m/ton.f$. Además se observa que ha decaído a través del tiempo, esto se debe al aumento del número de pisos en los edificios modernos, en lo cuales se mantiene la misma densidad de muros en planta pero aumenta el peso total de la

estructura.

Por otra parte, el inverso de d_{np} tiene unidades de presión ($tonf/m^2$) y está directamente relacionado con la compresión promedio y corte sísmico que actúa en los muros. Por lo tanto, una reducción en el valor de la densidad de muros, implica un incremento de la compresión y corte (Lagos et al., 2017).

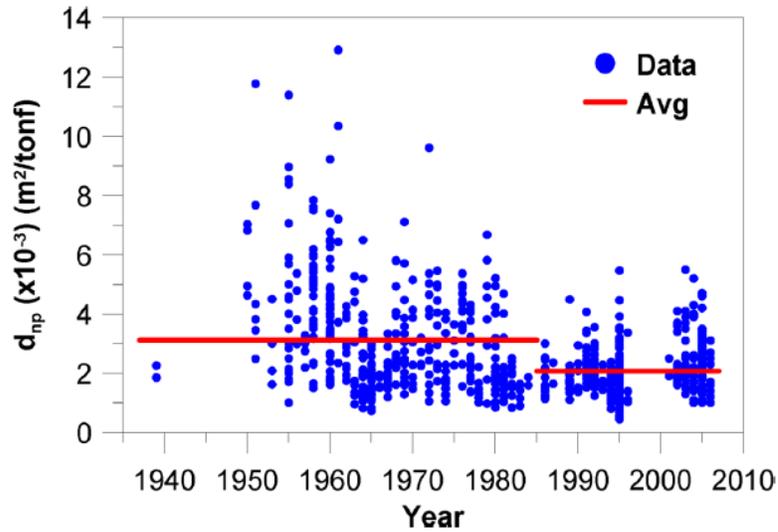


Figura 2.5: Área de muros/Peso total sobre primer piso (Gómez, 2001; Calderón, 2007)

- Densidad de muros para control del corte: área de muros en una dirección dividido por el área de planta para un mismo piso. Viéndolo en porcentajes, se recomienda un área de muros igual o superior al 2% del área en planta. En la figura 2.6 se observa que la densidad se mantiene constante a través del tiempo con valores dentro del 2 y 4%.

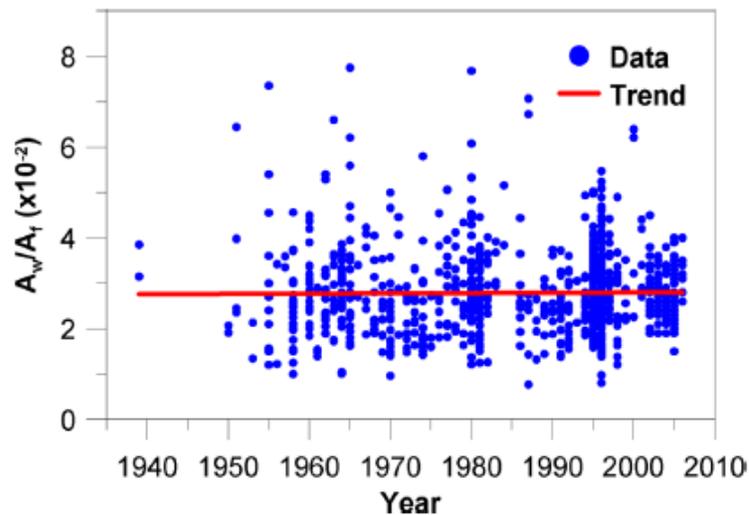


Figura 2.6: Área de muros/Área de planta en primer piso (Gómez, 2001; Calderón, 2007)

Finalmente, en la tabla 2.3 se muestran los rangos normales asociados a cada indicador y valores aceptables que están fuera de dichos rangos. Todos los valores corresponden a los

indicados en la última actualización hecha del Perfil Bio-sísmico.

Tabla 2.3: Rango de valores actualizados para indicadores (Guendelman et al., 2017)

INDICADORES	RANGO NORMAL	VALORES ACEPTABLES LIGERAMENTE ALEJADOS DE RANGOS NORMALES
RIGIDEZ		
1. H/T [m/s]	40 - 80	20-40 y 80-150
2. H_o/T [m/s]	32-64	16-32 y 64-120
3. H_o/T_{cr} [m/s]	21-43	11-21 y 43-80
4. $M_{P-\Delta}/M_{basal}$	0-0.1	
5. $1000 \delta/H$	$\leq 2,0\%$	
6. $1000 \delta/H_o$	$\leq 2,0\%$	
7. $1000 \delta_u/H_o$	$\leq 10,0\%$	10,0% - 15,0%
8. $1000 \delta_{centrogravedad}/h$	$\leq 2,0\%$	
9. $1000 \delta_{extremo}/h$	$\leq 1,0\%$	
ACOPLAMIENTO		
10. $T_{rotacional}/T_{traslacional}$	0-0.8	0.8-1.4
11. $T_{trasl. acopl.}/T_{traslacional}$	0-0.8 y 1.2-1.5	0.8-1.2 y 1.5-2.0
12. $Masa_{rot. eq. acopl.}/Masa_{trasl. eq. dir.}$	0-0.5	$\leq 1,0$
13. $Masa_{trasl. eq. acopl.}/Masa_{trasl. eq. dir.}$	0-0.5	$\leq 1,0$
14. $Q_{basal. acopl.}/Q_{basal. dir.}$	0-0.4	$\leq 1,0$
15. $M_{basal. acopl.}/M_{basal. dir.}$	0-0.5	$\leq 1,0$
16. $(M_{basal. dir.}/Q_{basal. dir.})/H$	40 %-90 %	20 %-40 % y 90 %-100 %
17. $(M_{tors. dir.}/Q_{basal. dir.})/H$	$\leq 30 \%$	
REDUNDANCIA Y DUCTILIDAD		
18. Número de ejes resistentes	≥ 3	2-3
19. R^{**}	≤ 4	4-6 (pushover) ≥ 6 (no lineal dinámico)
DENSIDAD DE MUROS		
20. Control de compresión (d_{np})	$\geq 0,1 \%$	
21. Control del corte	$\geq 2 \%$	

Cabe destacar que existen indicadores que están relacionados entre sí. Un ejemplo de lo anterior es el Espectro de Desempeño que muestra la relación inversa entre el desplazamiento de techo y el parámetro H/T (figura 2.7). Ahora bien, pese a que existe una relación entre los indicadores, no es posible prescindir de alguno pues todos logran detectar a tiempo distintos problemas en la estructuración de proyectos.

Del trabajo hecho por Henocho (2007), se observó que los indicadores del Perfil siguen teniendo validez incluso para edificios de gran altura como la Torre Jin Mao en Shangái, Torre Taipéi 101 en Taiwán y Torres Petronas ubicadas en Malasia. Lo anterior considera los rangos presentados anteriormente que indican un buen desempeño de la estructura. En particular, el parámetro H/T sigue teniendo validez y logra una clasificación exitosa de los edificios analizados.

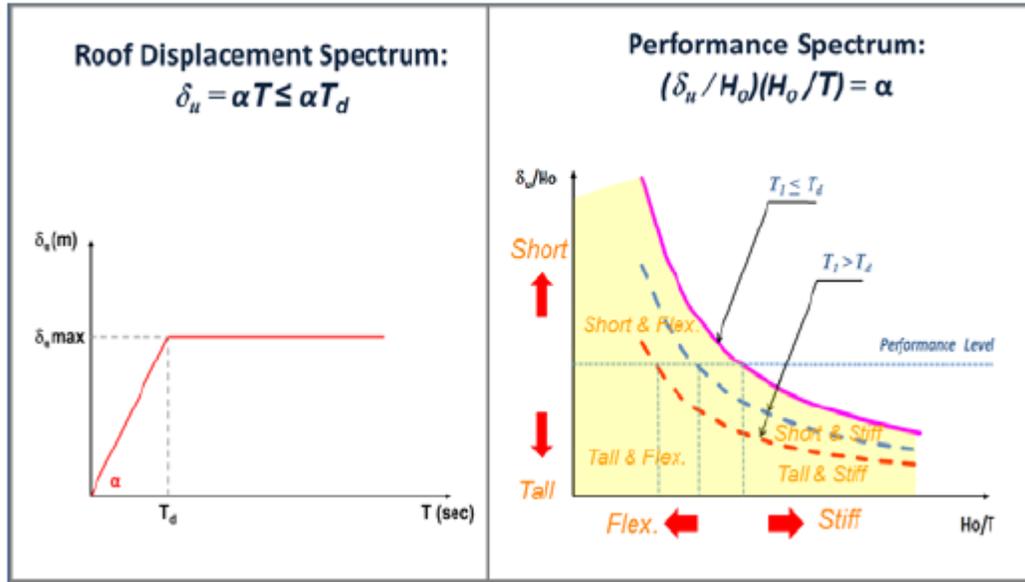


Figura 2.7: Concepto del espectro de desempeño (Lagos et al., 2017)

De este modo, el denominado “Edificio Chileno” es asociado a estructuras de hormigón armado cuyos indicadores sísmicos se encuentran dentro de los rangos aceptables. A su vez, en función al uso del edificio, se distinguen dos grupos de edificios: residenciales y de oficina, los cuales se describen a continuación.

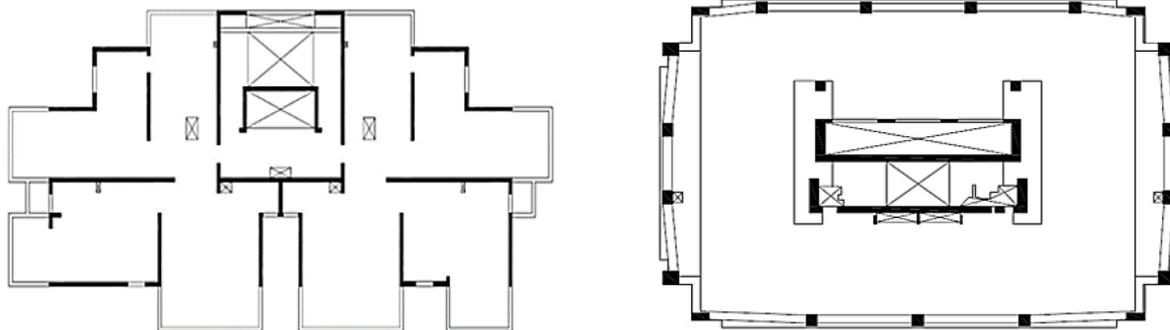
- Los edificios residenciales poseen un sistema de piso compuesto por una losa de hormigón armado con un espesor entre los 14 y 18 centímetros que es soportada por muros de corte y vigas perimetrales. El sistema de cargas tanto lateral como vertical son de muros de hormigón armado (figura 2.8a).
- Los edificios de oficina tienen un sistema de piso compuesto por losas postensadas con espesor entre los 17 y 20 centímetros. El sistema de cargas tanto lateral como vertical corresponde a un núcleo de muros de hormigón armado y un marco especial resistente a momento en el perímetro (figura 2.8b).

Por lo tanto la principal diferencia entre ambos está en una menor cantidad de muros en edificios de oficina pero con un mayor espesor, en comparación a los residenciales.

Lagos et al. (2017) describe el procedimiento usual seguido por los ingenieros estructurales del país durante el proceso de estructuración y diseño de un edificio:

- Realizar un análisis modal espectral preliminar escalado al corte mínimo en la base.
- Verificar desplazamientos en cada piso, lo cual se relaciona con la densidad de muros.
- Afinar espesores de muros a partir de los esfuerzos de compresión y corte límites definidos por la norma.

Lo anterior se aplica sobre el arreglo de muros definido en la etapa conceptual, el cual incorpora requerimientos arquitectónicos asociados al uso de espacio dentro del edificio. En particular, los estacionamientos a nivel del primer piso implican una reducción del 30 a 40 % del área en muros, lo cual genera una irregularidad importante sobre la rigidez vertical.



(a) Edificio Residencial

(b) Edificio de Oficina

Figura 2.8: Edificios de hormigón armado típicos en Chile (Lagos et al., 2012)

Dentro de los primeros estudios que permitieron definir las características propias de la edificación chilena, se destaca el de Sharon Wood (1991) quien estudió 234 estructuras entre 6 y 23 pisos en Viña del Mar luego del terremoto del año 1985. Una de las principales observaciones hechas es la predominancia de sistemas de muros de hormigón armado en los edificios para resistir las cargas verticales y horizontales.

De esta manera, Wood señala que la densidad de muros, que se encuentra entre el 2 y 4 % en el 70 % de la muestra, es relativamente alta en comparación con edificios de similar altura en EE.UU. Esto indica que los muros estructurales proveen la suficiente rigidez para limitar los desplazamientos y por lo tanto, el daño causado por el sismo.

También, señala que considerando una suficiente área de muros disminuyen los requerimientos de elementos de borde. Por lo tanto, debido al excelente desempeño observado en el terremoto de 1985, se concluye que la filosofía de diseño seguida por los ingenieros en Chile es una alternativa razonable al seguido en EE.UU. En éste último, el código en esa época se centraba en un detallamiento riguroso del refuerzo para asegurar una respuesta dúctil para ciclos de grandes desplazamientos, mientras que estos detalles eran menores en Chile al aumentar el número de elementos resistentes.

Luego de la investigación anterior y la posterior definición del Perfil Bio-Sísmico, siguieron una serie de estudios sobre las diferentes tipologías en el diseño de edificios existentes en Chile. Una línea de investigación comienza con **Guzmán (1998)**. Éste tuvo por objetivo estudiar los diferentes sistemas estructurales utilizados en el diseño de edificios altos en Chile.

Para la investigación se analizaron 420 edificios construidos entre 1953 y 1998. De los cuales un 76.9 % correspondían a muros de rigidez, un 18.7 % a marcos con muros y 2.2 % a muros con marcos de fachada. Para todos estos, se estudió el indicador de rigidez H/T , la densidad de muros d (área de muros en una dirección/área de planta) y d_{np} (área de muros en una dirección/número de pisos * peso del piso).

Se destacó la alta densidad de muros como una característica propia de la ingeniería nacional, lo que aplica a todas las tipologías desarrolladas en el país. El 80 % de los edificios

presentaba valores de d en el rango 0.015-0.035, los cuales se mantenían constantes entre 1971 a 1998. Por su parte, el parámetro d_{np} también se mantuvo constante con un rango $(1-2.5)10^{-3} m^2/tonf$.

La principal conclusión de esto fue que el área de muros aumentó de forma proporcional con el número de pisos de los proyectos. Dentro de las posibles razones, está el valor límite del esfuerzo de corte, impuesto por la norma de hormigón armado, bajo la cual no era necesario disponer de armaduras resistentes al corte. De esta forma, nace la práctica de disponer una mayor cantidad de muros, con la finalidad de armar con el refuerzo mínimo los muros. Notar que esto fue señalado por Wood (1991) al analizar los edificios en la ciudad de Viña del Mar.

Por otro lado, para el parámetro H/T , se observó que el 93 % de los edificios se mantuvo en las categorías de rigidez normal, rígidos y extremadamente rígidos, con valores superiores a 40 m/seg . Con esto, se concluyó que la rigidez de los edificios chilenos no presentaba variaciones significativas, manteniéndose dentro de los rangos tradicionales observados.

El trabajo hecho por Guzmán continuó con **Gómez (2001)** quien hizo una caracterización de sistemas estructurales en viviendas de hormigón armado y albañilería reforzada. Para esto, se aumentó la cantidad de proyectos en un 53 % llegando a 640 edificios de hormigón armado construidos entre los años 1939 y 2000. Para estos proyectos se hizo un análisis cuantitativo de los mismos indicadores sísmicos evaluados por Guzmán, es decir, la densidad de muros y el parámetro de rigidez H/T .

En cuanto a la distribución de la muestra, se determinó que un 76.7 % corresponden a edificios de muros de rigidez, 21.6 % a edificios de marcos-muros y un 1.7 % a otras tipologías. Estos valores son similares al estudio anterior, en donde existe una predominancia de edificios con sistema estructural conformado por muros resistentes a corte y compresión.

Para los parámetros de la densidad de muros y H/T no se observan grandes cambios. En efecto, un 95 % de los edificios de muros de rigidez y un 76 % de los edificios marcos-muros tenían valores sobre 0.015 para la densidad de muros en una dirección de análisis, con un promedio de 0.028 en toda la muestra, un mínimo de 0.008 y máximo de 0.078. Para la rigidez un 95 % y 85.5 % se clasificaban como normal y rígidos con valores de H/T entre 40 y 150 m/seg para edificios de muros de rigidez y marcos-muros respectivamente.

Por último **Calderón (2007)** realiza la última actualización de tipologías estructurales en edificios de hormigón armado. Para ello, analiza 124 edificios de la comuna de Ñuñoa, construidos entre los años 2001 y 2006. De las conclusiones obtenidas se tiene el promedio constante en el tiempo para la densidad de muros. Para el parámetro d_{np} se observa una tendencia a la baja producto de la que la densidad de muros se mantiene constante pero ha aumentado el número de pisos de los edificios chilenos. En lo que respecta a la rigidez H/T , se observó una tendencia moderada a disminuir en el tiempo con mayor dispersión entre los valores extremos desde 1990.

En síntesis, de los trabajos realizados con la finalidad de caracterizar las tipologías estructurales en edificios en hormigón armado, se concluye lo siguiente:

- De los principales tipos de sistemas estructurales para edificios de hormigón armado, se

observa que predomina el uso de muros de rigidez. En efecto, de los trabajos de Guzmán y Gómez, más de un 75 % de los edificios chilenos presenta éste tipo de sistema destinado al uso habitacional.

- Tal y como señaló Sharon Wood en 1991, los edificios en general poseen una alta densidad de muros sobre el 1.5%. Además, es un parámetro que se ha mantenido constante a lo largo del tiempo. En particular, para sistema de muros de rigidez los valores se concentran en mayor medida entre el 2 y 3% debido al alto número de elementos estructurales dispuestos en planta.
- La rigidez representada por el indicador H/T pese a tener una tendencia leve a la baja, en el 95% de la muestra total corresponde a edificios clasificados de rigidez normal a rígidos.
- De éste modo, se infiere que la densidad de muros y H/T son buenos indicadores para asegurar un buen comportamiento sísmico de los edificios de hormigón armado.

2.3. Revisión de métodos de Inteligencia Artificial en Ingeniería Civil

En primer lugar, la Inteligencia Artificial (IA) se puede definir como la “rama de las ciencias computacionales encargada de estudiar modelos de cómputo capaces de realizar actividades propias de los seres humanos en base a dos de sus características primordiales: el razonamiento y la conducta.” (López, s.f.). Debido a esto, la IA se ha desarrollado en base a la interacción de múltiples disciplinas: ciencias de la computación, teoría de la información, cibernética, lingüística y neurofisiología. Un ejemplo corresponde al Aprendizaje en Máquinas, un área dentro de la IA, cuya finalidad es otorgar la habilidad de aprender a una máquina sin ser explícitamente programada.

En lo que respecta a la Ingeniería Civil, muchos problemas de diseño, gestión de la construcción y toma de decisiones dependen no solo con los modelos matemáticos, físicos y mecánicos, sino que también dependen de la experiencia del ingeniero a cargo. Sin embargo, existen problemas cuya complejidad generan fallas y tiempos excesivos de cálculo con los métodos tradicionales. Además, el conocimiento de un único individuo entrega una respuesta incompleta y sesgada, limitada solo al aprendizaje individual. Es así como la IA es superior por el hecho de que puede resolver problemas complejos a nivel de expertos por medio de imitar a expertos (Lu et al., 2012).

La última revisión sobre las técnicas y aplicaciones de IA en Ingeniería Civil fue realizada por Salehi y Burgueño (2018) a partir de 282 artículos publicados en la última década, en la cual se da mayor énfasis a las ramas de IA que más crecimiento tuvieron en la última década correspondientes al Reconocimiento de Patrones y Aprendizaje Automático. El resumen general de IA expuesto en esta revisión, permite entender las diferentes áreas en torno a la Inteligencia Artificial.

En efecto, primero se señalan los dos tipos de inteligencia en máquinas: “hard computing” y “soft computing”. El primero es el enfoque tradicional utilizado en computación que requiere de un modelo analítico preciso. En cambio, el segundo trabaja sobre información ambigua e inexacta, entregando respuestas aproximadas. Por lo tanto “soft computing” es un sinónimo de Inteligencia Computacional (IC).

Se destacan 3 grandes áreas interrelacionadas dentro de la IC: Big Data, Minería de Datos (Data Mining) e Inteligencia Artificial (Intelligence Artificial) (figura 2.9). El Big Data se refiere a grandes conjuntos de datos cuya representación es difícil con las técnicas habituales. Por su parte, la Minería de Datos es un campo interdisciplinario usado para descubrir conocimiento y tendencias en un conjunto de datos.

Una área importante y más amplia dentro de la IA corresponde al Aprendizaje Automático (AA), Aprendizaje en máquinas o “Machine Learning” en inglés, el cual tiene por objetivo desarrollar algoritmos de aprendizaje prescindiendo en gran medida de la intervención humana. Dentro de AA se encuentra “Deep Learning” que se asocia a resolver problemas más intuitivos (y fáciles) para los humanos pero difíciles para una máquina como reconocimiento de imágenes, traducción de texto, reconocimiento de voz, entre otros (Tobar, 2019).

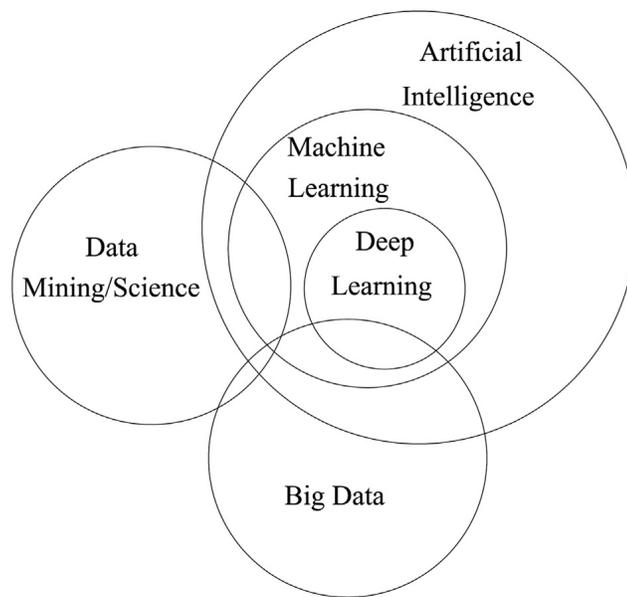


Figura 2.9: Interrelación de diferentes técnicas de inteligencia computacional (Salehi y Burgueño, 2018)

De todas las ramas de IA utilizadas en ingeniería civil, dentro de las que muestran un aumento notorio de su uso en los últimos 10 años corresponde precisamente al aprendizaje automático (figura 2.10). Esto se debe a los avances en los algoritmos utilizados en este campo, por ejemplo, de redes neuronales artificiales que a comienzos del 2000 tuvo un nuevo resurgimiento, donde el área se renombró deep learning (Tobar, 2019).

A continuación se describen las principales características del Aprendizaje Automático; sus aplicaciones en campos de la ingeniería civil en la última década; y una metodología propuesta para aplicaciones prácticas en ingeniería.

Aprendizaje Automático (AA)

- Características generales

Tal y como se mencionó anteriormente, el AA trata con el estudio, diseño y desarrollo de algoritmos que puedan aprender de datos y realizar predicciones a partir de estos. Para esto, se requiere la capacidad de las computadoras para aprender sin ser explícitamente programadas (Salehi y Burgueño, 2018).

Existen tres principales tipos de aprendizaje: supervisado, no supervisado y reforzado (Alpaydin, 2014). En el aprendizaje supervisado se conocen tanto la variable de salida a predecir como las variables de entrada con las cuales se entrena el modelo. De este modo, es el usuario quien define explícitamente qué se va a predecir y los atributos que pudiesen estar relacionados. Si el objetivo es predecir una variable categórica, el problema se conoce como “clasificación”. En cambio si la variable es continua el problema corresponde a una “regresión”.

En contraste, en el aprendizaje no supervisado los datos no vienen etiquetados entre variables de entrada y de salida. El objetivo es encontrar regularidad en los datos y exhibir grupos

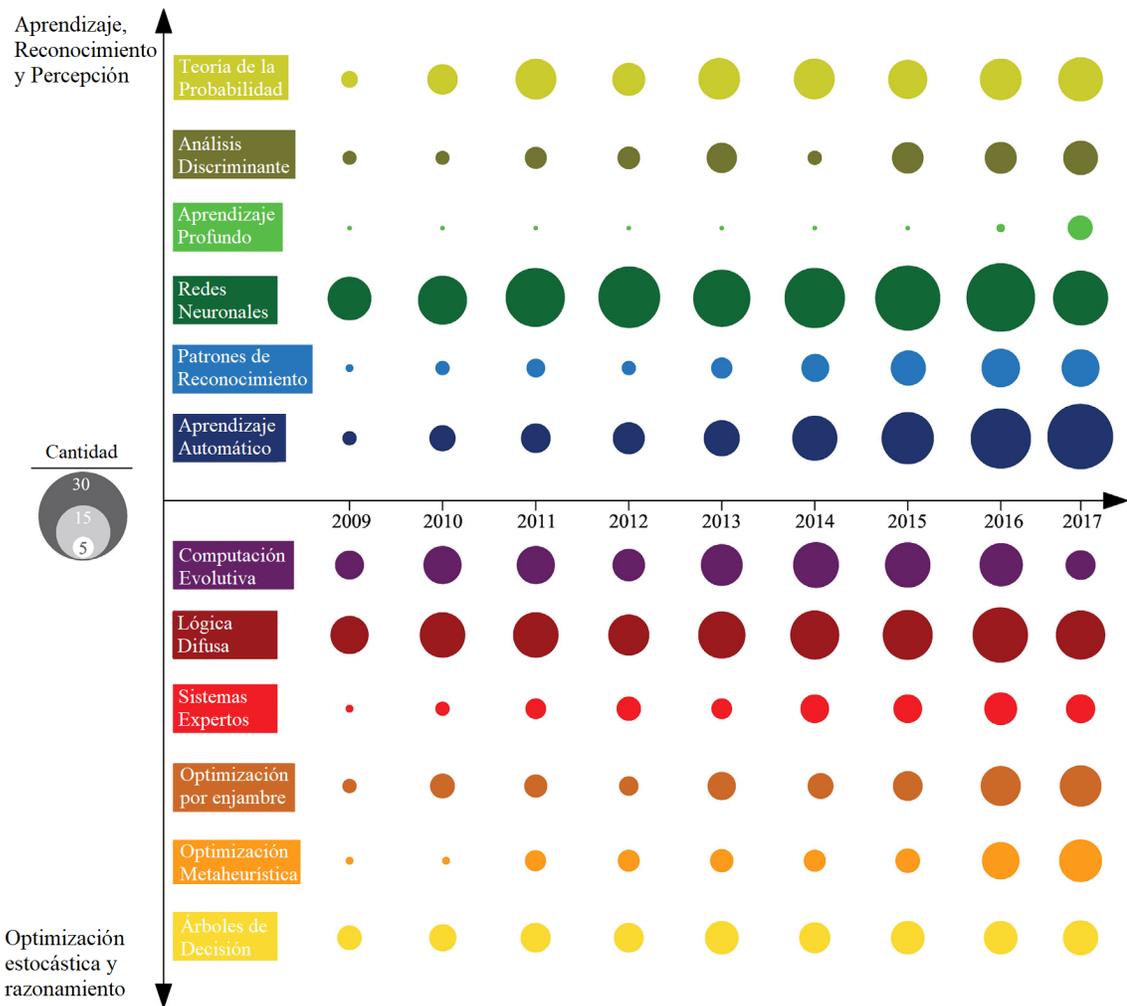


Figura 2.10: Publicaciones de investigación sobre el uso de diferentes ramas de IA en ingeniería civil (Salehi y Burgueño, 2018)

de datos que estén más relacionados que otros. En estadística esto se denomina estimación de densidad. Un método conocido corresponde al “Clustering” donde el objetivo es encontrar grupos dentro de los datos aplicando diferentes métricas de distancia entre estos.

Por último, en el aprendizaje reforzado los algoritmos son forzados para aprender mediante prueba y error mediante la maximización de un función de recompensa. De esta forma, mediante una serie de iteraciones en el tiempo se redefinen las reglas de asociación entre los atributos. Este tipo de aprendizaje es probablemente el más cercano a la forma en que los animales piensan. Por ejemplo, cuando un perro es entrenado para que aprenda un truco recompensándolo cada vez que la tarea se realiza correctamente (Tobar, 2019).

- *Aplicaciones en Ingeniería Civil*

En un comienzo, se utilizaron algoritmos de aprendizaje como herramienta en la seguridad estructural y diseño de estructuras de acero. En general, los métodos han sido usados en monitoreo de salud estructural y detección de daño, optimización, evaluación de desempeño y modelación de las propiedades de materiales como el hormigón. De todos estos, el monitoreo

de salud estructural y modelación de propiedades del hormigón han sido las más desarrolladas en la última década (Salehi y Burgueño, 2018).

- Monitoreo de salud estructural (MSE):

El MSE corresponde al monitoreo a través de datos recolectados de sensores, extrayendo características de sensibilidad del daño e interpretando dichas características para la evaluación de la estructura.

El desarrollo de este campo tiene dos enfoques: uno basado en modelos y otro en datos. El primero es una aproximación que se obtiene gracias a un modelo numérico de la estructura. Por ejemplo, basado en elementos finitos, del cual se correlacionan inconsistencias entre la medición y los datos del modelo para detectar daño. En cambio, el segundo enfoque utiliza datos observados para construir modelos con aprendizaje automático. Para esto es necesario tener un gran volumen de información; conocer las variables físicas del problema; y conocer el costo computacional para resolverlo.

En monitoreo estructural los algoritmos utilizados incluyen redes neuronales artificiales, máquinas de soporte vectorial, entre otros. Estos son usados debido a su eficiencia y robustez frente a información escasa, con ruido e incierta. Un ejemplo corresponde al estudio de efectos ambientales en los datos registrados en los sensores instalados en estructuras. Otro uso es la detección de daño a partir de imágenes en elementos estructurales utilizando deep learning.

Cabe destacar que la mayoría de trabajos publicados tratan con problemas pequeños o de tipo académico. Traspasar las tecnologías desde ejemplos académicos a grandes estructuras de la vida real presentan múltiples desafíos como el número de sensores y cantidad de datos necesarios de recolectar.

- Propiedades mecánicas del hormigón:

Para conocer las tensiones límites y otras propiedades del hormigón se han propuesto regresiones lineales y no lineales para disminuir costos asociados a ensayos. Sin embargo, las propiedades del hormigón son desconocidas al tener relaciones no lineales entre sus componentes y del material a nivel macroscópico. Pese a ello, el desarrollo de modelos de confianza son interesantes de explorar para optimizar costos y tiempos.

Numerosos algoritmos como redes neuronales y vectores de soporte han sido usados para desarrollar modelos precisos que permitan pronosticar las propiedades del hormigón. Su aplicación más destacada corresponde a la modelación de las propiedades del hormigón auto-compactante y la modelación de los esfuerzos de tracción y compresión límites del hormigón tradicional.

- *Metodología para la aplicación de AA en ingeniería*

Por último, considerando el objetivo de estimar el período de un edificio a partir de sus propiedades geométricas, se expone la metodología propuesta por Reich (1996) para aplicaciones prácticas de aprendizaje automático en ingeniería. El procedimiento consta de siete pasos que se describen a continuación:

1. Análisis del problema: Este punto está orientado a establecer el problema a tratar; aislar partes del problema que se pueden resolver con aprendizaje automático; e identificar qué aspectos se pueden ver beneficiados. Para esto es necesario conocer y poseer la cantidad de información apropiada y el conocimiento necesario en torno al problema en estudio.
2. Recolección de datos y conocimiento: Usualmente los datos mejoran la comprensión del problema, incluso una comprensión razonable no se alcanza hasta haber recopilado y estudiado los datos. Estos pueden ser recolectados de diferentes fuentes: expertos, datos históricos, simulaciones o datos experimentales. Problemas de la recolección de datos son: el tamaño de la muestra, que debe ser lo suficientemente grande para generalizar los resultados; y la distribución de los datos respecto a las diferentes clases en estudio.
3. Creación de representaciones del problema, datos y conocimiento: Esta etapa consiste en el pre-procesamiento de la información cuyo fin es identificar atributos relevantes y de esta forma, reducir la dimensionalidad del problema. Buenas representaciones de los datos son claves para obtener una solución del problema y un correcto aprendizaje.
4. Selección del método de aprendizaje: La selección se basa en el problema formulado en los pasos anteriores. De este modo todo sistema de aprendizaje debe tener en cuenta diferentes aspectos como la complejidad de presentar los datos de entrada; la habilidad de tratar con ruido y valores faltantes; y la complejidad computacional del algoritmo.
5. Selección de parámetro y opciones del método: a partir del método seleccionado, en caso de ser necesario, se deben calibrar parámetros internos (por ejemplo: número de iteraciones).
6. Evaluación e interpretación de resultados: Elección de una metodología para evaluar el algoritmo independiente de los datos de entrenamiento y prueba. Así, es posible identificar si existe sobreajuste en el modelo.
7. Aplicación de solución: Aplicar modelo a casos reales con el fin de generalizar los resultados obtenidos.

Capítulo 3

RECOPILOCIÓN Y PROCESAMIENTO DE LA MUESTRA

3.1. Introducción

La muestra de edificios para este trabajo fue facilitada por la oficina de cálculo estructural René Lagos Engineers (RLE). En total se cuenta con 171 proyectos de hormigón armado destinados al uso habitacional realizados entre los años 2003 y 2018. En lo que respecta a la información, se poseen planos de planta en formato AutoCAD tanto de ingeniería como de arquitectura del primer subterráneo, primer piso y piso tipo. Además se posee información relacionada con la descripción de la estructura (código interno y ubicación, altura, número de pisos, irregularidades estructurales, entre otros), clasificación normativa y propiedades dinámicas.

Una vez que se tiene toda la muestra, es necesario filtrar la información más relevante para el análisis e incluirla en la base de datos generada en MATLAB. En éste caso, se considera la ubicación, número de pisos, altura, clasificación normativa y las propiedades dinámicas. En el caso de los planos en AutoCAD, se rescatan las coordenadas de los polígonos que representan tanto los muros como la planta en cada piso. De esta forma, es posible incluirlos en la base de datos.

Por otra parte, al conocer la ubicación y forma de los muros en planta, es posible obtener propiedades geométricas para cada piso como las áreas e inercias de los muros y la densidad de estos en cada dirección de análisis. Notar que éste último parámetro ha sido estudiado en investigaciones previas, demostrando que posee valores con rangos bien definidos en edificios chilenos.

De esta forma, el objetivo de este capítulo es describir el procedimiento llevado a cabo para la generación de la base de datos. Lo anterior corresponde a la selección de información relevante para el estudio desde la muestra inicial; el procesamiento de los planos de planta y el cálculo de propiedades geométricas de muros estructurales.

3.2. Información de muestra RLE

La recopilación de información se realiza de forma presencial en la oficina de RLE, en donde se extraen directamente del servidor los planos asociados a cada proyecto en formato AutoCAD. Los proyectos corresponden a 171 edificios habitacionales de hormigón armado sobre 5 pisos. Todos poseen un sistema estructural de muros de rigidez.

De esta forma, se extraen planos en planta del primer subterráneo (si es que tiene), primer piso y piso tipo. Esto se realiza para la primera propuesta de arquitectura y la última revisión de ingeniería. De esta forma se podrá cuantificar las modificaciones que se realizan en el proceso de estructuración para edificios con estas características. Para esto se tiene en cuenta que la arquitectura inicial de un proyecto no contempla un análisis estructural, como sí lo posee la última ingeniería en la cual se chequean los desplazamientos de la estructura y esfuerzos sobre los muros, lo que define los espesores finales. Sin embargo, la estructuración suele considerar la disposición hecha por el arquitecto en cuanto al uso de espacios, como departamentos, estacionamientos, terrazas, entre otros.

Dado que los planos recopilados no permiten caracterizar en forma global cada edificio, también se cuenta con datos descriptivos de cada proyecto almacenados en la base de datos interna de la oficina. Esta se obtiene en formato Excel y ordenada de la siguiente forma:

- Identificación de la edificación
 - Código interno
 - Ubicación espacial, ciudad y Región
- Descripción de la estructura
 - Características de la estructura: Número de pisos y subterráneos, altura, altura entrepiso típica, espesor de losa, etc.
 - Uso predominante de la edificación
 - Posibilidad de golpeteo con edificaciones adyacentes
 - Sistema Estructural
 - Año de Construcción
 - Irregularidades Estructurales existentes
 - Forma de la estructura en la planta típica
 - Sistema no estructural de fachada y muros divisorios
 - Descripción de escaleras
 - Sistema de fundación
- Clasificación Normativa y propiedades dinámicas
 - Clasificación según NChOf96 Mod. 2009 + D.S.61
 - Propiedades dinámicas
 - Parámetros representativos
 - Demanda sísmica

Del listado anterior, las propiedades dinámicas y demandas sísmicas se extraen del último modelo en ETABS generado para el edificio, mientras que el resto de los datos se obtiene de forma visual de los diferentes planos.

A partir de la muestra recopilada, se decide crear una base de datos en MATLAB, que incorpore los parámetros más relevantes para el análisis en torno a la caracterización de edificios. A continuación, los parámetros seleccionados:

- Descripción y caracterización de la estructura: código de proyecto, sistema estructural, altura total, altura sobre nivel de terreno, altura entre piso tipo, espesor de losa tipo, número de pisos, número de subterráneos y ubicación geográfica (latitud y longitud).
- Clasificación normativa: A partir de lo señalado en la norma NCh433 y el DS61, se incorporan la zona sísmica, suelo, categoría de ocupación, factores de modificación de respuesta estructural (tanto para el análisis estático como modal espectral).
- Propiedades dinámicas: períodos con mayor masa traslacional en cada dirección, porcentaje de masa asociado a cada período traslacional y rotacional y cociente entre períodos (indicador de acoplamiento).
- Parámetros representativos: indicador de rigidez H/T en cada dirección de análisis, peso sísmico y cociente entre peso sísmico y área total.
- Demanda sísmica: Corte basal elástico, Momento basal elástico, Corte mínimo según NCh433, Desplazamiento de techo, Altura de corte, Corte basal de diseño y factor de modificación de respuesta efectivo. Todo esto, para cada dirección de análisis (X e Y).

Junto con los atributos señalados, falta incorporar información asociada a planos en planta de arquitectura e ingeniería. En la siguiente sección se describe el procedimiento llevado a cabo para rescatar ubicación y geometría de muros estructurales.

3.3. Procesamiento de planos

En lo que respecta a la conformación de la base de datos, para los planos recopilados se implementa una metodología que permite rescatar la ubicación y geometría de los muros estructurales. La idea principal consiste en obtener las coordenadas de los vértices para cada polígono que conforman los muros y la planta de cada piso. Esto se basa en el hecho de que tanto muros como planta son polígonos cerrados formados por una secuencia de líneas conectadas. La metodología empleada se resume en el esquema de la figura 3.1.

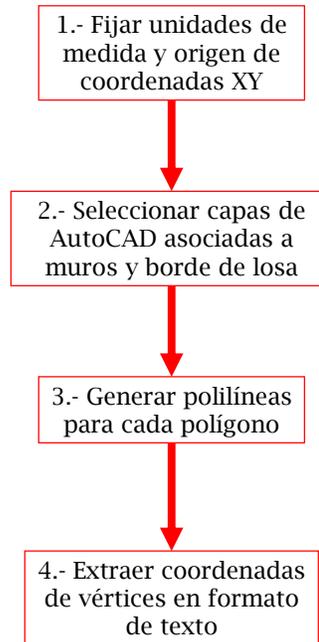


Figura 3.1: Ejemplo de muros y borde de losa para plano de ingeniería en AutoCAD

A continuación se describe cada punto del esquema anterior:

1. Dado que todos los planos de ingeniería están en centímetros, se establece esta unidad de medida para guardar la información de cada uno. De esta forma se deben escalar según corresponda. Luego se fija el origen de coordenadas en la intersección de dos ejes iguales entre arquitectura e ingeniería, o bien, en un muro en común para ambas especialidades.
2. Se apagan todas las capas en AutoCAD excepto la asociada a los muros y la que define el borde de losa, tal y como se observa en la figura 3.2 para un plano de ingeniería. En caso de no existir capas bien definidas, se seleccionan de forma manual los elementos correspondientes a muros y borde de losa.
3. Considerando que tanto los muros como la planta son polígonos cerrados, se deben conectar las líneas individuales que los componen y generar así un elemento tipo polilínea de AutoCAD. Para esto se utiliza la rutina creada por Lee Mac Programming (2016) la cual permite definir polilíneas cerradas uniendo las líneas de elementos seleccionados, en éste caso, polígonos que representan muros y bordes de losa. De esta forma, se

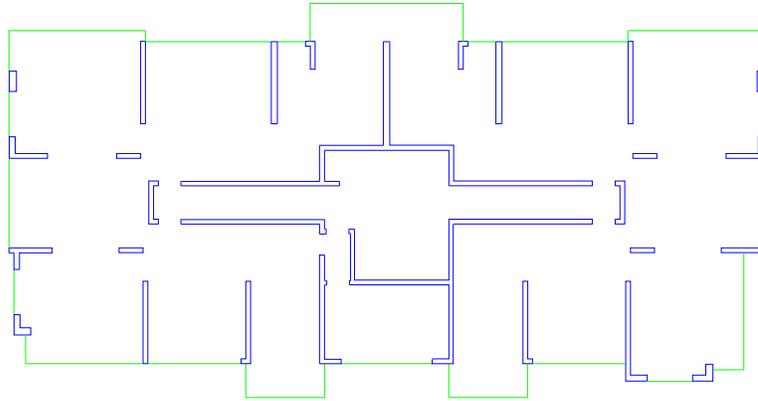


Figura 3.2: Ejemplo de muros y borde de losa para plano de ingeniería en AutoCAD

asegura que todos los muros están asociados a la misma capa y están bien definidos, esto quiere decir, son elementos cerrados.

4. Luego, se deben extraer las coordenadas de los vértices asociados a cada polilínea. Para esto se modifica el código de una rutina extraída de los foros de Autodesk (2011) y que se expone en detalle en el Anexo A. La rutina genera un archivo en formato *.txt* con las coordenadas de los polígonos seleccionados en el plano. De esta forma, para cada planta se tiene un archivo que describe muros y otro el borde de losa. En la figura 3.3 se muestra el archivo generado.

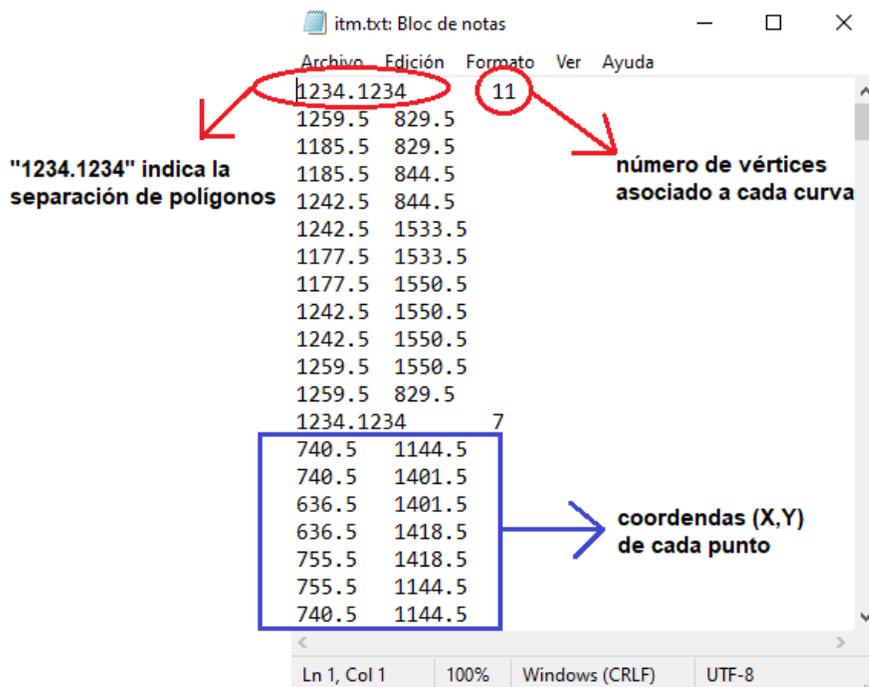


Figura 3.3: Descripción de archivo *.txt* generado con rutina Lisp

En última instancia, conociendo la estructura del archivo de texto, se extraen las coorde-

nadas para agregarlas en la base de datos. A modo de ejemplo, la figura 3.4 corresponde a la representación en MATLAB de los muros y borde de losa de los planos de arquitectura e ingeniería de un proyecto. De esta forma, es posible evidenciar los cambios y similitudes que sufren los muros en cuanto a posición y geometría a lo largo de un proyecto, lo cual será analizado más adelante.

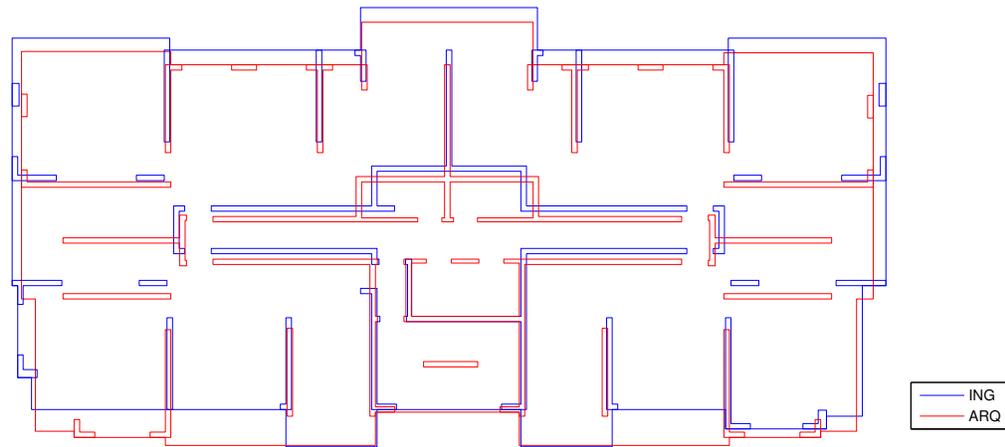


Figura 3.4: Superposición de muros de arquitectura e ingeniería

3.4. Cálculo propiedades geométricas en planta

Al tener las coordenadas de los muros en planta, surge la necesidad de determinar propiedades geométricas como el área y la inercia. Además, al conocer el área total de la planta se puede obtener la densidad de muros en cada dirección, que es un indicador del Perfil Bio-sísmico con valores bien definidos para edificios chilenos.

De esta manera, a partir de las expresiones definidas por Steger (1996) se crea una rutina en MATLAB que permite obtener el área, centro geométricos e inercias a partir de los vértices de una figura cerrada de N lados. Las ecuaciones desarrolladas se basan en la aplicación del teorema de Green aplicado sobre una región R definida por un contorno C para un campo vectorial $F = (P, Q)$ (ecuación 3.1).

En éste caso, el contorno viene definido por la trayectoria que une los vértices que definen el polígono. Así, el problema permite determinar propiedades geométricas a partir de la curva que describe el elemento. El detalle del código se encuentra en el Anexo A.

$$\int_C (Pdx + Qdy) = \iint_R \left(\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial y} \right) dx dy \quad (3.1)$$

En lo que respecta a la densidad de muros, este indicador se define como el área total de muros en una dirección dividido por el área total de planta para un piso en particular. Por lo tanto, se debe descomponer los muros en la dirección X e Y para obtener las densidades d_x y d_y . Además, al conocer los muros en cada dirección, es posible conocer espesores y largos de cada uno y así obtener un promedio de estos valores por planta.

De este modo, para conocer el área de muros por dirección es necesario descomponer los polígonos en rectángulos. Para esto se utiliza el algoritmo de Gourley y Green (1983), el cual se aplica a polígonos rectangulares sin agujeros:

Algoritmo 1 Descomposición de Polígonos en Rectángulos (Gourley y Green, 1983)

- Sea un polígono representado por un conjunto V de vértices (x_i, y_i)
 - Sea P_k el vértice más abajo y más a la izquierda de V ; P_l el siguiente vértice más abajo y más a la izquierda en V
 - Sea P_m el vértice más abajo y más a la izquierda en V con y mayor que y_k y la coordenada x entre x_k y x_l
 - El siguiente rectángulo es: $x_{\text{mín}} = x_k$; $y_{\text{mín}} = y_k$; $x_{\text{máx}} = x_l$; $y_{\text{máx}} = y_m$
 - Remover P_k y P_l de V . Remover (x_k, y_m) y (x_l, y_m) si existen en V , si no, agregarlos a V .
 - Si V está vacío entonces parar, si no, volver al punto 2
-

Durante el procesamiento de los planos, se observaron proyectos con muros inclinados.

Para detectar estos casos, se determina el ángulo de inclinación entre vértices consecutivos. De esta forma, si un ángulo no es igual a 0° o 90° respecto al eje x , se activa una alerta dentro del algoritmo que señala el proyecto y número de polígono con esta característica. Luego, se procede a modificar de forma manual el archivo de texto para aplicar el algoritmo de forma correcta.

Con los polígonos descompuestos se determina el área por dirección, en donde solo se consideran aquellos rectángulos cuyo lado largo está en la dirección de análisis. Para rectángulos inclinados, se realiza una descomposición vectorial. Así, el área en x es igual a $A \cdot \cos(\theta)$ y el área en y igual a $A \cdot \sin(\theta)$. Donde θ corresponde al ángulo de inclinación respecto al eje x y A es el área total del rectángulo.

Para las inercia total de muros en cada dirección, se consideran dos casos. El primero considera la rigidez independiente de cada muro. De esta forma, la inercia total viene dada por la suma de las inercias de cada muro con respecto a su centro geométrico. En el segundo caso, se considera que los muros están acoplados y por ende se determina la inercia de cada uno respecto al centro geométrico del conjunto de muros. Para esto, se aplica el teorema de Steiner a las inercias calculadas en el primer caso.

En definitiva, para cada nivel de un proyecto se determina lo siguiente: área de muros en eje X e Y, espesor promedio, largo promedio, área de planta, densidad de muros en X e Y y los momentos de inercia en X e Y. Lo anterior se realiza para ambas especialidades para poder analizar los cambios que sufre el proyecto y los valores asociados a los indicadores sísmicos, usando la información de última revisión de ingeniería.

De esta forma, la base de datos consolidada está compuesta por 171 proyectos habitacionales y 126 atributos por proyecto. La base de datos no se expone debido a que su contenido es propiedad intelectual de la oficina RLE. Por lo tanto se decide mantener la confidencialidad de la información contenida en esta.

Capítulo 4

DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE EDIFICIOS

4.1. Introducción

Con la base de datos consolidada en cuanto a los atributos considerados, se procede a realizar un análisis tanto descriptivo como cualitativo de los edificios. El análisis se organiza de manera tal que toda la información sea incluida en el estudio. Lo anterior incluye el procesamiento de los planos de arquitectura, que pese a no corresponder a la estructuración final, entrega nociones claras de los cambios que sufre un proyecto en su etapa de diseño.

De éste modo, el análisis se divide en tres etapas. La primera consiste en hacer una descripción general de la muestra, que incluye ubicación geográfica de los edificios, número de pisos y clasificación normativa de parámetros como el tipo de suelo y zona sísmica. El objetivo es evaluar si la muestra es representativa de los edificios construidos en el país, o bien, corresponde a un tipo en particular.

La segunda etapa consiste en analizar las principales características estructurales de los edificios, como la densidad de muros, el indicador de rigidez H/T , entre otros. Los valores obtenidos se comparan con estudios previos ,descritos en la revisión bibliográfica sobre caracterización de edificios para examinar cambios de parámetros representativos.

La última etapa corresponde a un estudio de los cambios que sufren los proyectos en la etapa de estructuración. Esto se realiza a partir de los atributos extraídos de planos de arquitectura e ingeniería. Con esto, se cuantifica cuánto debe cambiar un proyecto para cumplir con las tensiones y deformaciones permitidas por la normativa vigente.

En resumen, el análisis que se expone a continuación tiene por finalidad caracterizar la estructuración en Chile analizando no sólo las propiedades estructurales sino que también el proceso de diseño. Como resultado, se obtiene una visión general de la tradición chilena en el cálculo de edificios de hormigón armado destinados al uso habitacional.

4.2. Descripción general de proyectos

Para la muestra de 171 edificios es importante conocer la distribución de estos en cuanto al número de pisos, ubicación y otros parámetros, dado que permiten saber si ésta es representativa de la edificación en Chile. Ahora bien, hay que tener en consideración que todos los proyectos pertenecen a una misma oficina de cálculo, por lo cual ya hay un sesgo en la muestra, que restringe la generalización de los resultados extraídos del análisis.

En primera instancia se analiza la distribución del número de pisos y subterráneos. En efecto, la figura 4.1 corresponde a un histograma del número de pisos sobre nivel de terreno. En total se tienen 73 proyectos entre 5 y 10 pisos, 80 entre 15 y 25 pisos y 18 entre 25 y 35 pisos. Por lo tanto, la muestra posee una distribución uniforme en cuanto al número de pisos y altura.

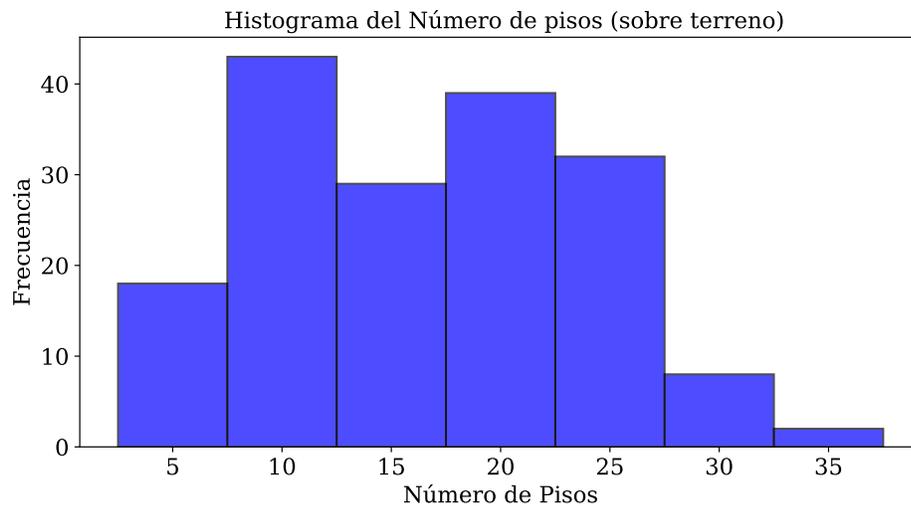


Figura 4.1: Distribución del número de pisos sobre nivel de terreno

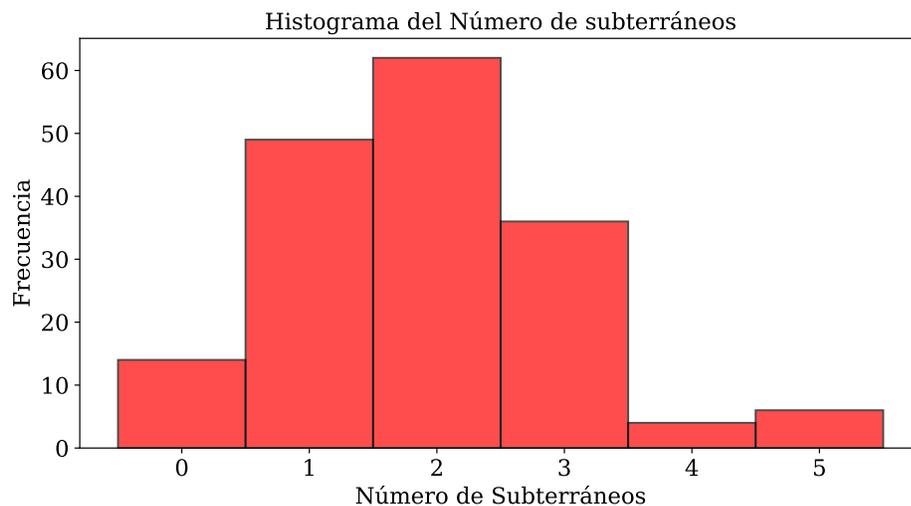


Figura 4.2: Distribución del número de subterráneos

La figura 4.2 por su parte, indica la distribución del número de subterráneos. En donde se concluye que la mayoría de los proyectos se concentran entre 1 y 3 subterráneos, en donde el máximo número de subterráneos es igual a 5. Además se observa que 14 proyectos sólo tienen pisos sobre nivel de terreno.

Otro atributo importante de la muestra corresponde al año en el cual el proyecto se diseñó. De la figura 4.3 se observa que en general hay una buena distribución de proyectos por año aunque con un aumento en el número de proyectos desde el año 2010 en adelante. Además, en los intervalos 2009-2011 y 2017-2018 se observa la menor cantidad de edificios diseñados por año. De este modo, es posible incluir el factor del tiempo en el análisis de las características estructurales. Con esto se evalúan posibles cambios de los parámetros representativos en base a cambios normativos a través del tiempo.

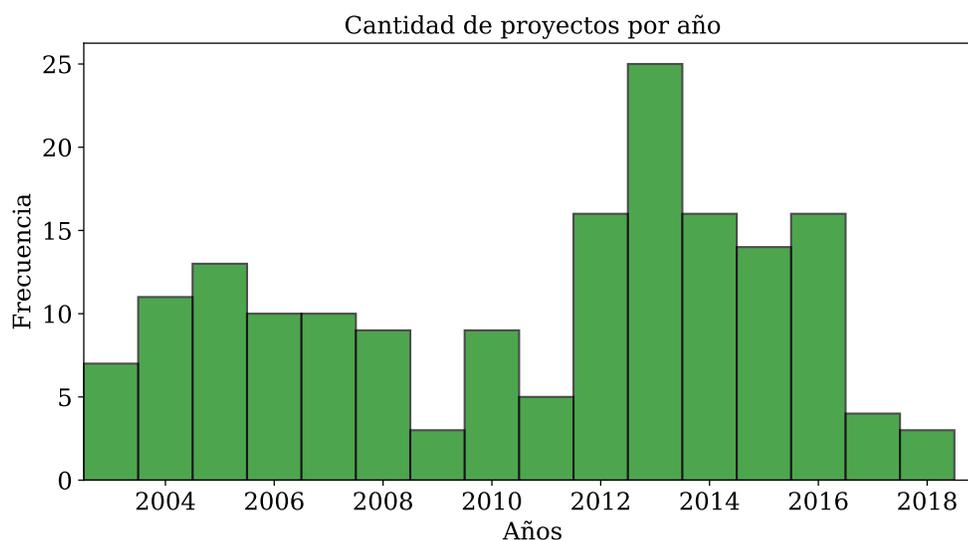
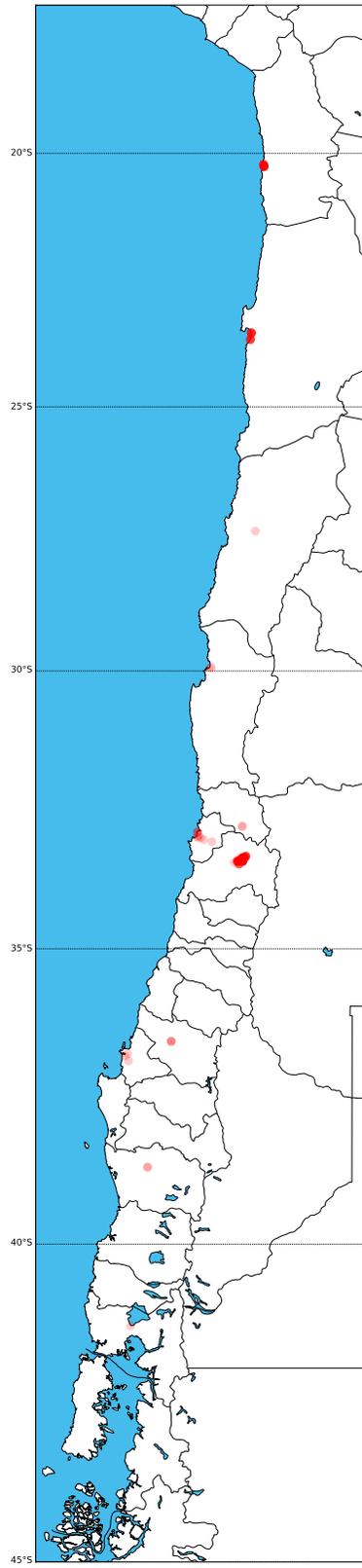


Figura 4.3: Distribución de proyectos por año

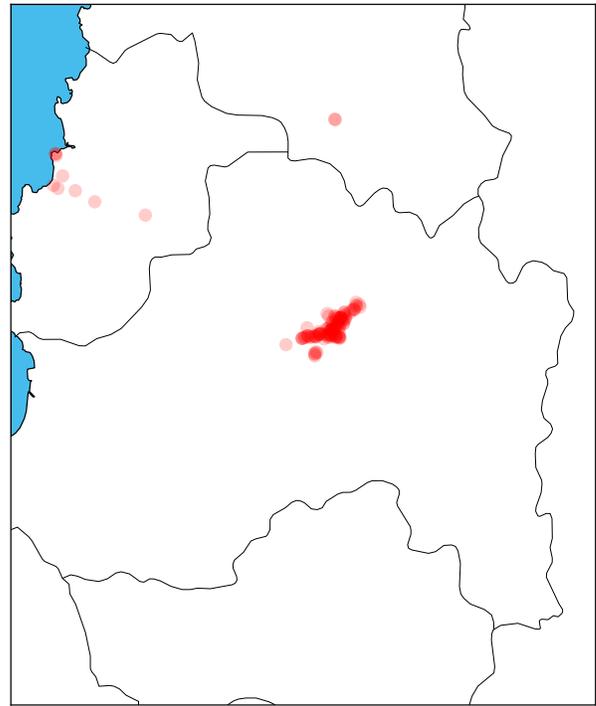
Por otra parte, al conocer la latitud y longitud en la base de datos es posible representar la ubicación geográfica de los proyectos. En la figura 4.4a se exponen todos los edificios a lo largo de Chile. A primera vista se observa una gran concentración de proyectos entre la V Región y Región Metropolitana (figura 4.4b). En particular, en la Región Metropolitana hay 131 proyectos que corresponden a un 77% del total de edificios.

También se observa una concentración de proyectos en las costas de las regiones de Tarapacá y Antofagasta (figura 4.4c). En el caso del sur de Chile hay poca representación, cuyo proyecto más austral se encuentra en la región de la Araucanía.

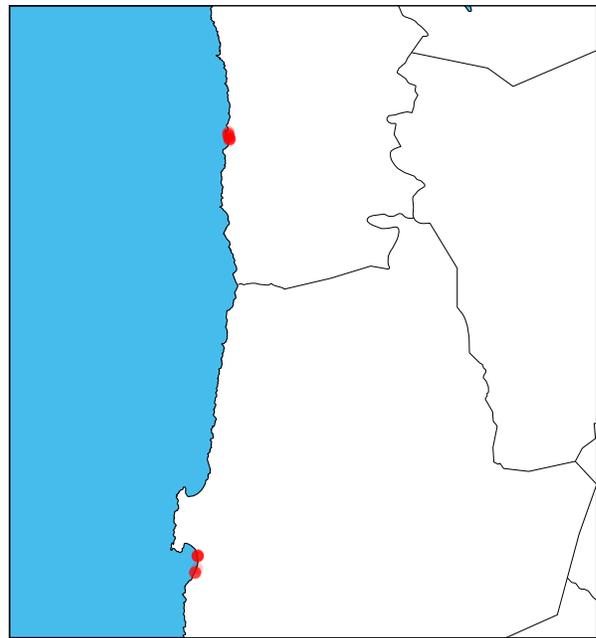
De esta forma, se tiene que una gran cantidad de proyectos realizados en la zona central del país. Por lo tanto, se concluye que la muestra no es representativa para todo el territorio. Además, en el norte del país, donde está la segunda concentración de puntos, estos se encuentran sólo en la costa. Sumado a esto, hay pocos proyectos hechos en el sur de Chile, cuya clasificación del suelo cambia de manera significativa con respecto al suelo presente en la zona central.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.4: Ubicación geográfica de proyectos: (a) en todo Chile, (b) Región Metropolitana y (c) Regiones de Tarapacá y Antofagasta.

La ubicación geográfica del proyecto tiene relación directa en la clasificación del tipo de suelo y la zona sísmica. El tipo de suelo se clasifica según lo señalado en el Artículo 6° del Decreto Supremo 61, mientras que la zona sísmica se asigna según la figura 4.1 de la norma de diseño sísmico (NCh433). Estos dos atributos influyen en la demanda sísmica y por ende en el diseño de los elementos estructurales. Por lo tanto, dada la relevancia que tienen en el análisis estructural, es importante estudiar cómo se distribuyen estos atributos en la base de datos.

La figura 4.5 indica la proporción del tipo de suelo en la muestra. Se observa que la mayoría de los edificios (70.76 %) están en suelo tipo B que corresponde a “Roca Blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme” (INN, 2011). Lo anterior se debe a que la mayor parte del suelo en la zona central tiene esa clasificación. Precisamente donde se concentran gran parte de los edificios.

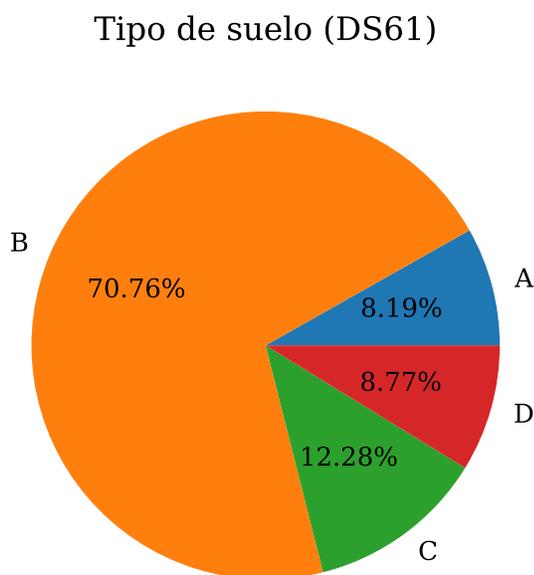


Figura 4.5: Distribución del tipo de suelo según DS61.

Según la norma sísmica existen tres tipos de zonas sísmicas. Sin embargo, en la muestra solo hay presencia de edificios en zona 2 y 3 (figura 4.6). La zona sísmica tipo 1 que corresponde a proyectos construidos cercanos a la cordillera no está presente en la muestra como se observa en la figura 4.4a.

Dado que el suelo y la zona influyen en la demanda sísmica, específicamente en el espectro de diseño, es conveniente conocer la clasificación de ambos atributos para un proyecto tal y como se muestra en la tabla 4.1. En esta se tiene que 106 proyectos se clasifican como suelo B y zona 2 (62 % del total). El resto se distribuye en las demás combinaciones suelo-zona, donde ninguna contiene a más del 10 % del total de edificios.

Tabla 4.1: Distribución de proyectos según zona sísmica y tipo de suelo

	Suelo A	Suelo B	Suelo C	Suelo D
zona 1	-	-	-	-
zona 2	0	106	8	6
zona 3	14	15	13	9

Zona Sísmica (NCh433)

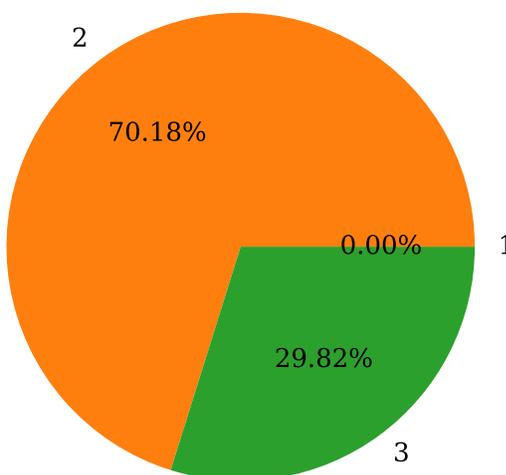


Figura 4.6: Distribución de la zona sísmica según norma NCh433Of96

En resumidas cuentas, se observa una correcta distribución en altura de edificios y en el año en que se diseñaron. Sin embargo, la mayoría de los proyectos se encuentran concentrados en la zona central, por lo que la muestra no es representativa a nivel normativo según el tipo de suelo y zona sísmica.

4.3. Análisis de características estructurales

A través de los años, los indicadores de densidad de muros y la rigidez H/T han sido buenos parámetros para evaluar el desempeño sísmico de un edificio. Debido a esto, serán los principales indicadores sísmicos a analizar.

También se estudian características como el espesor de muros, altura entrepiso, espesor de losa, entre otras. La finalidad es obtener nociones generales de edificios de muros de hormigón armado destinados al uso habitacional en Chile.

Parámetro H/T

En cuanto a los indicadores de rigidez, en la revisión bibliográfica se expuso los diferentes rangos para el parámetro H/T , en función de la altura y período considerados. Para este estudio, se considera la altura total y el período con mayor masa traslacional por dirección, que corresponde a la definición original para este indicador (Guendelman et al., 1997).

Estructuras demasiado flexibles suelen presentar problemas para cumplir los requerimientos de desplazamiento fijados por la norma sísmica. Asimismo, como el comportamiento queda controlado por los desplazamientos, la estructura es propensa al daño de elementos no estructurales. Por otra parte, edificios demasiado rígidos indican una rigidez lateral excesiva que conlleva a mayores aceleraciones de piso y por ende, mayores sollicitaciones en elementos no estructurales (Calderón, 2007).

En la figura 4.7 se muestra la distribución del parámetro H/T de la muestra en estudio, en donde se consideran los casos en ambas direcciones para cada edificio. Se observa que la mayoría de estos (71.05 %) clasifican con rigidez normal, mientras que un 24.85 % clasifican como rígidos. Con esto, un 95.9 % del total corresponde a estructuras normales y rígidas de acuerdo a la clasificación de Guendelman et al. (2017).

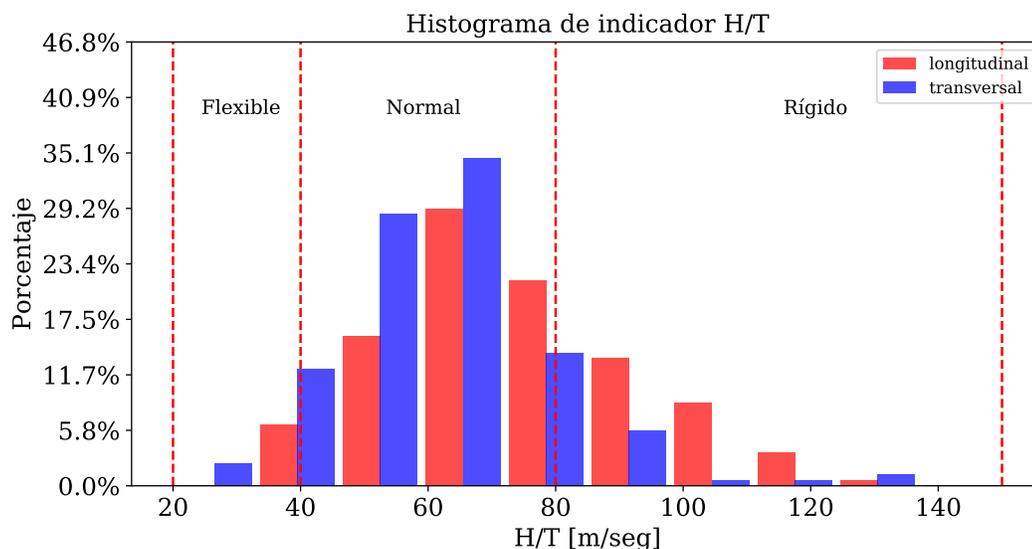


Figura 4.7: Distribución de H/T según dirección de análisis

Cabe destacar que no se tienen casos demasiado flexibles y solo un caso con demasiada rigidez (183.5 m/seg). El 3.8 % restante de la muestra, clasifica como flexible. Adicionalmente, se tiene que en la dirección longitudinal (eje x) los valores son mayores respecto a la transversal (eje y), con promedios de 74.75 m/seg y 62.31 m/seg respectivamente.

Para analizar la evolución del parámetro H/T en el tiempo, en la figura 4.8 se agrupan los valores según el año en que se llevó a cabo la estructuración del proyecto. De esta forma, se observa una ligera tendencia a la baja a través de los años, aunque siempre dentro del rango de rigidez normal. Esto se debe a que en el período 2003-2009 se tienen muchos proyectos con estructuras rígidas y la cantidad de proyectos es menor si se compara con los realizados desde el año 2010 en adelante. Además, desde el año 2010, los valores se empezaron a concentrar en el rango de rigidez normal, con un aumento de casos flexibles. Otro punto a considerar, es la nula presencia de valores fuera de rango (mayores de 150 m/seg y menores a 20 m/seg).

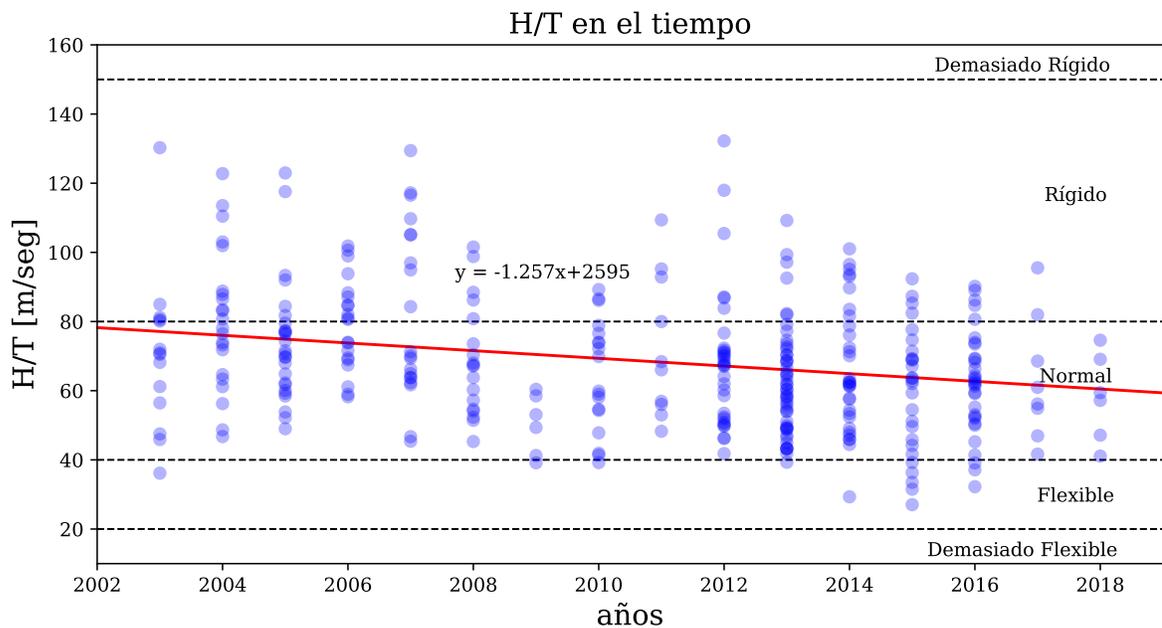


Figura 4.8: Valores de H/T de la muestra entre los años 2003 y 2018

Por otra parte, la figura 4.9 muestra la distribución del indicador H/T . En ésta se observa que en proyectos de mayor altura (desde 30 metros) la mayoría de los proyectos presenta una rigidez normal. En cambio, en proyectos de menor altura aumenta la proporción de proyectos que clasifican como rígidos.

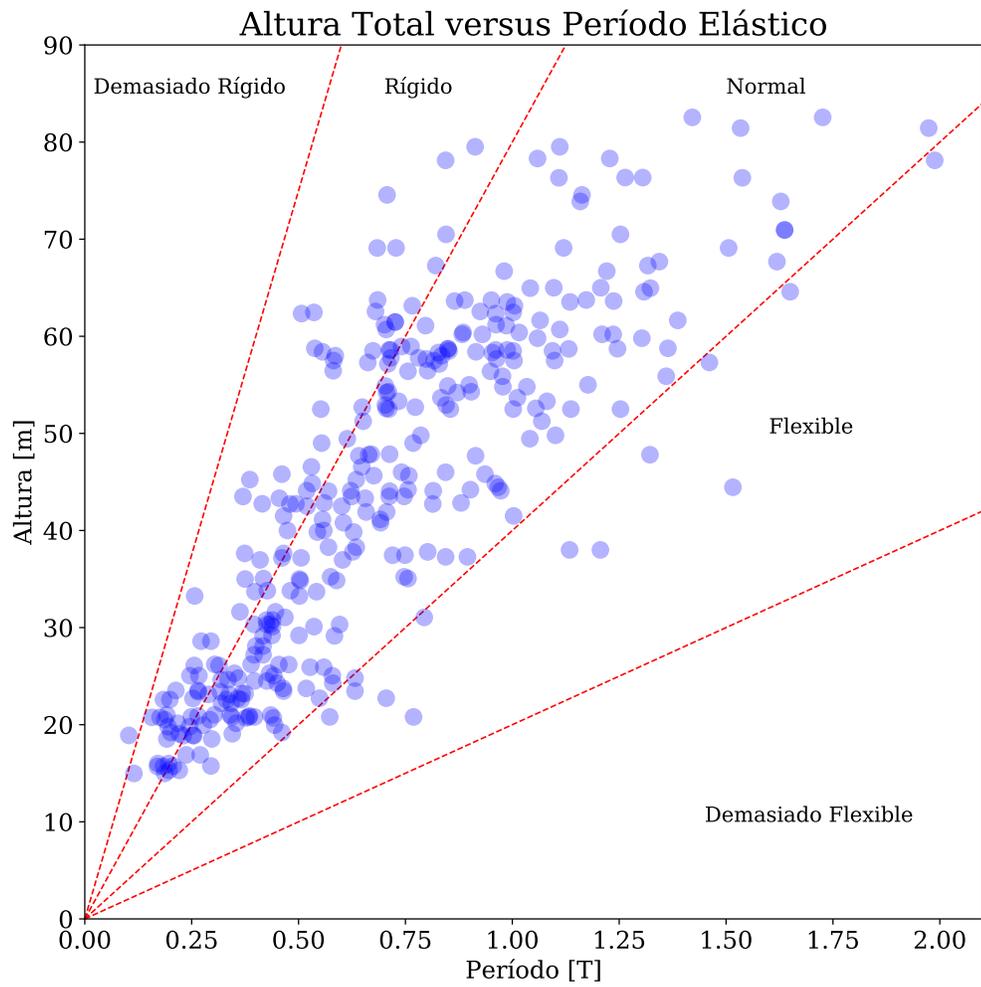


Figura 4.9: Altura Total versus Período para cada proyecto

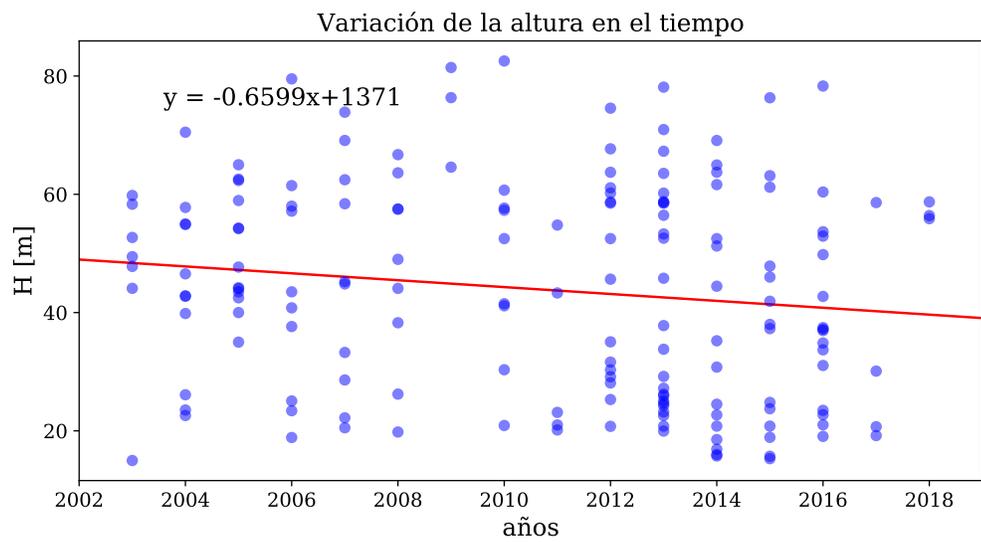


Figura 4.10: Altura Total de proyectos entre los años 2003 y 2018

Ahora bien, para corroborar que la tendencia a la baja en la rigidez de corresponda a un relajamiento de los criterios de diseño y no a la altura de los proyectos, es necesario estudiar la variación el tiempo de la altura en edificios. En la figura 4.10 se obtiene que la altura disminuye a través del tiempo para proyectos de la muestra. Por lo tanto, como la altura promedio no aumenta a lo largo del tiempo, la tendencia de H/T es consecuencia principalmente en cambios en criterios de diseño.

Por otro lado, para los edificios con muros de rigidez estudiados por Gómez (2001) y Calderón (2007) se obtuvo que más del 90 % eran estructuras normales o rígidas según la clasificación del Perfil Bio-sísmico. En la muestra estudiada, un 95.9 % estaban en dicha clasificación. De esta forma, los valores obtenidos para el indicador de rigidez H/T mantienen los resultados de estudios previos en torno a edificios de hormigón armado.

Lo mismo pasa con la tendencia a la baja a través de los años, que se debe al mayor porcentaje de estructuras rígidas previo al año 2005. También la nula presencia de casos extremos y los pocos casos de edificios flexibles es algo que se repite en el análisis de la muestra.

Densidad de muros

La densidad de muros “d” se establece para el control de los esfuerzos de corte generados por el sísmico en la estructura. Se define como:

$$d[\%] = \frac{\text{Área de muros en una dirección [cm}^2\text{]}}{\text{Área de planta [cm}^2\text{]}} \quad (4.1)$$

Del Perfil Bio-sísmico de Guendelman et al. (2017), valores normales para la densidad de muro se encuentran por sobre el 2 %. Esto ya se observaba en el estudio hecho por Wood (1991) posterior al terremoto del año 1985, en donde el 70 % de los edificios estudiados presentaba valores entre el 2 y 4 %.

Para la muestra del presente trabajo, se analiza la densidad de muros por nivel (pisos subterráneo, primero y tipo) y por dirección (longitudinal y transversal). De esta forma, para el piso tipo en la dirección longitudinal (figura 4.11a), se observa que una gran mayoría de los proyectos tienen valores entre 2 y 4 % (71.35 %), con un promedio de 2.45 %. Solo un edificio está bajo el límite inferior, con un valor de 1.04 %. El 28.07 % restante de la muestra, está por sobre el límite superior, con un máximo de 5.17 % en la dirección longitudinal.

En la dirección transversal (figura 4.11b), se tiene un promedio 2.64 % con un 84.8 % de la muestra entre el 2 y 4 %. Hay 4 edificios bajo el 2 % con una densidad mínima de 0.93 % y el resto (12.87 %) está sobre el 4 %, llegando a un valor máximo de 6.76 % para la densidad de muros.

Por lo tanto, para el piso tipo la densidad de muros es mayor en la dirección transversal. Además, en la misma dirección hay una menor dispersión en los valores, los que en su mayoría se concentran entre 2 y 4 %.

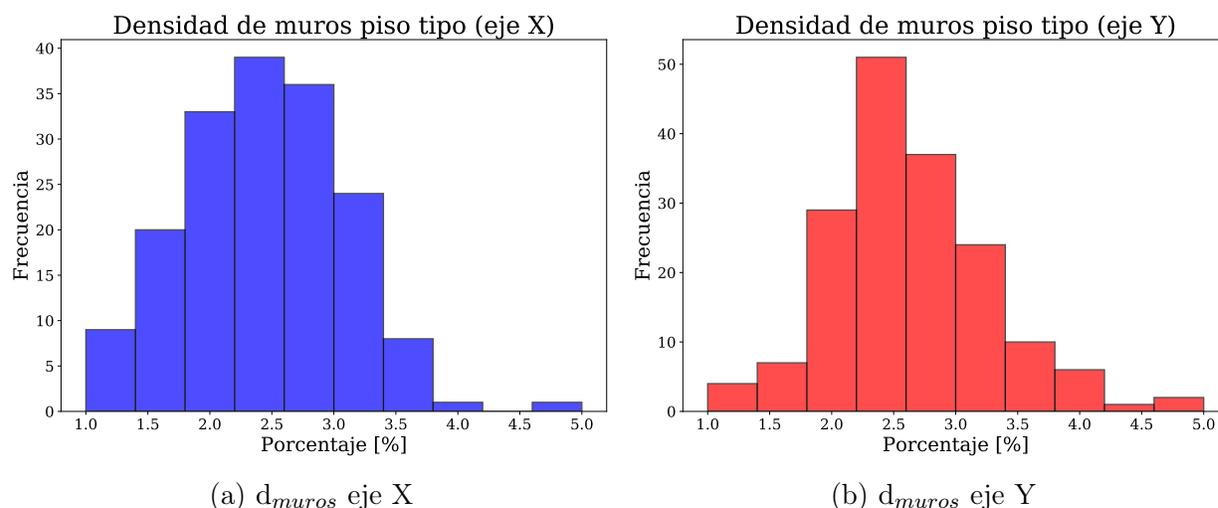


Figura 4.11: Distribución de la densidad de muros en el piso tipo de la muestra

Para el caso del primer piso, los resultados se presentan en la figura 4.12. En la dirección

longitudinal el promedio es de 2.62 % con un 66.08 % de los edificios con densidad de muros entre el 2 y 4 %. Asimismo, solo un 7.6 % tiene valores bajo el 2 % y un 26.32 % sobre el 4 %, con un valor máximo de 4.9 %.

En la dirección transversal el promedio es de 2.83 % y un 69.59 % de los edificios está en el rango normal de 2-4 %. Fuera de este rango se tiene una cantidad considerable bajo el 2 % (19.88 %), con un valor mínimo de 1.07 %. El resto de los edificios sobre el 4 % (10.52 %) llegan a un máximo de 5.54 %. Por lo tanto, al igual que el piso tipo, hay una mayor densidad de muros en la dirección transversal de la planta.

Con respecto a los requerimientos de estacionamientos para los primeros niveles de edificios habitacionales, hay una presencia generalizada de muros invertidos en el primer piso que generan irregularidades verticales de consideración (Lagos et al., 2012). Por lo tanto se esperaba que la densidad de muros en este piso fuera menor al piso tipo. Sin embargo, se observa un ligero aumento, lo cual se podría deber a que la disminución del número y largo de muros entre dos pisos se compensa con el aumento del espesor promedio de estos en planta.

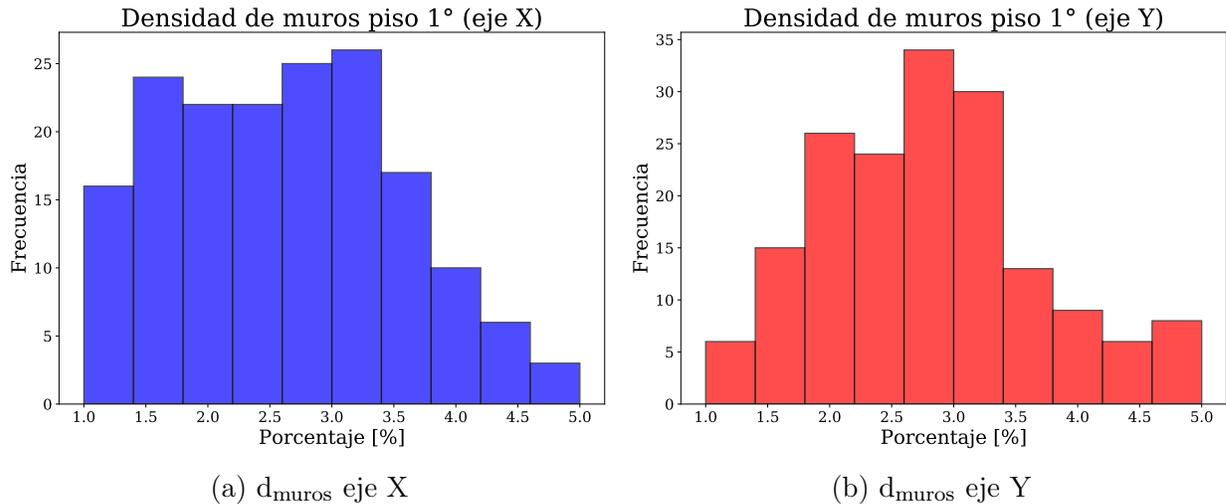


Figura 4.12: Distribución de la densidad de muros en el primer piso de la muestra

En el caso del primer subterráneo (figura 4.13), en la dirección longitudinal se tiene un promedio de 3.09 % y un 64.33 % de los edificios están entre el 2 y 4 %. A su vez un 13.3 % está bajo el valor inferior del rango normal con un mínimo de 1.26 %. En cambio un 22.3 % de los casos están sobre el 4 % y el valor máximo es de 6.74 %. Cabe destacar una alta cantidad de proyectos con valores excesivos (sobre el 4.5 %) en la figura 4.13a.

Para la dirección transversal, el promedio disminuye a 2.8 % con un 61.78 % de los casos entre 2 y 4 %. Una cantidad considerable de edificios están bajo el 2 %, específicamente un 15.92 %. Sobre el 4 % se encuentra el 22.3 % de los edificios.

Comparando el primer piso con el primer subterráneo, se esperaría que este último tuviera valores similares, debido a la necesidad de espacios más amplios para los estacionamientos. Los resultados son parecidos aunque ligeramente mayores en el subterráneo, lo cual se debe al aporte considerable de los muros perimetrales en el área total por planta.

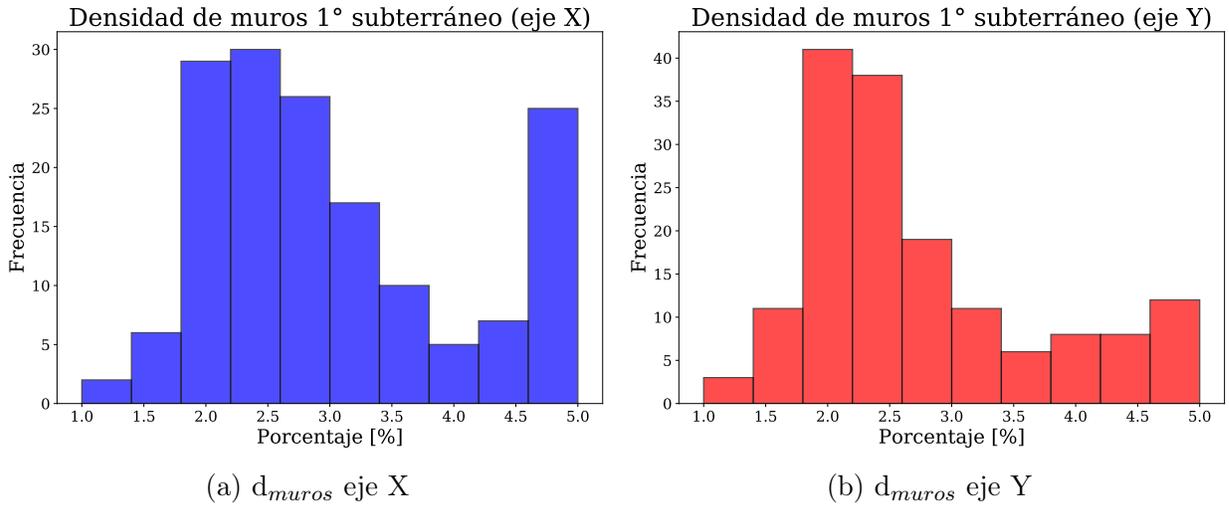


Figura 4.13: Distribución de la densidad de muros en el piso subterráneo de la muestra

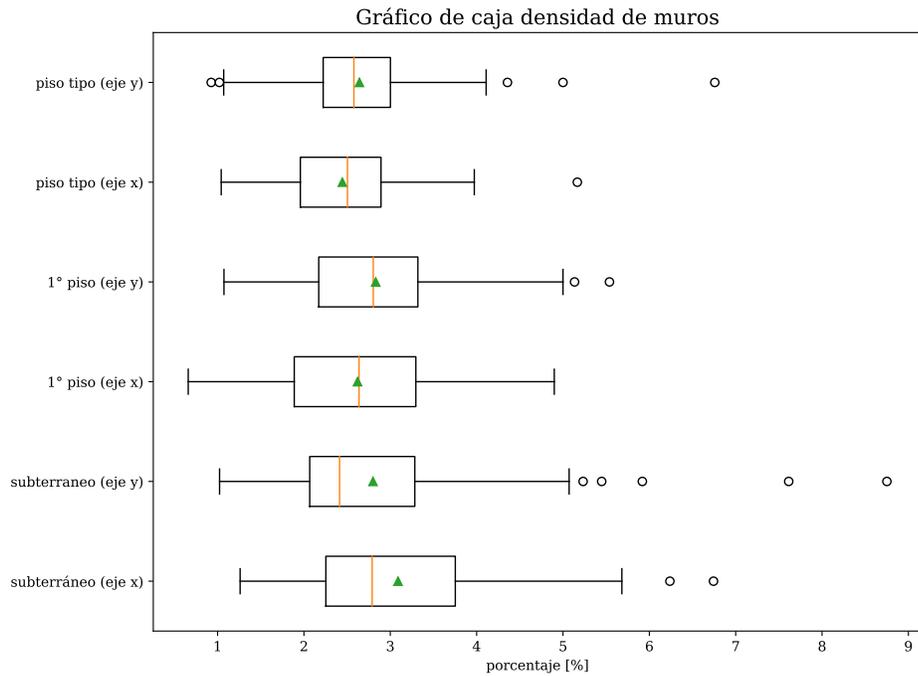


Figura 4.14: Diagramas de caja para densidad de muros por piso y dirección

Los diagramas de caja en la figura 4.14, permiten ver la variación de la densidad por piso en todos los proyectos. Lo primero que se aprecia, es la menor dispersión de los datos en el piso tipo. En cambio, el primer piso y el subterráneo presentan los valores dispersos en un rango entre el 1% y 5%. Otro rasgo importante, es que la densidad siempre está sobre el 1%, a excepción de 3 casos presentes en la dirección x del primer piso.

Además, tanto los promedios (puntos verdes) como las medianas (líneas amarillas) de los diagramas, muestran valores superiores en la dirección transversal a excepción del subterráneo. En cuanto a valores de densidad de muros sobre el 4%, solo casos aislados superan el

5.5 % cuyo valor más extremo es de 8.75 % en la dirección transversal del subterráneo.

La tabla 4.2 resume los valores promedios obtenidos del estudio de la densidad de muros por piso y nivel:

Tabla 4.2: Densidad de muros promedio por dirección y piso

	Piso tipo		Primer piso		Piso subterráneo	
	longitudinal	transversal	longitudinal	transversal	longitudinal	transversal
Densidad de muros promedio [%]	2.45	2.64	2.62	2.83	3.09	2.80

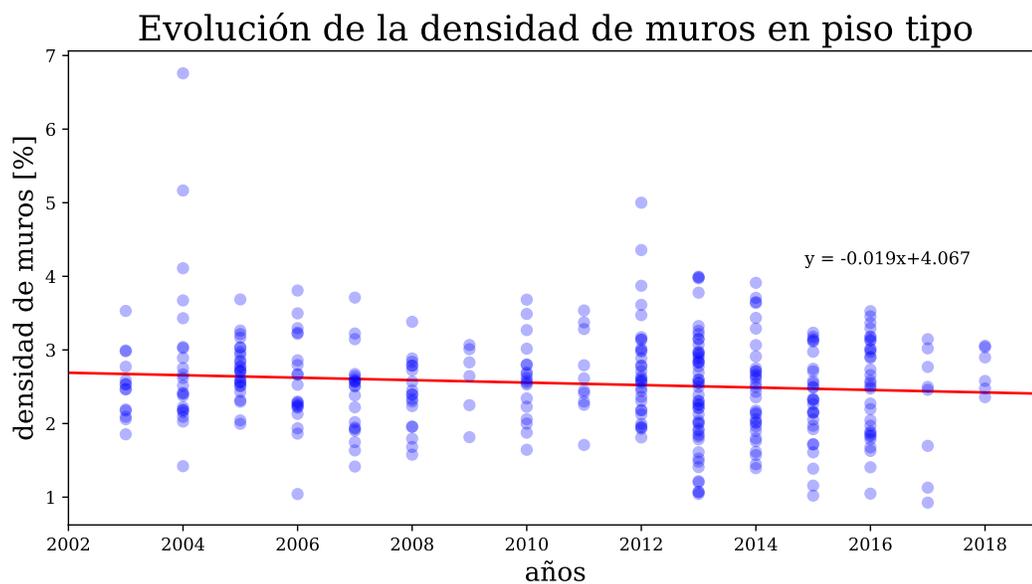


Figura 4.15: Variación de la densidad de muros entre los años 2003 y 2018

En lo que respecta a la evolución de la densidad de muros en el tiempo, la figura 4.15 muestra que la tendencia se ha mantenido prácticamente constante. En efecto, se observa una muy ligera disminución y con un valor promedio que está entre 2 % y 3 %. De esta forma, se concluye que la densidad de muros es un parámetro característico en los edificios chilenos. En general se tienen valores entre 2 % y 4 % tal y como señala Wood (1991).

Pese a que la densidad de muros es un parámetro constante a través del tiempo, es interesante analizar la variación que éste puede tener en función de la ubicación del proyecto. En efecto, la ubicación influye en la clasificación del suelo y la zona sísmica en la etapa de estructuración, específicamente en parámetros asociados al espectro de diseño.

Es por esto que se estudia el impacto del tipo de suelo y zona sísmica en este indicador. Sin embargo, hay que tener en consideración que la muestra es mayoritariamente suelo tipo B y zona sísmica 2, como se expuso en la tabla 4.1, en la descripción general de los proyectos.

En la figuras 4.16, 4.17 y 4.18 se muestran las distribuciones de la densidad de muros según el tipo de suelo para el primer subterráneo, primer piso y piso tipo respectivamente.

Destacar que no se hizo distinción de la dirección en la densidad de muros, se analizaron tanto la dirección longitudinal como transversal en los diferentes edificios.

Para el piso subterráneo, en suelo A se tiene un promedio en la densidad de muros de 4.36 %, para suelo B de 2.52 %, para suelo C de 2.63 % y suelo D de 2.71 %. Según la norma de diseño sísmico INN (2011) y el grado de competencia del suelo en cada clasificación, se esperaba que el promedio aumentara de forma gradual de A a D. Sin embargo esto ocurre solo entre B y D, mientras que el promedio del suelo A está sobre el 4 % que es considerado el límite superior en el rango normal de este parámetro.

Además, de la figura 4.16 se observa que solo en el suelo B se tiene una tendencia central en el valor de la densidad, cercana al 2.3 %. En el resto de los casos los datos están distribuidos de manera uniforme entre 1 % y 5 %.

DENSIDAD DE MUROS EN PISO SUBTERRANEO

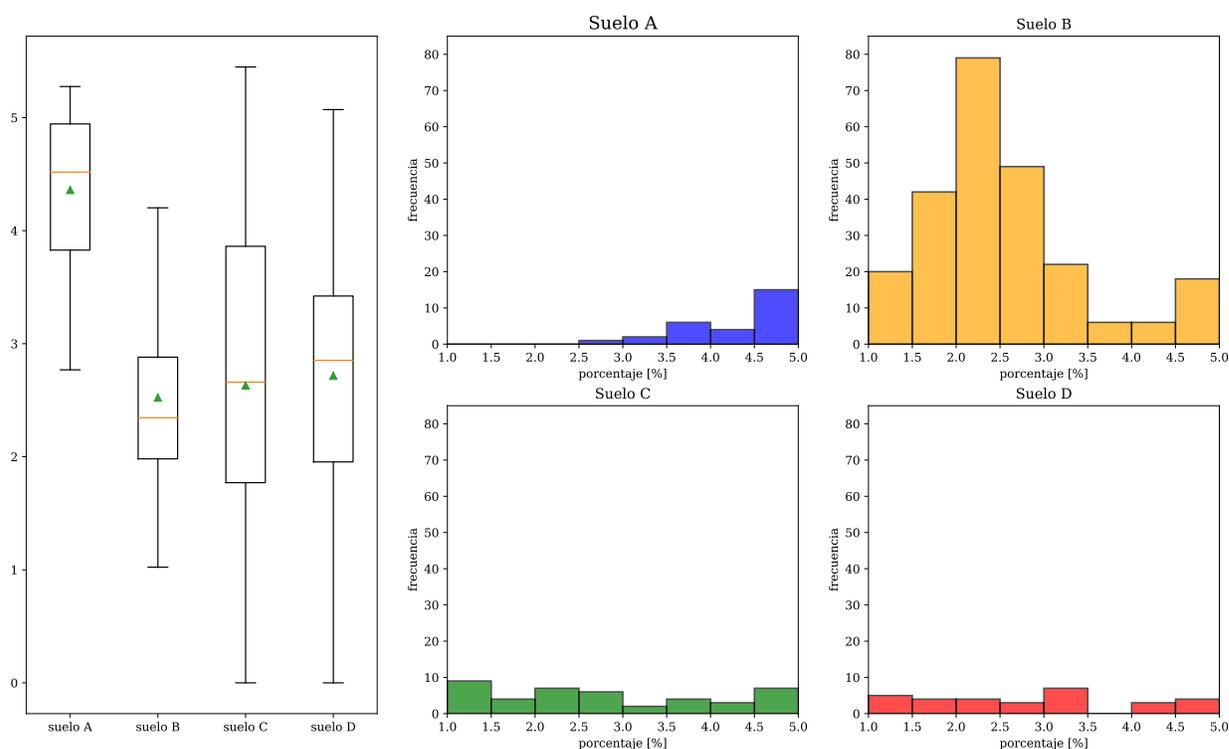


Figura 4.16: Densidad de muros según clasificación de suelo según DS61 para piso subterráneo

En el primer piso ocurre algo similar, el promedio en suelo A es de 3.13 %, suelo B 2.52 %, suelo C 3.32 % y suelo D 3.23 %. En este nivel se evidencia de mejor manera el impacto de la clasificación de suelo entre B y D en donde se tiene una aumento significativo entre ambos. Para el suelo B la dispersión es mayor en comparación al piso subterráneo, la mayor frecuencia se da entre 1.5 % y 3.5 %. En el suelo A hay un mayor número de casos entre 2.5 % y 3 %. Para el resto, la distribución sigue siendo mas bien uniforme.

DENSIDAD DE MUROS EN PRIMER PISO

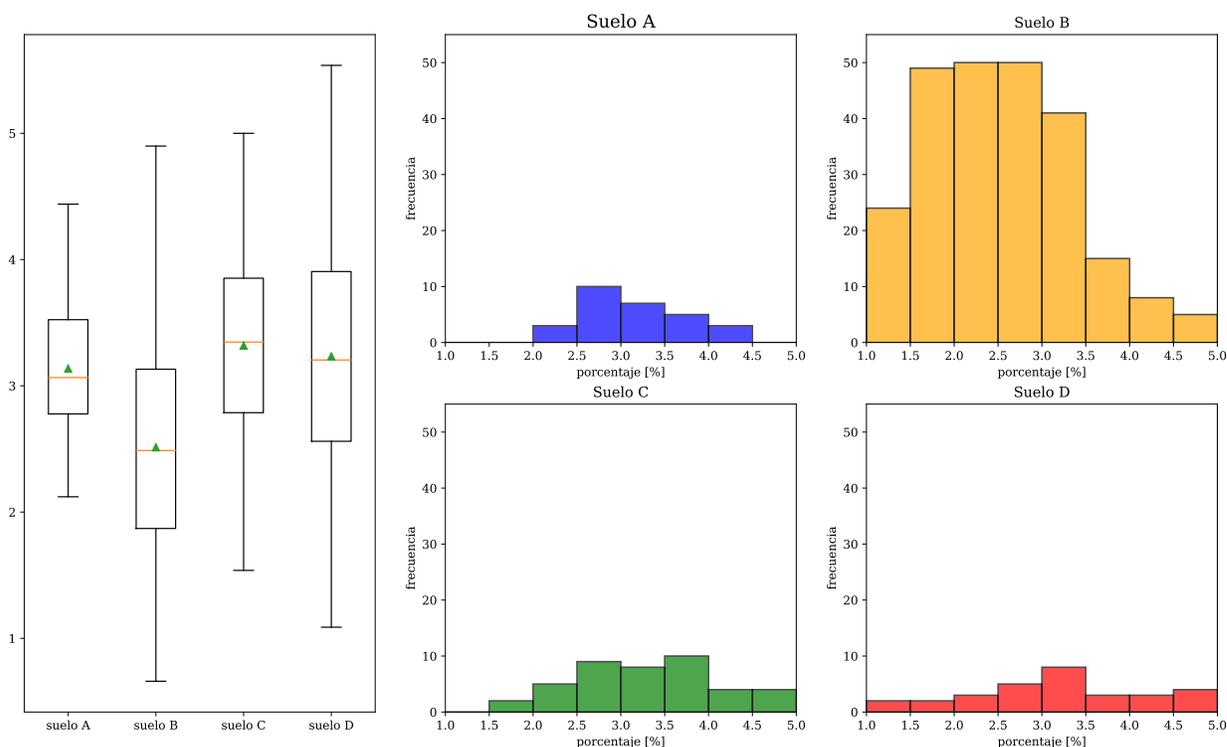


Figura 4.17: Densidad de muros según clasificación de suelo según DS61 para primer piso

Por último, para el piso tipo los promedios para suelo A, B, C y D son 2.67 %, 2.47 %, 2.78 % y 2.7 % respectivamente. A diferencia del subterráneo y primer piso, en este nivel el mayor valor promedio se encuentra en suelo tipo C y disminuye para el suelo D. Adicionalmente, los valores están menos dispersos en comparación al resto de los niveles. Para el suelo A los valores solo están entre 2 y 3.5 %. En suelos B, C y D, los valores se concentran entre 2.5 % y 3 %.

La tabla 4.3 resume los valores promedios en la densidad de muros en cada nivel, en función de la clasificación del suelo:

Tabla 4.3: Densidad de muros promedio según el tipo de suelo

	pisosubterráneo	primer piso	piso tipo
suelo A	4.36 %	3.13 %	2.67 %
suelo B	2.52 %	2.52 %	2.47 %
suelo C	2.63 %	3.32 %	2.78 %
suelo D	2.71 %	3.23 %	2.70 %

DENSIDAD DE MUROS EN PISO TIPO

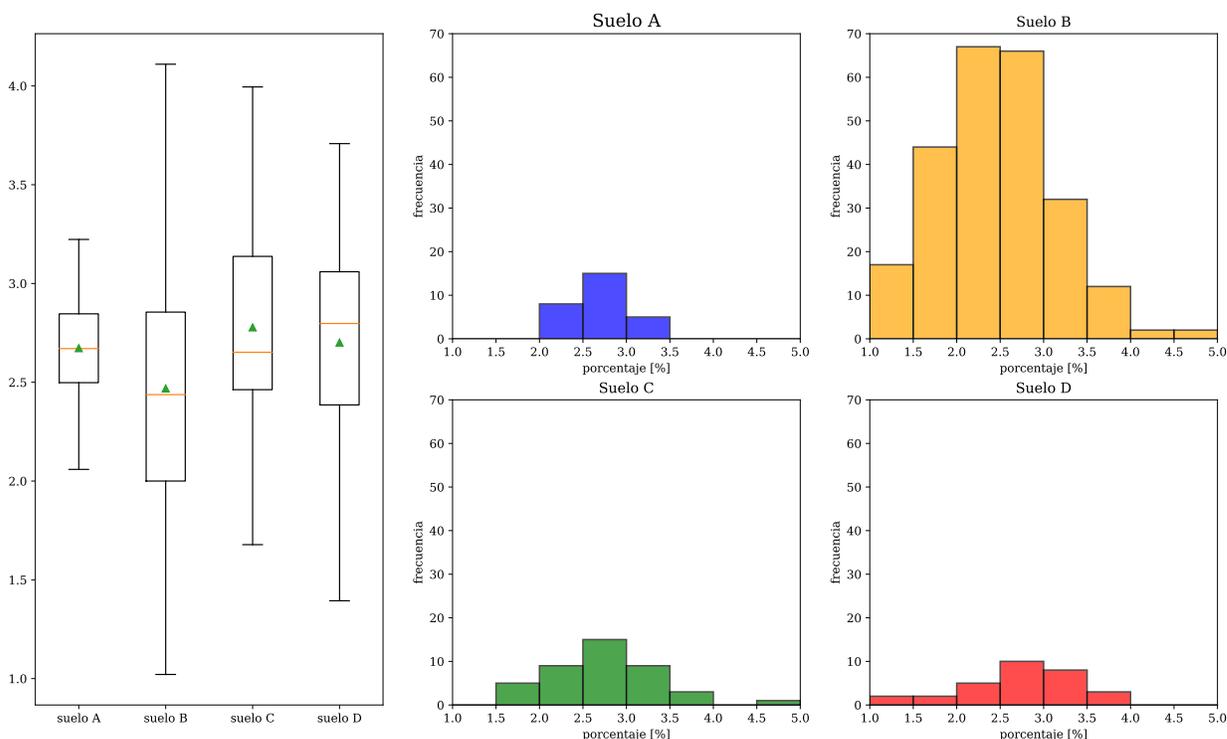


Figura 4.18: Densidad de muros según clasificación de suelo según DS61 para piso tipo

La figura 4.19 corresponde a la distribución de densidad de muros según la clasificación para la zona sísmica, indicada en la norma de diseño sísmico. Notar que la muestra solo se compone de proyectos ubicados en zona sísmica 2 y 3, con 120 y 51 edificios respectivamente.

Siendo Chile un país sísmico, la sismicidad no se distribuye de la misma forma en todo el país. En efecto, “en Chile continental, al norte de la Península de Taitao, se presenta una tectónica de convergencia y subducción de la plaza de Nazca bajo el continente, reflejada en una mayor actividad sísmica a lo largo de la costa con disminución importante hacia el Este” (INN, 2011). De esta forma la zona 3 indica un mayor peligro sísmico que la zona 2.

Del valor promedio para cada nivel y zona sísmica de la tabla 4.4, en todos los niveles el promedio para la zona 3 es mayor. Lo anterior es el comportamiento esperado en base al peligro sísmico que esta zona refleja. Además, en edificios ubicados en zona 2 la variación en altura de la densidad es muy baja.

Tabla 4.4: Densidad de muros promedio según zona sísmica

	piso subterráneo	primer piso	piso tipo
zona sísmica 2 (Z2)	2.46 %	2.45 %	2.42 %
zon sísmica 3 (Z3)	3.29 %	3.36 %	2.84 %

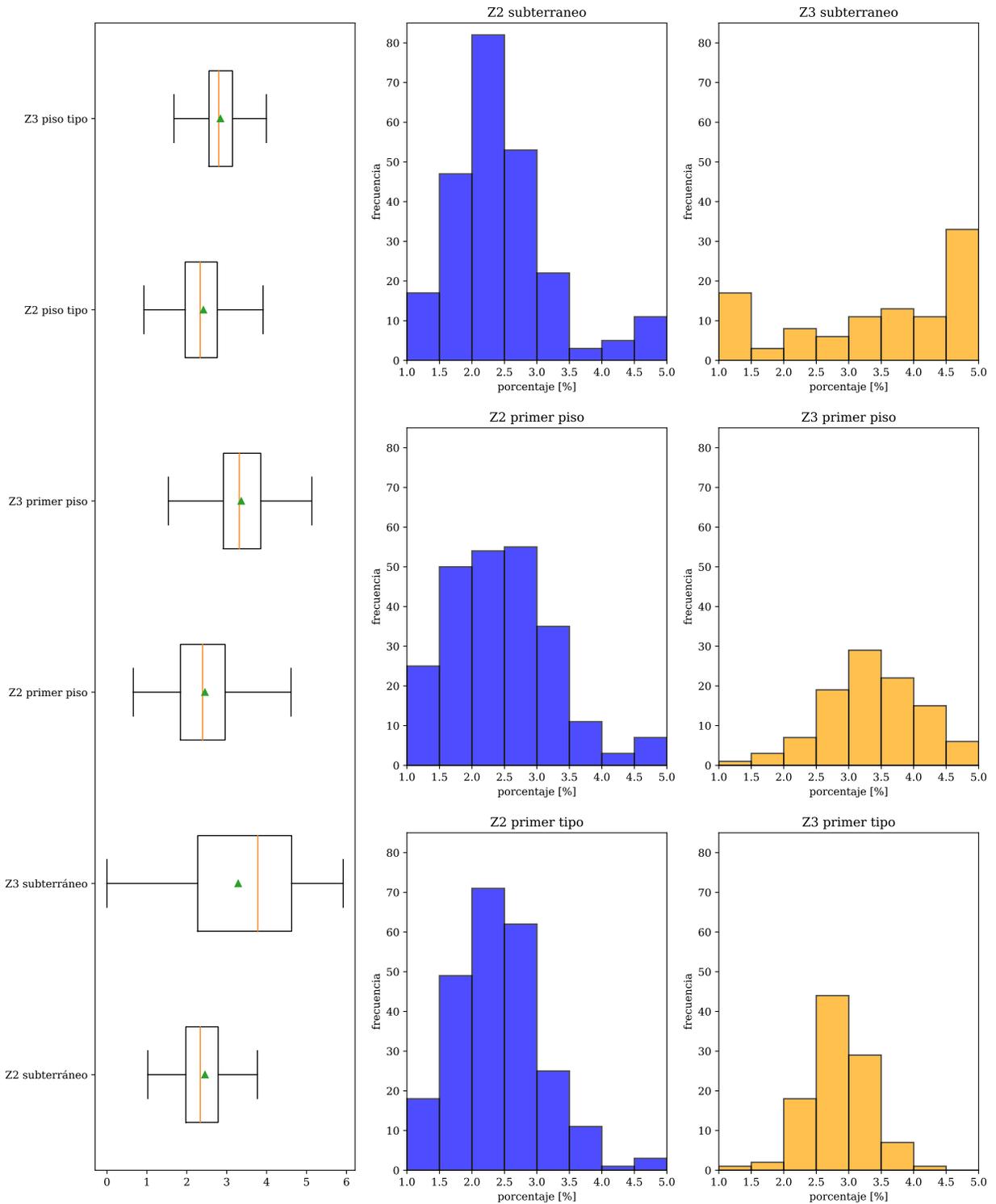


Figura 4.19: Densidad de muros zona sísmica para la muestra en estudio

De lo observado se infiere que la densidad de muros presenta cambios según la clasificación de suelo y zona que tenga el proyecto. En efecto, sin considerar el caso particular en suelo A, entre más desfavorable es la clasificación del suelo, mayor es la densidad de muros. Por su parte, si la zona implica una mayor sismicidad, la densidad de muros también aumenta.

Los valores de la densidad de muros en suelo A, se debe a que todos los proyectos con esta clasificación se ubican en zona sísmica 3. Específicamente, en la costa de las regiones de Tarapacá y Antofagasta (figura 4.4c). Por lo tanto, en el sector clasificado con zona 3 y suelo A, la influencia de la sismicidad es mayor que las propiedades del suelo para la densidad de muros.

Lo mencionado en el párrafo anterior, es una conclusión válida solo para la muestra estudiada, la cual contiene solo 14 edificios en dicho grupo, cantidad que no es suficiente para generalizar el resultado obtenido. En efecto, la distribución no es homogénea en las variables estudiadas si se tiene en consideración que el grupo de edificios en suelo B es un 70.8% del total, mientras que el grupo en zona sísmica 2 corresponde a un 70.2%.

Densidad de muros d_{np}

Este indicador se define como:

$$d_{np} = \frac{\text{Área de muros en una dirección } [m^2]}{\text{Peso de pisos sobre nivel considerado } [tonf]} \quad (4.2)$$

Dado que el inverso de d_{np} tiene unidades de presión, este indicador permite controlar la compresión de los elementos estructurales de la estructura. De acuerdo al Perfil Bio-sísmico, se recomiendan valores sobre $0.1 \text{ m}^2/tonf$.

La información facilitada por RLE contiene el valor de d_{np} asociado a cada proyecto para el primer piso, el cual suelen producirse las principales irregularidades estructurales y en donde ocurre el trancamiento de la estructura. Por ende, el primer piso es donde se concentran las mayores sollicitaciones sísmicas y de compresión.

Se analiza este indicador para la dirección longitudinal (figura 4.20) y transversal (figura 4.21). En primera instancia, en ambas direcciones la mayoría de los casos se ubica sobre 0.1. Específicamente, un 94.15 % en el eje x y 96.49 % en el eje y. Además, en la dirección longitudinal el promedio es de $0.216 \text{ m}^2/tonf$ y en la dirección transversal es de $0.235 \text{ m}^2/tonf$.

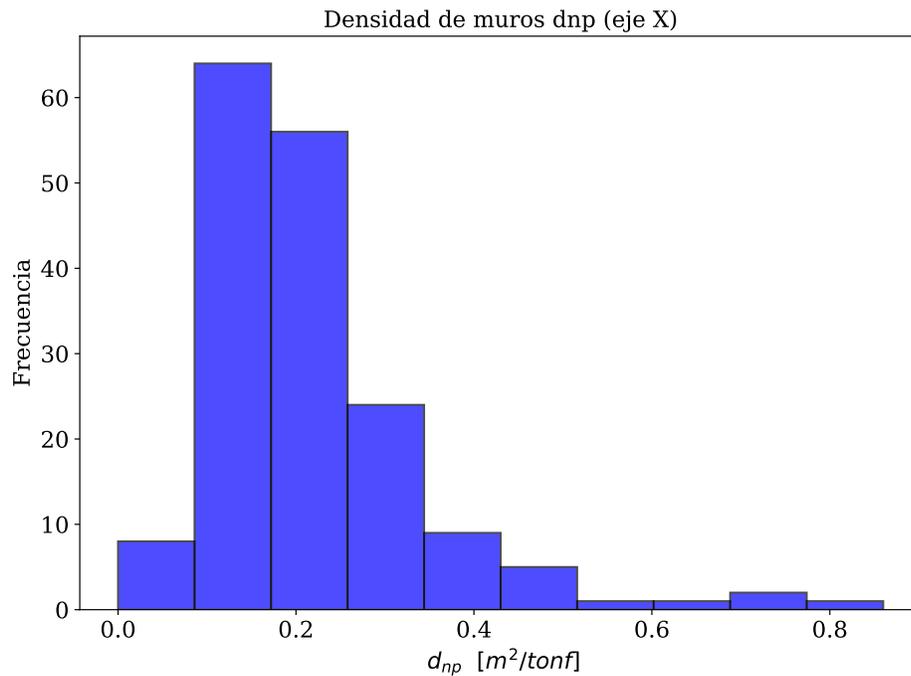


Figura 4.20: Distribución de la densidad d_{np} en la dirección X

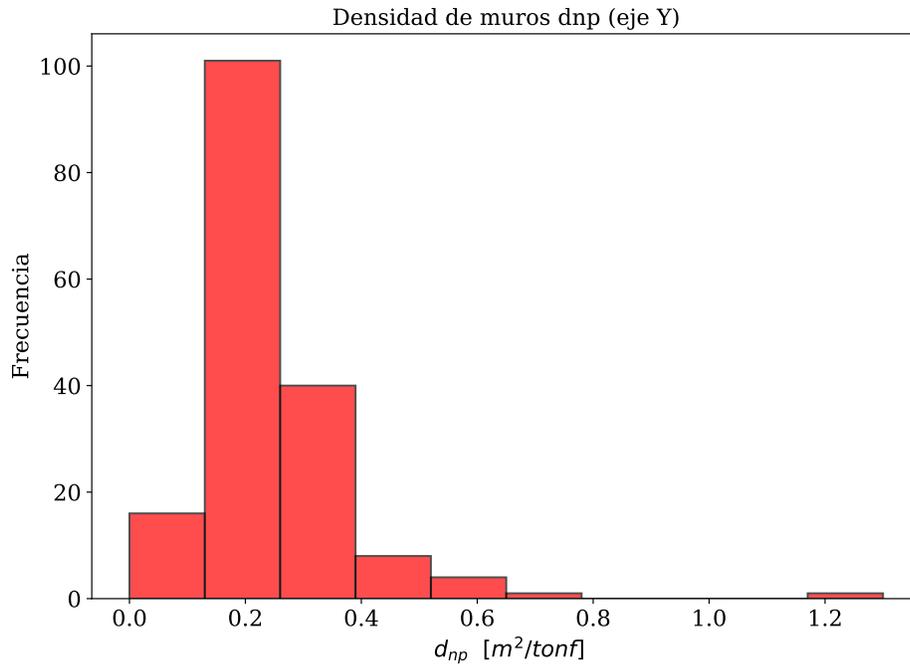


Figura 4.21: Distribución de la densidad d_{np} en la dirección Y

Por último, se analiza la evolución de este indicador en la figura 4.22. La tendencia es en general constante aunque con un ligero aumento en los último años, donde el promedio suele estar cercano a $0.2 \text{ m}^2/\text{tonf}$ anualmente. Esto coincide con los estudios realizados por Gómez (2001) y Calderón (2007), en los cuales el indicador d_{np} tiene valores similares a los obtenidos para proyectos posteriores al año 1985.

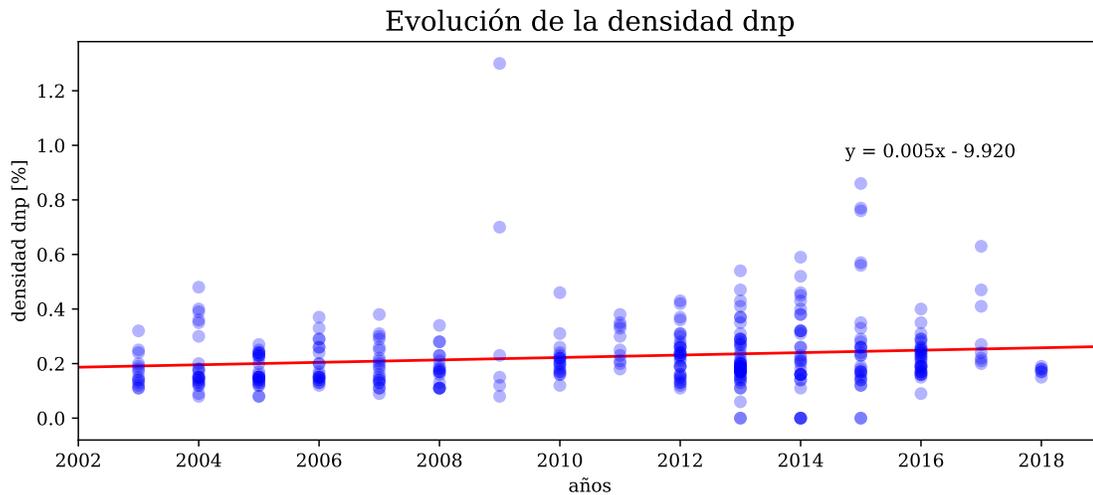


Figura 4.22: Variación de la densidad de muros d_{np} entre los años 2003 y 2018

Características estructurales

- *Espesor de muros*

Con el fin de conocer los edificios con muros de hormigón armado, se analizan una serie de características generales que entregarán nociones básicas de cómo son los edificios destinados al uso residencial.

La primera característica es el espesor promedio de los muros. En la figura 4.23 se expone la distribución para los diferentes niveles. Se observa una mayor cantidad de espesores sobre los 20 *cm* para el subterráneo y primer piso, siendo ligeramente mayor para este último. Por lo tanto se concluye que en general, el espesor disminuye con la altura. En efecto, para el piso tipo los valores se concentran entre los 20 y 25 *cm* con un promedio de 20.5 *cm*.

En la etapa de estructuración cuando se tiene una disposición definida de los muros, se busca definir los espesores que satisfagan los límites normativos para los esfuerzos de corte y compresión. Como la compresión disminuye con la altura, los espesores también suelen disminuir.

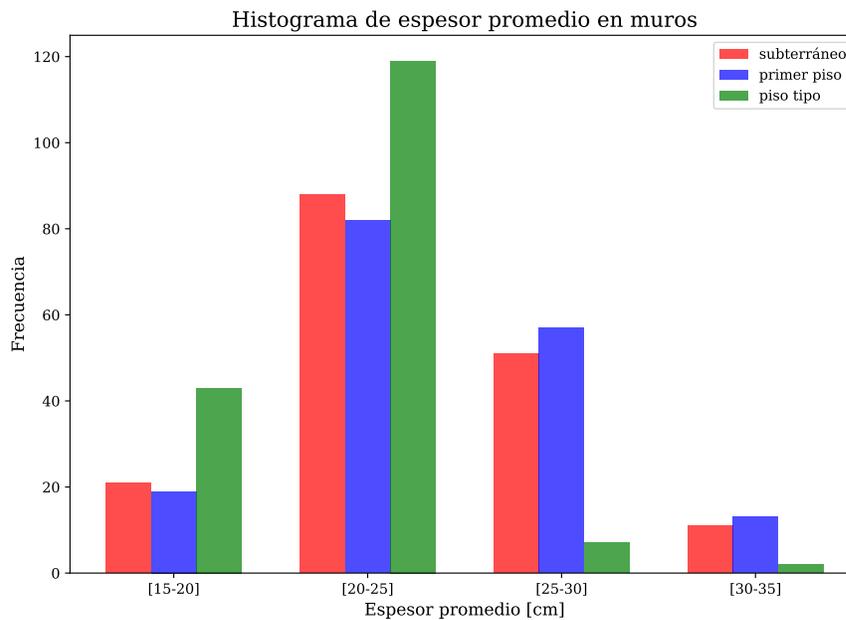


Figura 4.23: Espesor promedio de muros por piso en la muestra

- *Espesor de losa*

Este valor suele estar determinado por las solicitaciones en planta, las cuales se definen según el uso del espacio. De este modo, se tiene un valor promedio de 15.3 *cm*. Los valores extremos para la muestra son de 11 *cm* y 20 *cm*.

- *Altura entrepiso*

La altura entrepiso se establece en la etapa de estructuración por la especialidad de arquitectura. El valor promedio está en 2.54 *m* con un mínimo de 2.25 *m* y un máximo de 2.88 *m*.

Sin embargo, en proyectos de este tipo, el primer piso y subterráneo suelen tener una altura mayor, debido al flujo de vehículos y tránsito de personas.

- *Área en planta*

El área en planta da nociones de la envergadura que un proyecto posee. Para esto, se debe diferenciar entre el área en planta del piso y del resto de los niveles. El subterráneo y primer piso suelen tener mayor área debido al espacio asignado a estacionamientos o jardinería.

De esta manera, para el piso tipo el área promedio de un proyecto habitacional es de 700.7 m^2 . Para el cielo del primer piso este valor aumenta a 728.4 m^2 . Por último, el área promedio para el cielo del primer subterráneo es de 1238.5 m^2 .

4.4. Estudio de cambios en etapa de diseño de edificios

El estudio realizado hasta el momento se ha centrado en la estructuración final de cada edificio. Esto corresponde a los últimos planos de ingeniería, en los cuales se satisfacen requerimientos de desplazamiento y solicitaciones en cada uno de los elementos estructurales.

Ahora bien, es interesante también estudiar las modificaciones que sufre un proyecto desde su concepción en la etapa conceptual, hasta la última entrega hecha por cálculo. Para esto, se compara la primera arquitectura con la última revisión de ingeniería en base a planos en planta del primer subterráneo, primer piso y piso tipo.

En primer lugar, se examinan las variaciones en el espesor promedio de muros por planta entre ambas especialidades. De esta manera, la figura 4.24 muestra la distribución del espesor de muros para el cielo del primer subterráneo. El promedio de muros en ingeniería es de 24.34 *cm*, mientras que en arquitectura es de 21.87 *cm*. Además, la cantidad de casos sobre 25 *cm* en ingeniería es de 60 (35.09% del total), mientras que en arquitectura son solo 22 casos (12.9% del total). Por último, en el rango de 15-20 *cm*, la cantidad de casos es mayor en la especialidad de arquitectura.

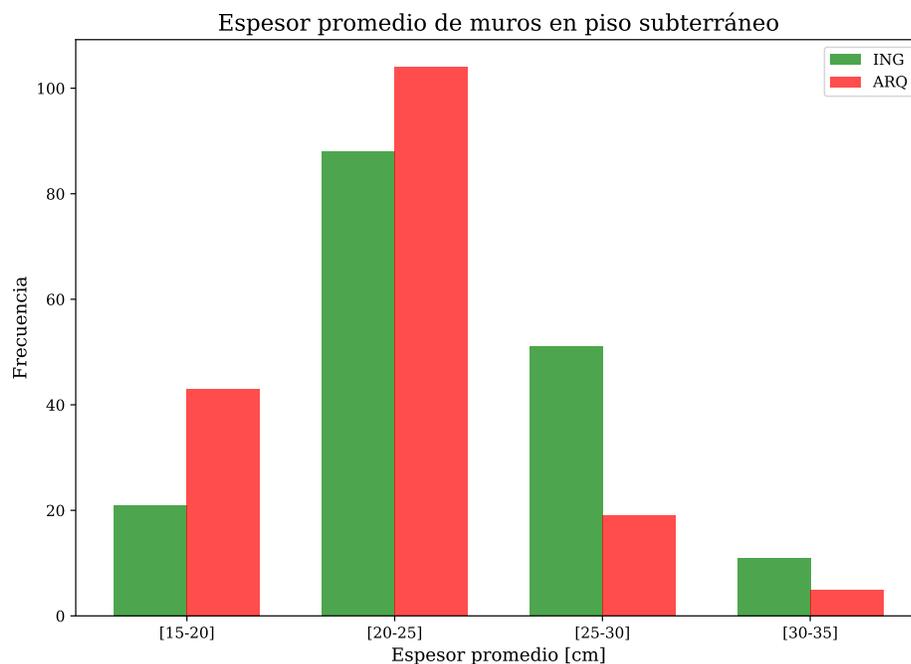


Figura 4.24: Distribución de espesor promedio de muros en subterráneo por especialidad

Para el primer piso (figura 4.25), la distribución del espesor promedio de muros es similar al subterráneo. En efecto, se observan más casos sobre 25 *cm* en ingeniería, correspondientes al 26.7% del total de edificios mientras que en arquitectura solo llega al 11.1%. El valor promedio de la distribución es de 21.1 *cm* en arquitectura y 24.1 *cm* en ingeniería.

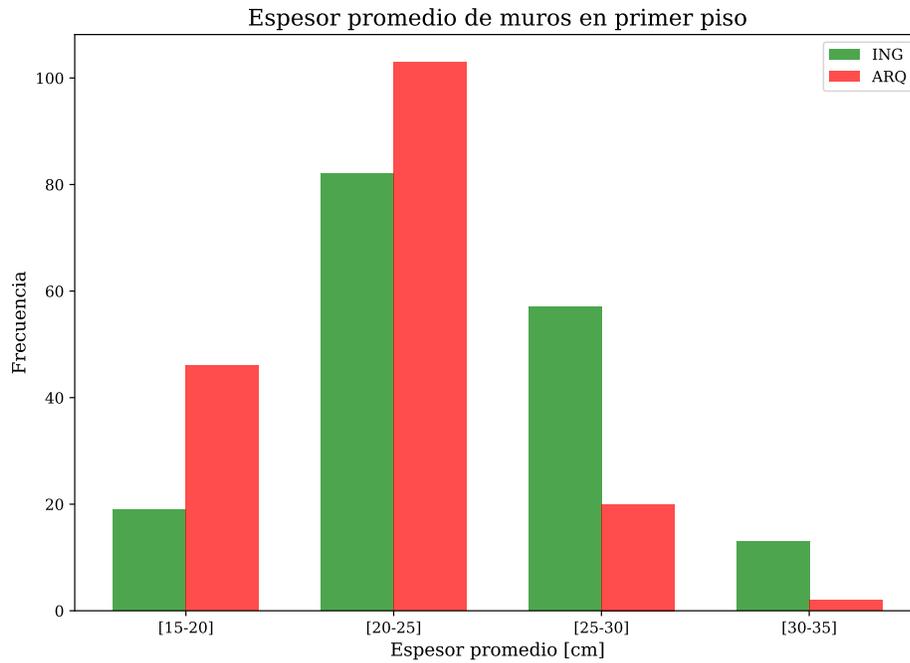


Figura 4.25: Distribución de espesor promedio de muros en primer piso por especialidad

Por último, para el piso tipo hay una cantidad significativa de proyectos entre los 20 y 25 *cm* para ambas especialidades. Además, a diferencia de los otros pisos, la distribución es similar entre arquitectura e ingeniería. Esto se observa en el valor promedio de los datos, ya que en ambos es igual a 20.5 *cm*. Otro observación que se obtiene de la figura 4.26 es la baja cantidad de edificios con valores sobre 25 *cm* en el piso tipo.

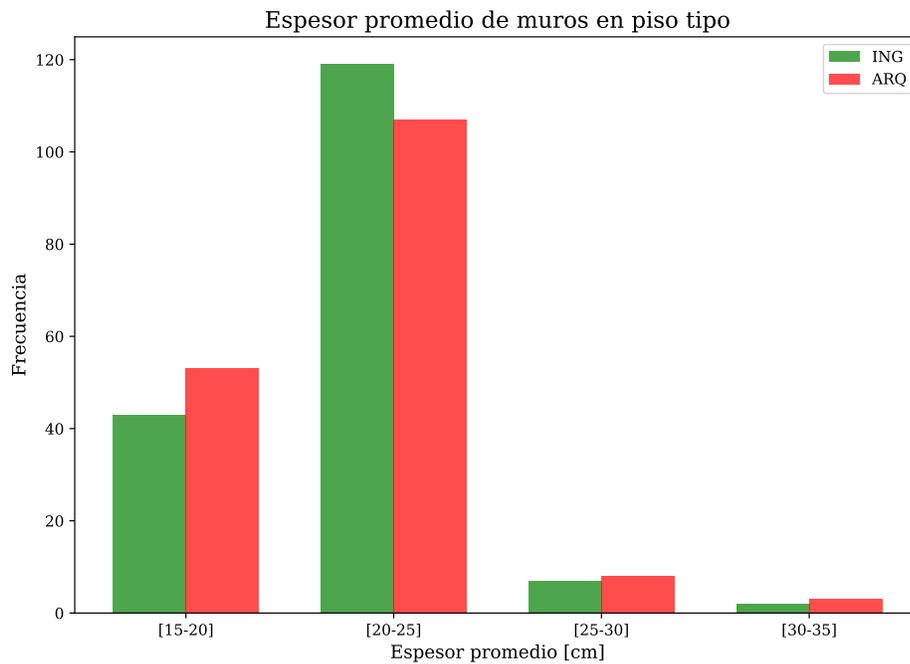


Figura 4.26: Distribución de espesor promedio de muros en piso tipo por especialidad

La tabla que se expone a continuación da cuenta de la media para cada distribución del espesor promedio de muros:

Tabla 4.5: Medias para el valor promedio del espesor de muros en cada piso para especialidad de arquitectura e ingeniería

	Media del Espesor promedio de muros [cm]	
	Arquitectura	Ingeniería
piso subterráneo	21.9	24.3
primer piso	21.1	24.1
piso tipo	20.5	20.5

De esta manera, se concluye que en general el espesor de muros tiende a aumentar en el subterráneo y en el primer piso durante el diseño. Esto ya se había observando anteriormente al analizar las plantas de ingeniería. Por su parte, en arquitectura los valores no cambian de manera significativa con la altura, motivo por el cual se concentran en mayor medida cerca de los 20 *cm*. Para el piso tipo, los espesores se mantienen desde el primera arquitectura, lo cual se debe a la disminución de las solicitaciones de los elementos estructurales con la altura.

Por otra parte, la variación del espesor no entrega información de cuánto varía el área o el número de elementos por planta. En efecto, puede existir el caso en que el proceso de diseño mantuvo el espesor de los muros, pero aumentó el número de estos con el fin de tener más área para distribuir las tensiones.

De este modo, la figura 4.27 expone los cambios de área y espesor de muros para cada piso. El eje x corresponde al cociente entre el espesor promedio de arquitectura e ingeniería, mientras que el eje y representa el cociente del área de muros entre ambas especialidades. El aumento o disminución del área y/o espesor definen 4 casos, asociados a los cuadrantes que dividen los gráficos de la figura. A continuación se describe qué representa cada cuadrante:

- cuadrante I: Disminuye área de muros y aumenta espesor promedio de muros
- cuadrante II: Disminuye área de muros y disminuye espesor promedio de muros
- cuadrante III: Aumenta área de muros y aumenta espesor promedio de muros
- cuadrante IV: Aumenta área de muros y disminuye espesor promedio de muros

Para el primer subterráneo, hay una concentración de casos cercanos al punto (1,1) que representa a proyectos que sufren pocos cambios tanto de área como espesor de muros. Sin embargo, el resto se ubica en el cuadrante III en su mayoría. De la descripción anterior, se tiene que la cantidad y dimensiones de elementos estructurales aumenta en el diseño.

Como lo subterráneos están destinados al flujo de vehículos, los muros y/o columnas que se encuentran entre estacionamientos no suelen venir definidos por arquitectura. Solo se disponen muros interiores y que se conservan en los pisos superiores. Por lo tanto, en la estructuración se observa un aumento en el número de elementos estructurales. Además como la relación de aspecto entre largo y espesor suele ser menor a 3 en algunos casos, las muros se arman como columnas cuyo ancho es mayor al espesor promedio de la planta.

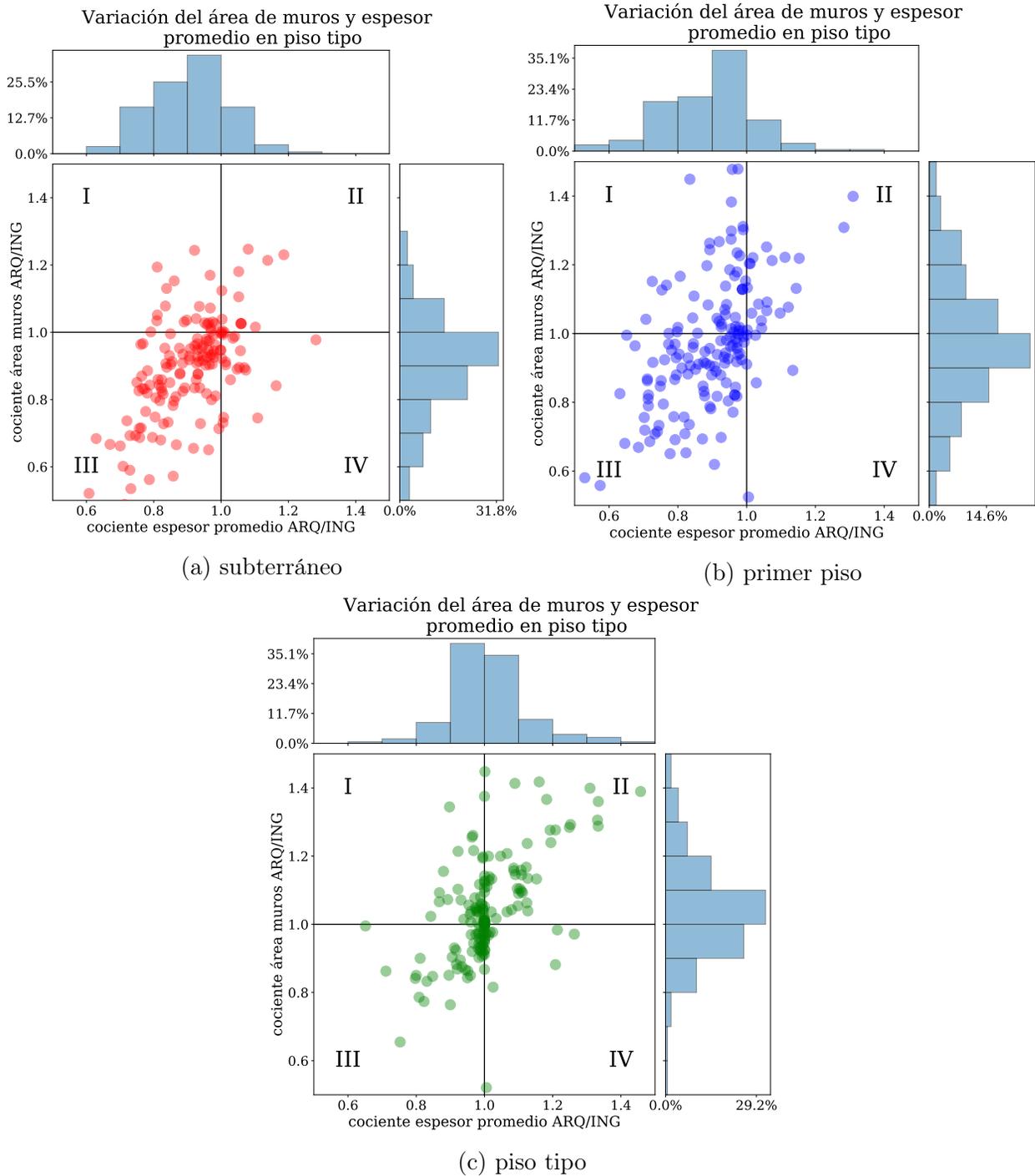


Figura 4.27: Cambio en el área total y espesor promedio de muros durante el proceso de diseño estructural

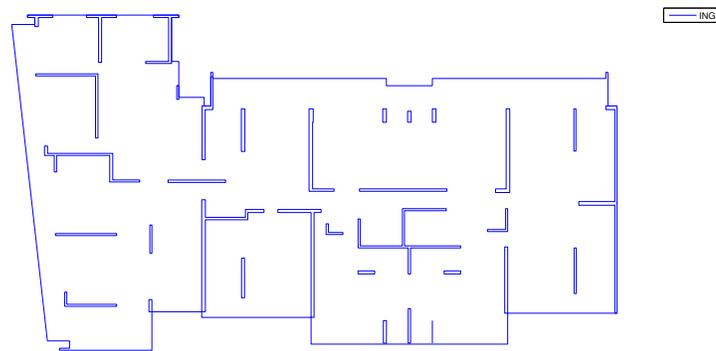
Adicionalmente, en vista de cómo se distribuyen los casos del cuadrante III, se concluye que el aumento de área es más significativo que el aumento del espesor. En efecto, los puntos en dicho cuadrante están dispersos entre 0.5 y 1 en el eje x, mientras que en el eje y son más cercanos a 1.

En lo que respecta al primer piso, la distribución de los puntos en la figura 4.27b es similar

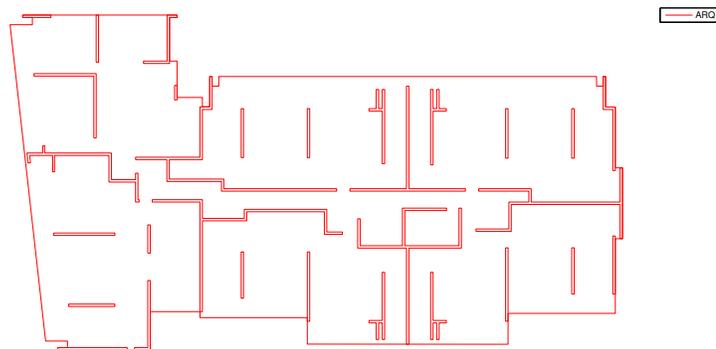
al subterráneo. Sin embargo, hay un aumento de casos en el cuadrante I y los puntos en el cuadrante III tienen menos variación en el área de muros, en comparación a la figura 4.27a. De esta forma, el aumento del espesor de muros es una característica generalizada en este piso.

En cuanto al área de estos, de los casos en los cuales aumenta el espesor, el 28.7% presenta una disminución del área. En cambio en un 55.6% del total de edificios el área aumenta. Las razones para que el área aumente son similares a las descritas anteriormente, en donde la ausencia de muros obliga al ingeniero a definir la disposición de elementos estructurales en los espacios necesarios.

Por otro lado, que el área disminuya se puede deber al exceso de muros asignados como estructurales que arquitectura define en el diseño preliminar o bien, a cambios en torno al uso esperado para la planta. Hay que tener en cuenta que el primer piso se generan las principales irregularidades estructurales en altura. Debido a muros que disminuyen en longitud y otros que desaparecen a esta altura (muros invertidos). De esta forma, en base al criterio del calculista, se definen muros tanto estructurales como no estructurales.



(a) Revisión final de Ingeniería



(b) Primer diseño de Arquitectura

Figura 4.28: Planta Cielo Primer Piso de proyecto habitacional para especialidades de arquitectura e ingeniería

La figura 4.28 muestra el diseño de ambas especialidades para un mismo proyecto. Se observan muros que no fueron considerados para formar parte del sistema estructural en el proceso de diseño y otros que disminuyeron en largo. Como resultado, la relación $A_{\text{muros arq}}/A_{\text{muros ing}}$ es mayor a 1. Además como este edificio corresponde a un caso ubicado en el cuadrante I de la figura 4.27b, el espesor promedio también aumenta.

Por último, en el piso tipo el espesor es un parámetro que no suele variar entre ambas especialidades. Al analizar la figura 4.27c se observa que la variación del área de muros no supera el 20 % en el 81.9 % del total de proyectos. De esta manera, se concluye que la planta tipo es el nivel que menos modificaciones sufre durante el diseño.

Conociendo los cambios del espesor y área, se procede a evaluar cuánto varía la disposición espacial de los elementos en planta. En otras palabras, se busca conocer cuánto se desplazan los muros con respecto a su posición inicial, y cuántos de ellos no son considerados para formar parte del sistema estructural.

La metodología para esto consiste en superponer el plano de ingeniería sobre el de arquitectura y calcular el área de la intersección. Ahora bien, los muros pueden que se desplacen lo suficiente para que la intersección sea nula. Para esto, se incorpora el parámetro α , que corresponde a la tolerancia bajo la cual un muro se puede mover (figura 4.29). De esta forma, el muro de arquitectura se desplaza dentro del perímetro definido por la tolerancia, determinando la mayor área de intersección.

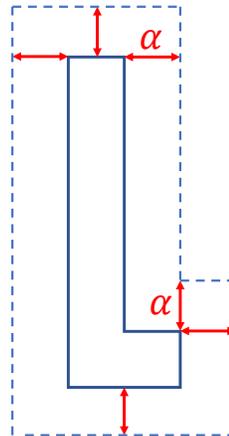


Figura 4.29: Tolerancia α para la ubicación de un muro en planta

En la figura 4.30 se muestra el porcentaje de área que se conserva respecto al área de arquitectura. Lo anterior se realiza por piso y para cuatro tolerancias: 5, 10, 25 y 50 *cms*. Lo primero que se observa es la proporción existente en todos los niveles entre el parámetro α y el porcentaje de área que se conserva. Un ejemplo es la nula presencia de casos menores al 25 % para $\alpha = 50 \text{ cm}$. Sin embargo, para $\alpha = 5 \text{ cm}$ hay una cantidad importante de casos entre 75 % y 100 % de área que se conserva. Esto quiere decir que en muchos proyectos la ubicación de los muros no sufre cambios significativos.

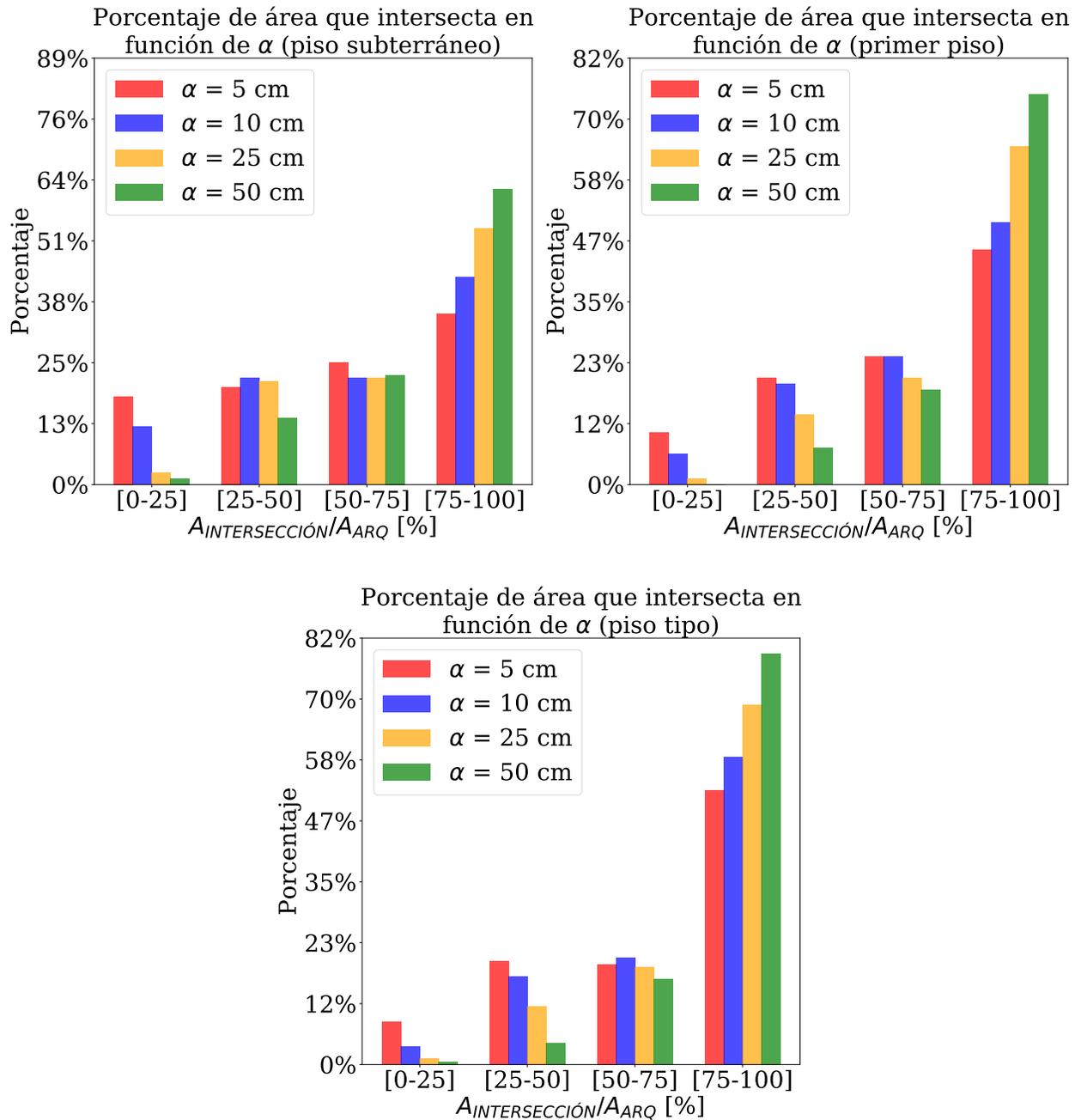
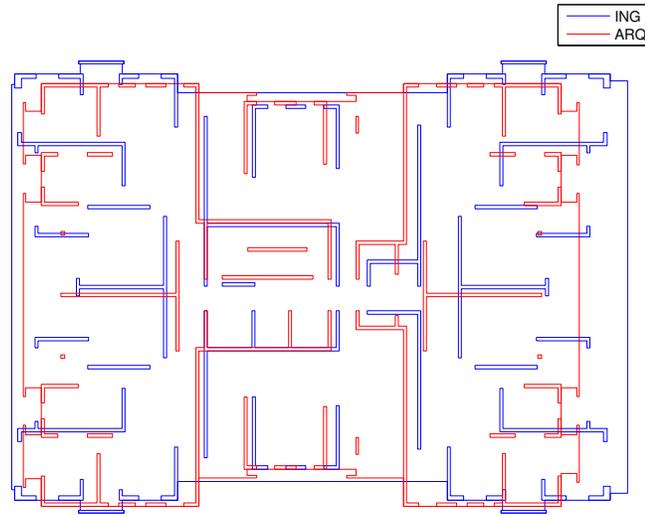


Figura 4.30: Cambio en el área total y espesor promedio de muros durante el proceso de diseño estructural

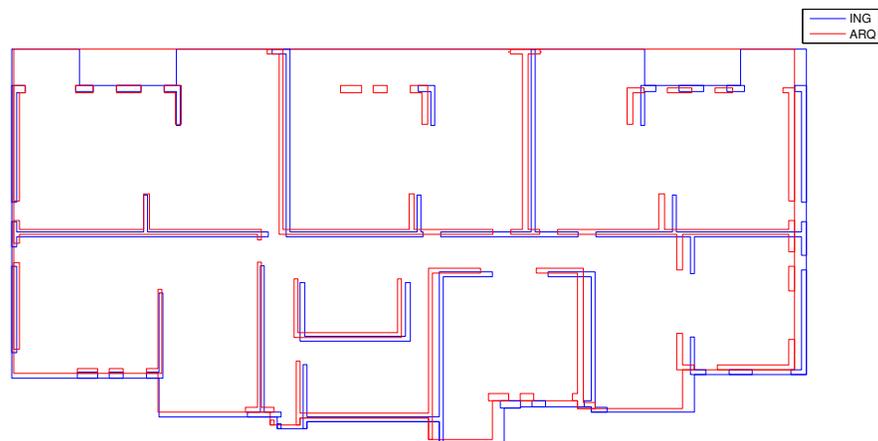
Por nivel, se observa que los cambios en la posición de muros disminuye con la altura. En el piso tipo la cantidad de casos con $A_{intersección}/A_{arq}$ sobre el 75 % es mayor al resto de los pisos. Para el subterráneo sólo un 56.7 % del total de edificios conserva más del 75 % del área con $\alpha = 50$ cm.

Al analizar los edificios con poco porcentaje de intersección, se observa que el diseño se mantiene pero se modifican las distancias entre los ejes. La figura 4.31a muestra la super-

posición de ambas especialidades para un proyecto en particular. Se tiene un aumento de la planta en la dirección longitudinal lo cual implica que todos los muros se desplacen de forma significativa. En cambio, la figura 4.31b muestra un proyecto en el cual se mantiene de manera significativa la posición de los muros.



(a)



(b)

Figura 4.31: Ejemplo de proyecto con baja (a) y alta (b) intersección de área de muros

Adicionalmente, se analiza la diferencia de los centros de masas asociados a los muros en cada dirección. En la figura 4.32 se tiene que en la mayoría de los casos tanto en el eje x como en el eje y, la diferencia es menor a 1 metro. El promedio del desplazamiento asociado al centro de

masas para el nivel subterráneo, primer piso y piso tipo se resume en la tabla 4.6.

En cuanto a la diferencia de los niveles, el subterráneo presenta mayor variación en comparación del resto de los pisos. En cambio, el piso tipo es el que posee menos variación, con un promedio menor a 50 *cm* en ambas direcciones. Por otro lado, es en la dirección x en donde varía de mayor manera el centro de masas. Esto concuerda con lo observado antes durante el análisis del área de intersección, en donde los proyectos cambian sus dimensiones principalmente en la dirección horizontal.

Tabla 4.6: Variación promedio del centro de masas entre especialidades para cada piso y dirección de análisis

	$ X_{ARQ} - X_{ING} $ [cm]	$ Y_{ARQ} - Y_{ING} $ [cm]
piso subterráneo	111.4	80.2
primer piso	73.4	54.7
piso tipo	48	31

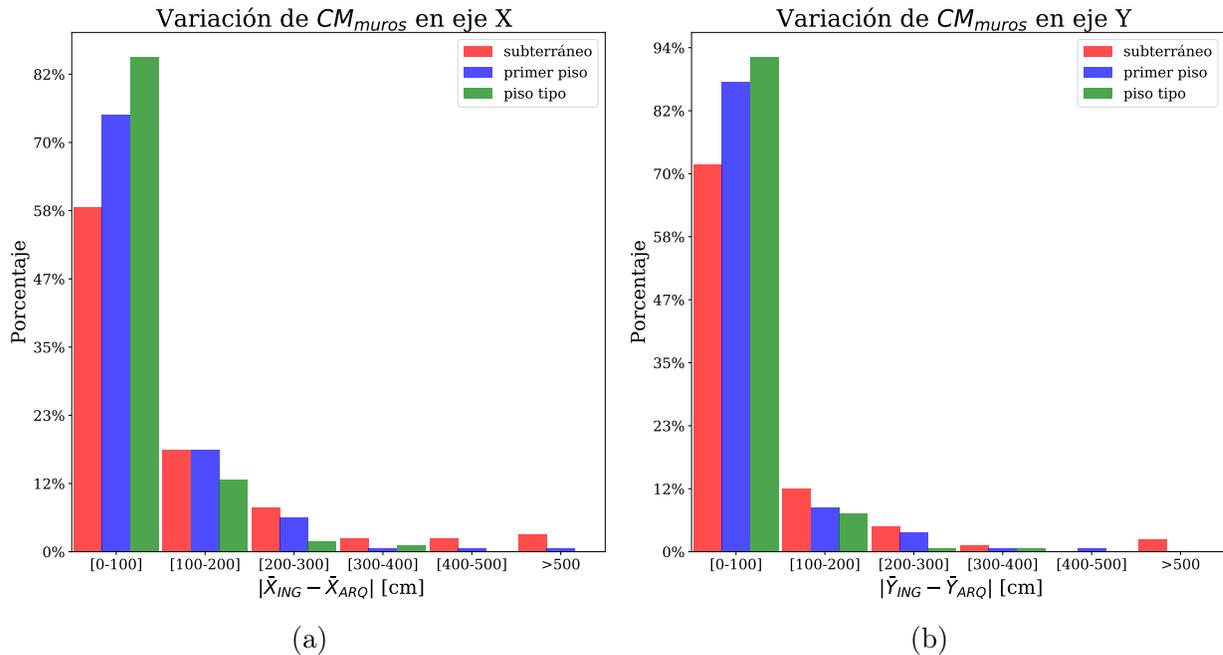


Figura 4.32: Cambio en el área total y espesor promedio de muros durante el proceso de diseño estructural

En definitiva, se concluye que la ubicación de los muros en general no varía en el diseño. La elección de los muros estructurales se definen en base a la propuesta preliminar hecha por arquitectura en el diseño. Sin embargo, dadas las modificaciones de ambas especialidades, la posición puede variar según requerimientos tanto arquitectónicos como ingenieriles.

Capítulo 5

ESTIMACIÓN DEL PERÍODO CON APRENDIZAJE AUTOMÁTICO

5.1. Introducción

Del análisis realizado en el capítulo anterior, se evidencia que la caracterización del denominado “Edificio Chileno” no muestra variaciones significativas. En efecto, los resultados obtenidos siguen la misma tendencia presentada en estudios previos. De esta forma, los valores de indicadores asociados a la rigidez se mantienen dentro de rangos bien definidos, como el parámetro H/T y la densidad de muros.

Dada la regularidad de las propiedades estructurales, se asume que el período fundamental en estructuras típicas chilenas siguen una regla cercana a $T = N/20$ (seg), donde N corresponde al número de pisos (Lagos et al., 2017). Sin embargo, esta expresión corresponde solo a una aproximación general del comportamiento observado en diferentes edificios. Además no considera variables asociadas a la masa o rigidez de muros, que son los parámetros que controlan el período de vibración en una estructura.

Por lo tanto, durante el desarrollo de este capítulo se busca obtener una expresión alternativa para estimar el período. Las variables a utilizar serán propiedades geométricas como la altura del edificio y la inercia de muros en planta, que están estrechamente relacionadas con la rigidez del sistema estructural. Para esto, se utilizará Aprendizaje Automático para ajustar la expresión en base a los atributos a escoger.

5.2. Período en función del número de pisos

Previo a obtener una expresión para el período es necesario analizar la precisión de la fórmula aproximada que se usa habitualmente. En la figura 5.1 se muestra la dispersión considerando sin distinción el período en la dirección longitudinal y transversal para un mismo edificio:

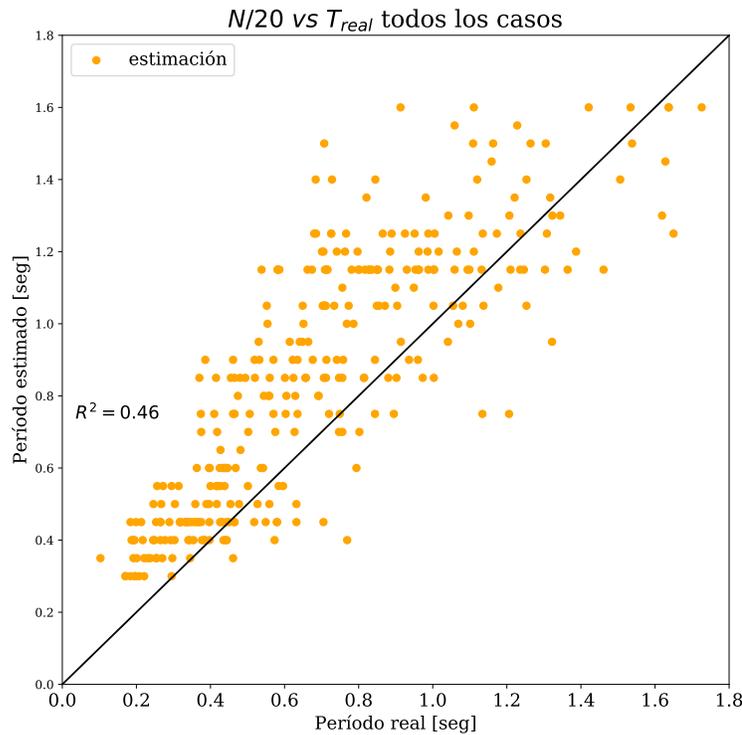


Figura 5.1: Estimación $N/20$ versus el período del edificio en ambas direcciones en conjunto

Para cuantificar la expresión se utiliza el coeficiente de determinación R^2 sobre el total de la muestra, obteniendo un valor igual a 0.46. En base a este resultado, se concluye en una primera instancia, una baja precisión para estimar el período. Sin embargo, si se analiza cada dirección de análisis por separado (figura 5.2) se aprecia que en la dirección transversal se obtienen mejores estimaciones que la dirección longitudinal. En efecto, R^2 es igual a 0.70 en el primer caso, mientras que en el segundo es igual a 0.024. De esta manera, se concluye que la expresión analítica $T = N/20$ permite hacer estimaciones del período principalmente en la dirección transversal.

Sin embargo, en la figura 5.2a se observa que el bajo valor de R^2 puede mejorar si se ajusta el factor que multiplica al número de pisos. Para esto, se realiza una regresión lineal sobre el total de casos en cada dirección, con el fin de obtener una expresión con un coeficiente de determinación mayor.

En una primera instancia se determinan los coeficientes α y β de la expresión $T = \alpha N + \beta$. Los valores de β obtenidos son de 0.02 y -0.04 en la dirección longitudinal y transversal respectivamente. Debido a esto, se fuerza a que los datos estén centrados, es decir, se impone $\beta = 0$ y sólo se ajusta el coeficiente α .

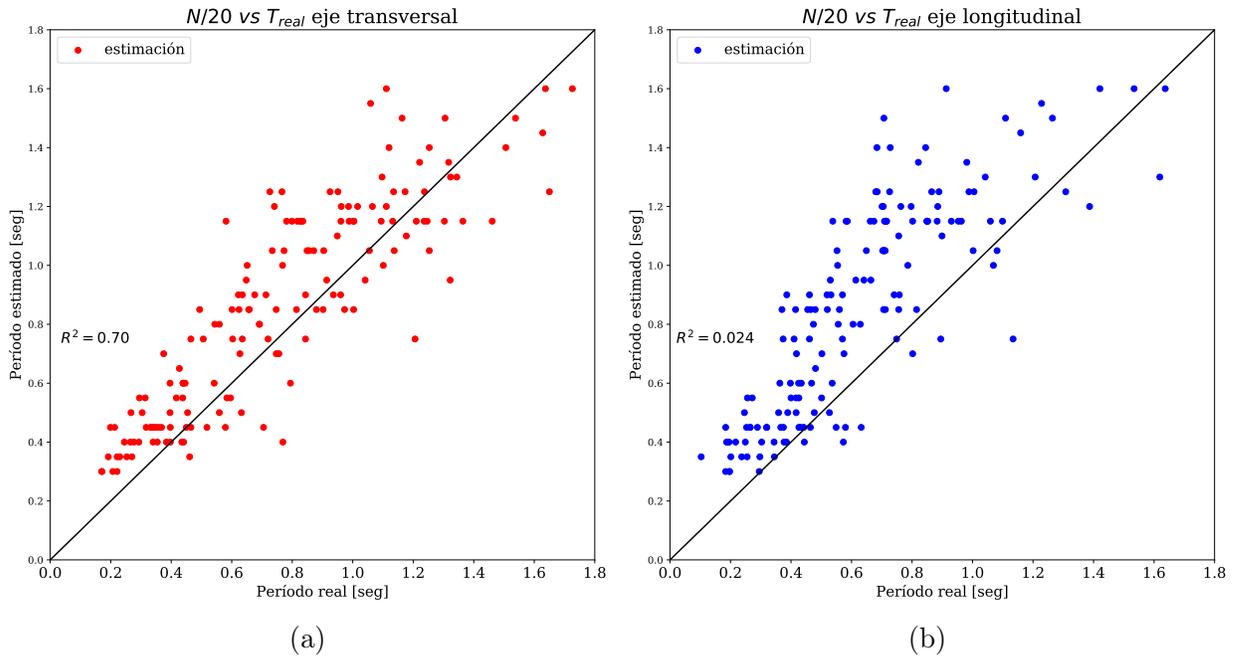


Figura 5.2: Estimación del período con regresión lineal versus período real, en cada dirección de análisis

En la figura 5.3 se exponen los resultados obtenidos al realizar una regresión lineal en cada eje. En la dirección transversal se mejora R^2 de 0.70 a 0.77 con un $\alpha = 0,045$, ligeramente menor al de la fórmula simplificada. En la dirección longitudinal con $\alpha = 0,037$, el valor de R^2 crece de manera significativa pasando de 0.024 a 0.68.

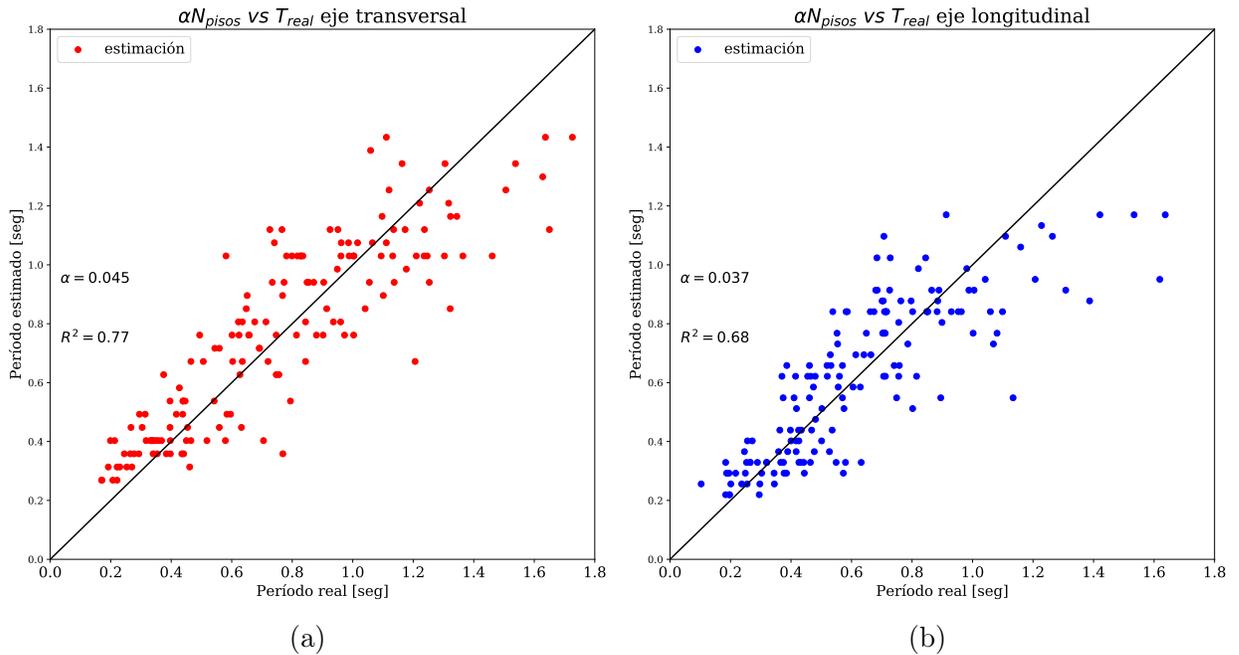


Figura 5.3: Ajuste de la expresión $T = \alpha N$ en cada dirección

La variación de los factores para cada dirección de análisis está ligado a la rigidez que tiene el edificio en cada eje. De esta manera, al considerar propiedades geométricas se podría obtener una expresión general que no distinga la dirección de análisis, a diferencia de la fórmula simplificada que sólo es válida en el eje flexible de la estructura (dirección transversal).

5.3. Exploración de datos

Se sabe que el período para un oscilador simple de un grado de libertad de masa M y rigidez K corresponde a:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K}} \quad (5.1)$$

En la etapa de diseño se utiliza como supuesto que la masa por unidad de área es igual a $1 \text{ ton}/m^2$ (Lagos et al., 2017). De esta forma, es posible estimar la masa de un edificio a partir del área en planta de cada uno de los niveles, la cual se obtuvo en el procesamiento de planos asociados a la última revisión de ingeniería.

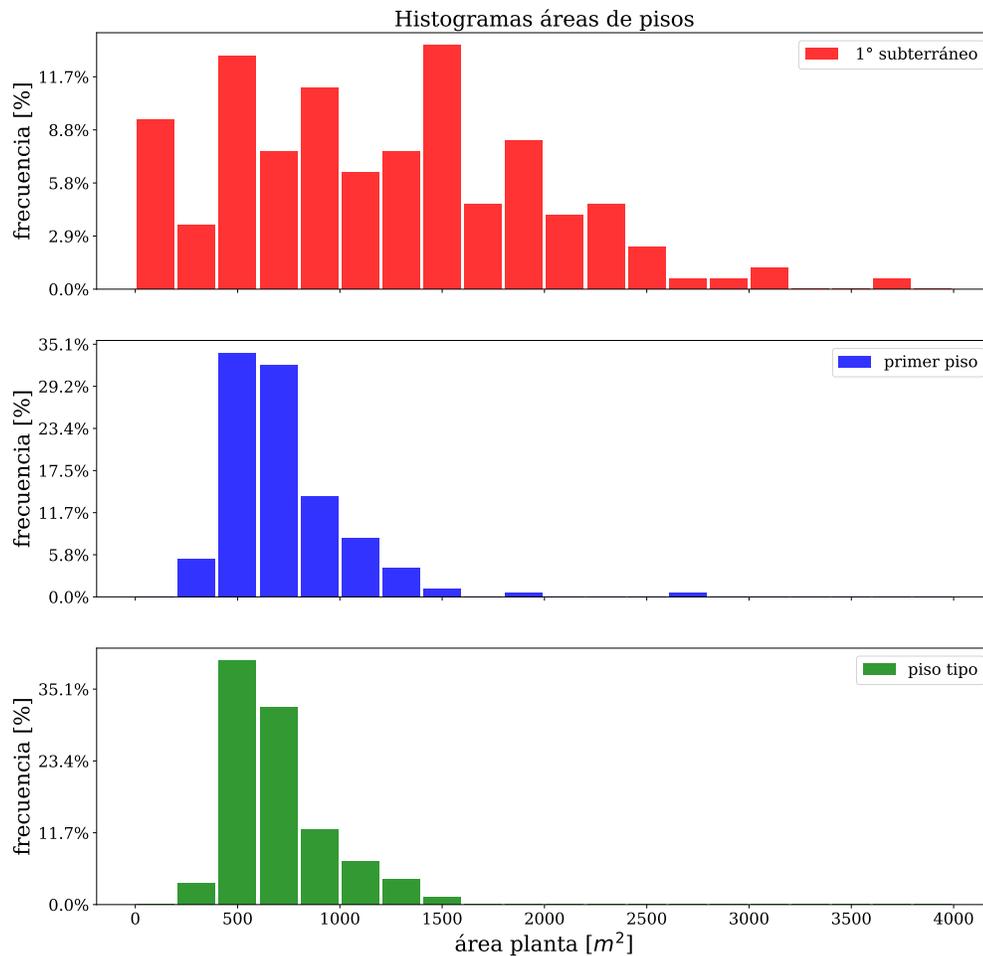


Figura 5.4: Distribución del área en planta por nivel

En la figura 5.4 se expone la distribución del área en planta para los tres niveles estudiados: primer subterráneo, primer piso y piso tipo. Tal y como se mencionó en el capítulo anterior, el área promedio de los pisos tipo y primero son de 700 m^2 y 728 m^2 respectivamente. Por su parte, el subterráneo tiene un área promedio de 1238 m^2 y tal como se observa en el histograma, los datos muestran una mayor dispersión en comparación a los otros pisos. De esta manera, se van a considerar todas las áreas en un comienzo para la estimación del período, reconociendo la relación que existe entre este parámetro y la masa del edificio.

En lo que respecta la rigidez, esta se puede estimar a partir de la altura o largo del elemento y la inercia de la sección transversal. En el caso de un edificio, la inercia se determina sobre los elementos (muros) que definen el sistema estructural. Ahora bien, al calcular la inercia en planta para cada uno de los niveles, se debe diferenciar si los muros están o no acoplados. En el primer caso, la inercia en planta viene dada por la suma de las inercias de cada muro respecto al centro de masas. Para el segundo, la inercia solo corresponde a la suma de las inercias de cada muro respecto a su centroide.

En la figuras 5.5 y 5.6 se muestran las distribuciones que tiene la inercia no acoplada (o independiente) y acoplada en cada nivel, y en cada dirección de análisis. Se observa que en el subterráneo los valores son más grandes y con una mayor dispersión, similar a lo que ocurría con el área en planta. Además, en todos los pisos se presentan casos aislados con un valor para la inercia excesivamente alto. Debido a esto, se tiene que la mediana de los datos es menor que el promedio en todos los casos (tabla 5.1). Por último, al comparar por eje de rotación, las mayores inercias se presentan para la inercia en torno al eje y, es decir, para los muros orientados en la dirección longitudinal del edificio.

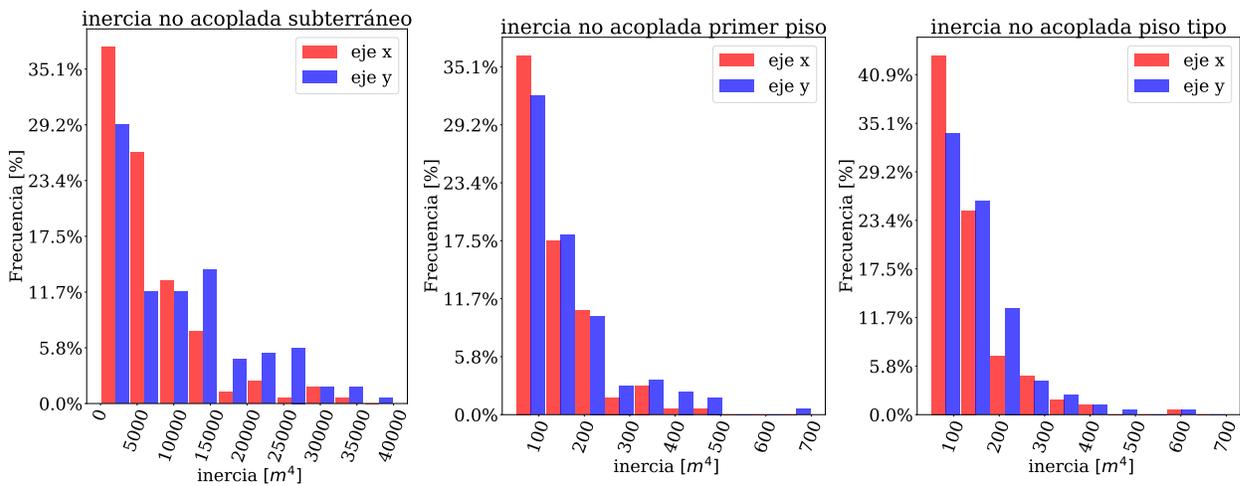


Figura 5.5: Distribución de los valores para la inercia no acoplada en cada piso

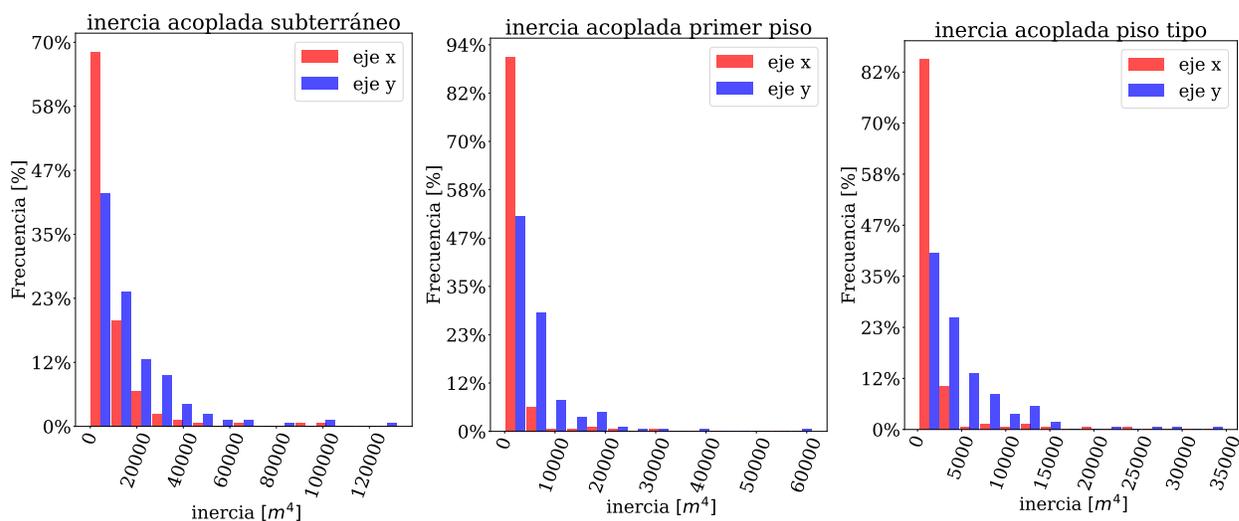


Figura 5.6: Distribución de los valores para la inercia acoplada en cada piso

Tabla 5.1: Valor promedio y mediana para las inercias calculadas en cada piso

inercias		eje x		eje y	
		media [m ⁴]	mediana [m ⁴]	media [m ⁴]	mediana [m ⁴]
no acoplada	subterráneo	7030	4700	12252	8980
	primer piso	236	86	658	103
	piso tipo	119	100	133	112
acoplada	subterráneo	9290	5830	16981	12700
	primer piso	2201	1250	6051	3950
	piso tipo	1826	971	5036	3580

La última variable correspondiente a la altura del edificio se evalúa desde la base del edificio y desde el nivel de terreno. La distinción sirve para analizar si la rigidez generada por los muros del subterráneo permite imponer una condición de empotramiento en el primer piso. Dicho esto, en la figura 5.7 se exhibe una matriz de correlación entre el área, la inercia y la altura. Para dicha matriz no se distingue la dirección de análisis, lo que arroja un total de 342 casos.

En la imagen se observa una alta correlación entre los dos casos considerados para la inercia en cada nivel. En lo que respecta al área en planta, la matriz muestra que entre el piso primero y tipo la correlación es de 0.8. Por último, de todos los atributos, el que mejor se relaciona con el período corresponde a la altura del edificio.

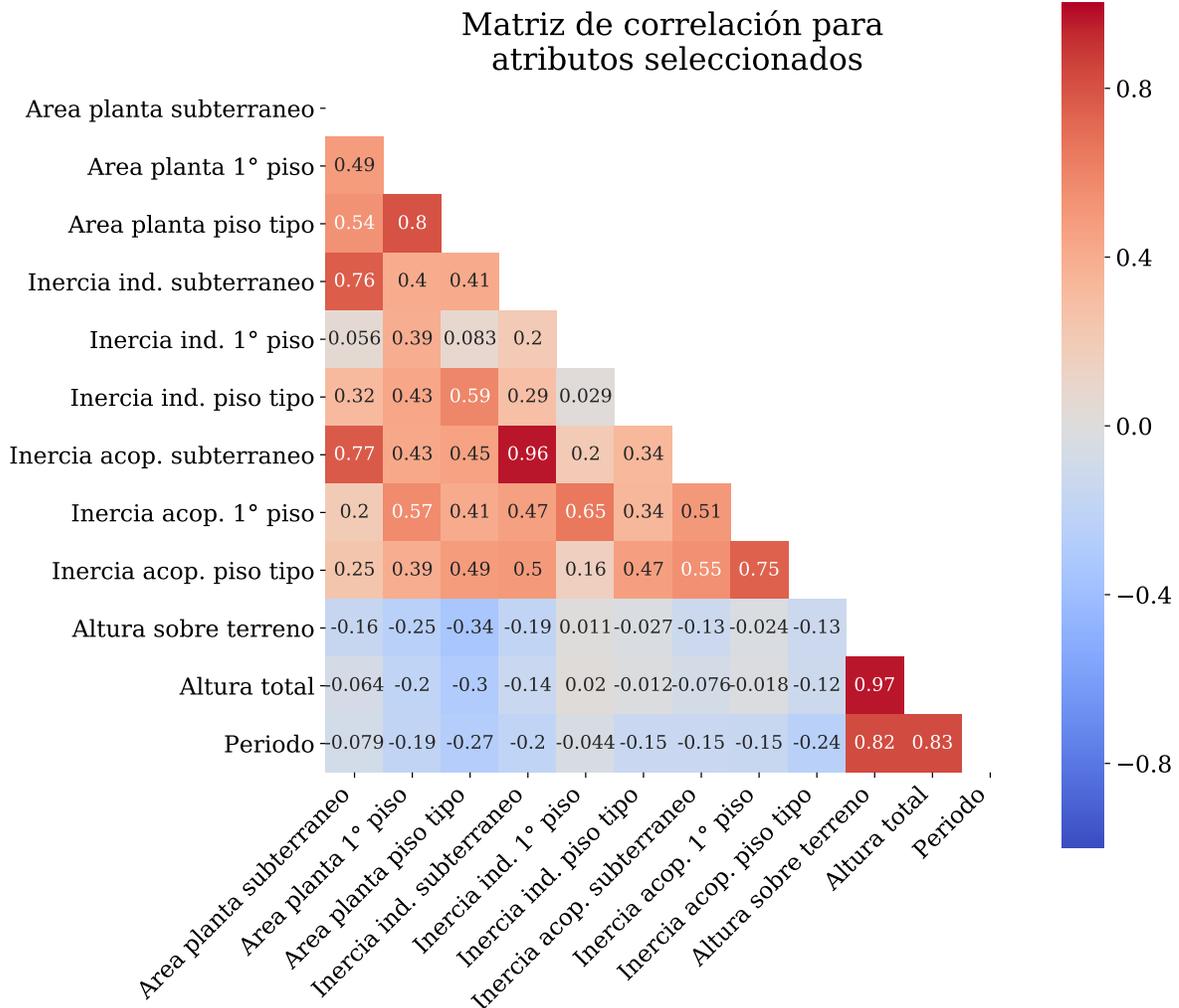


Figura 5.7: Matriz de correlación con atributos considerados para la estimación del período

5.4. Cálculo de propiedades físicas y geométricas

En base a las propiedades geométricas en planta descritas en la sección anterior, se estimará la masa e inercia equivalente para cada edificio de la muestra. Para esto se asume que las propiedades del primer subterráneo son las mismas en los niveles inferiores. Del mismo modo, se asume que las propiedades en planta del piso tipo son constantes desde el segundo hasta el último piso.

Masa

Tal y como se mencionó anteriormente, con el área en planta es posible estimar la masa total de la siguiente manera:

$$M = \sum_i A_i \cdot q \quad (5.2)$$

Donde $q = 1 \text{ ton}/m^2$. Luego considerando el número total de niveles N , número de subterráneos N_s , área de subterráneo A_s , área del primer piso A_p y del piso tipo A_t la expresión completa es:

$$M = q \cdot (A_s \cdot N_s + A_p + A_t \cdot (N - N_s - 1)) \quad (5.3)$$

En caso de omitir el aporte de los subterráneos, basta con imponer $A_s = 0$ y $N_s = 0$. La imagen que se muestra a continuación da cuenta de la distribución de la masa de ambos casos en cada proyecto.

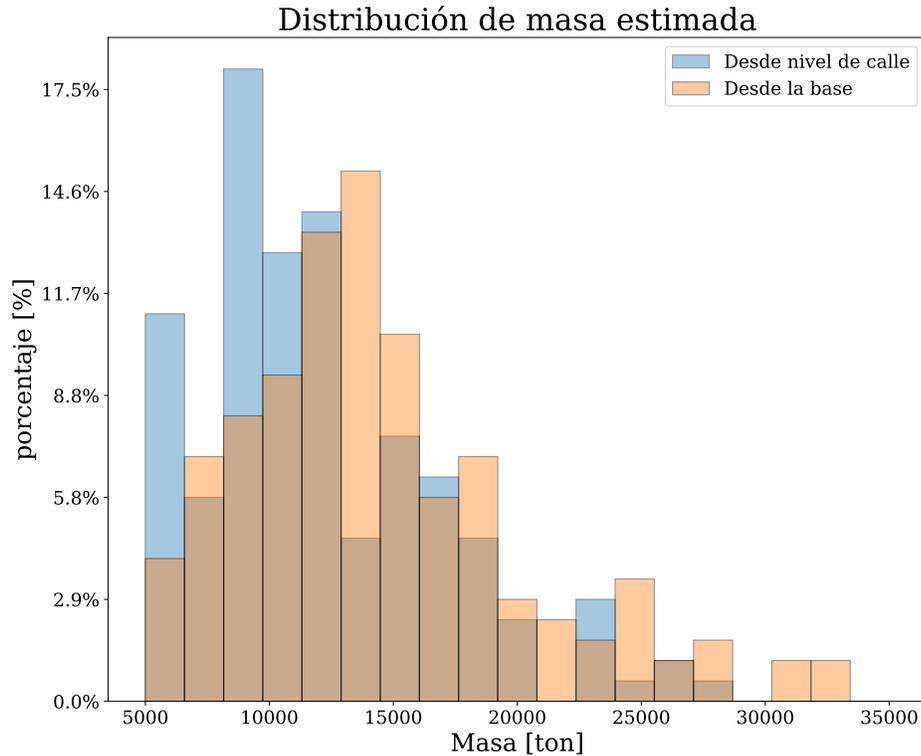


Figura 5.8: Distribución de la masa de cada proyecto con y sin subterráneos en su cálculo

Inercia

Dado que esta propiedad varía en cada uno de los niveles se calcula una inercia equivalente I_{eq} por edificio. Para esto se utiliza el modelo expuesto en la figura 5.9, el cual corresponde a un elemento empotrado de altura H , al cual se le aplica una carga puntual F en la parte superior que genera un momento $M(z)$ sobre éste. También se asume que la altura entrepiso es constante igual a H/N .

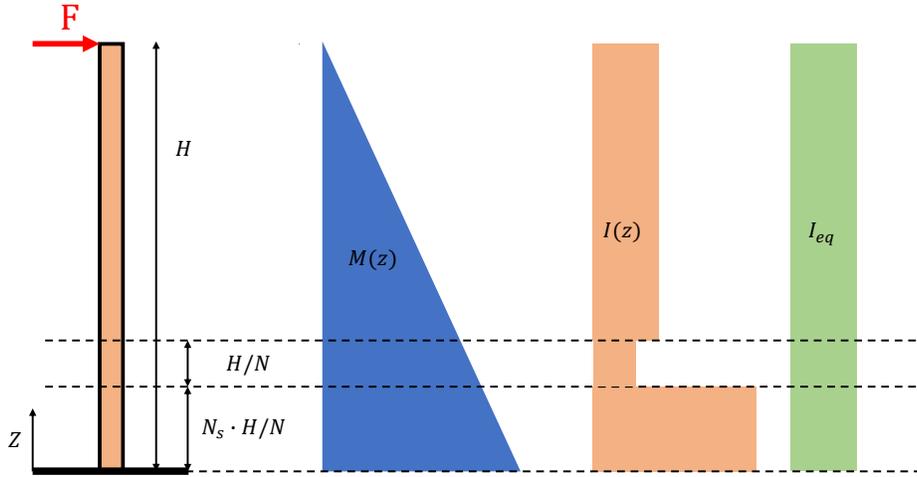


Figura 5.9: Modelo del edificio con carga puntual junto con diagramas de momento e inercia

El desplazamiento de techo para el modelo anterior, se obtiene mediante la doble integración del cociente entre el momento y la inercia:

$$\delta_u = \int_0^H \int_0^H \frac{M(z)}{EI(z)} dz dz \quad (5.4)$$

Donde E corresponde al módulo del Young. Así, al asumir una inercia I_{eq} para todos los pisos y el diagrama de momento de la figura 5.9, el desplazamiento de techo es igual a:

$$\delta_u = \frac{FH^3}{3EI_{eq}} \quad (5.5)$$

De esta forma, al desarrollar (6.4) considerando el modelo de la figura 5.9, e igualar el resultado con la expresión 5.5, se obtiene una relación entre la inercia equivalente I_{eq} , y las inercias I_s, I_p y I_t del subterráneo, piso 1º y piso tipo.

$$\begin{aligned} \frac{1}{3I_{eq}} &= \frac{1}{I_s} \left(\frac{N_s}{N} + \frac{N_s^2 - N_s(1 + N_s)}{N^2} + \frac{3N_s^2(1 + N_s) - 3N_s^2 - N_s^3}{6N^3} \right) \\ &+ \frac{1}{I_p} \left(\frac{1}{N} - \frac{2N_s + 1}{N^2} + \frac{3N_s^2 + 3N_s^3 - 3N_s^2(N_s + 1) + 2(N_s + 1)^3}{6N^3} \right) \\ &+ \frac{1}{I_t} \left(\frac{1}{3} - \frac{N_s + 1}{N} + \frac{(N_s + 1)^2}{N^2} - \frac{(N_s + 1)^3}{3N^3} \right) \end{aligned} \quad (5.6)$$

De este modo, se determina I_{eq} considerando la inercia tanto acoplada como independiente. A su vez, en cada uno de los casos se determina con y sin subterráneos. En este último, al imponer $N_s = 0$ en la ecuación 5.6 se obtiene lo siguiente:

$$\frac{1}{3I_{eq}} = \frac{1}{I_p} \left(\frac{1}{N} - \frac{1}{N^2} + \frac{1}{3N^3} \right) + \frac{1}{I_t} \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{N} + \frac{1}{N^2} - \frac{1}{3N^3} \right) \quad (5.7)$$

Por lo tanto la inercia se determina en base a la variación de dos parámetros que corresponden al grado de acoplamiento de muros y nivel de empotramiento del edificio. Combinando diferentes casos se llega a un total de 4 por eje.

5.5. Modelo de Regresión Lineal

En primer lugar, dado el bajo tamaño de los datos en el análisis, los modelos simples de regresión son más robustos. Además un modelo más sencillo presente menos varianza, por lo tanto, depende en menor medida de casos particulares de la muestra, incluyendo ruido y valores atípicos (Alpaydin, 2014). De esta manera se decide utilizar la regresión lineal como método de estimación del período.

Tal y como se mencionó en la sección anterior, al no tener claro el grado de acoplamiento que presentan los muros y el nivel de empotramiento del edificio, se presentan 4 casos de estudio:

1. Muros no acoplados y empotramiento a nivel de terreno: Se utiliza inercia no acoplada y sin subterráneos y se omite área de subterráneos en el cálculo de masa.
2. Muros no acoplados y empotramiento en la base: Se utiliza inercia no acoplada y con subterráneos y se consideran todos los niveles para el cálculo de masa.
3. Muros acoplados y empotramiento a nivel de terreno: Se utiliza inercia acoplada y sin subterráneos y se consideran todos los niveles para el cálculo de masa.
4. Muros acoplados y empotramiento en la base: Se utiliza inercia acoplada y con subterráneos y se consideran todos los niveles para el cálculo de masa.

Todos estos se deben estudiar para: dirección transversal, dirección longitudinal y la unión de ambas que corresponde al análisis general del problema. En efecto, considerando propiedades geométricas se podría obtener una expresión que no dependa de la orientación del edificio.

Detección de valores atípicos

La inercia equivalente y masa del edificio son atributos que se obtuvieron en base a hipótesis de diseño y modelos simplificados. Además, área e inercia por planta se calcularon durante el procesamiento de planos. Todo esto puede generar datos cuyos valores son atípicos en relación al fenómeno estudiado. Por lo tanto, es necesario detectar y eliminar dichos casos en la base de datos.

Dicho proceso se realiza a partir del primer y tercer cuartil (q_1 y q_3), para cada atributo

(Tukey, 1997). De esta forma, se define el rango intercuartil RIC como $(q_3 - q_1)$. Luego un dato x_i se considera como atípico si cumple una de las dos condiciones que se muestran a continuación:

- $x_i < q_1 - 1,5 \cdot RIC$
- $x_i > q_3 + 1,5 \cdot RIC$

A modo de ejemplo, la figura 5.10 muestra la relación de los valores filtrados para la masa e inercia equivalente, para el caso sin subterráneos y muros no acoplados (en ambas direcciones). En general se eliminan valores excesivamente grande para cada uno de los atributos mencionados. Cabe destacar que para la altura no se encontraron valores atípicos.

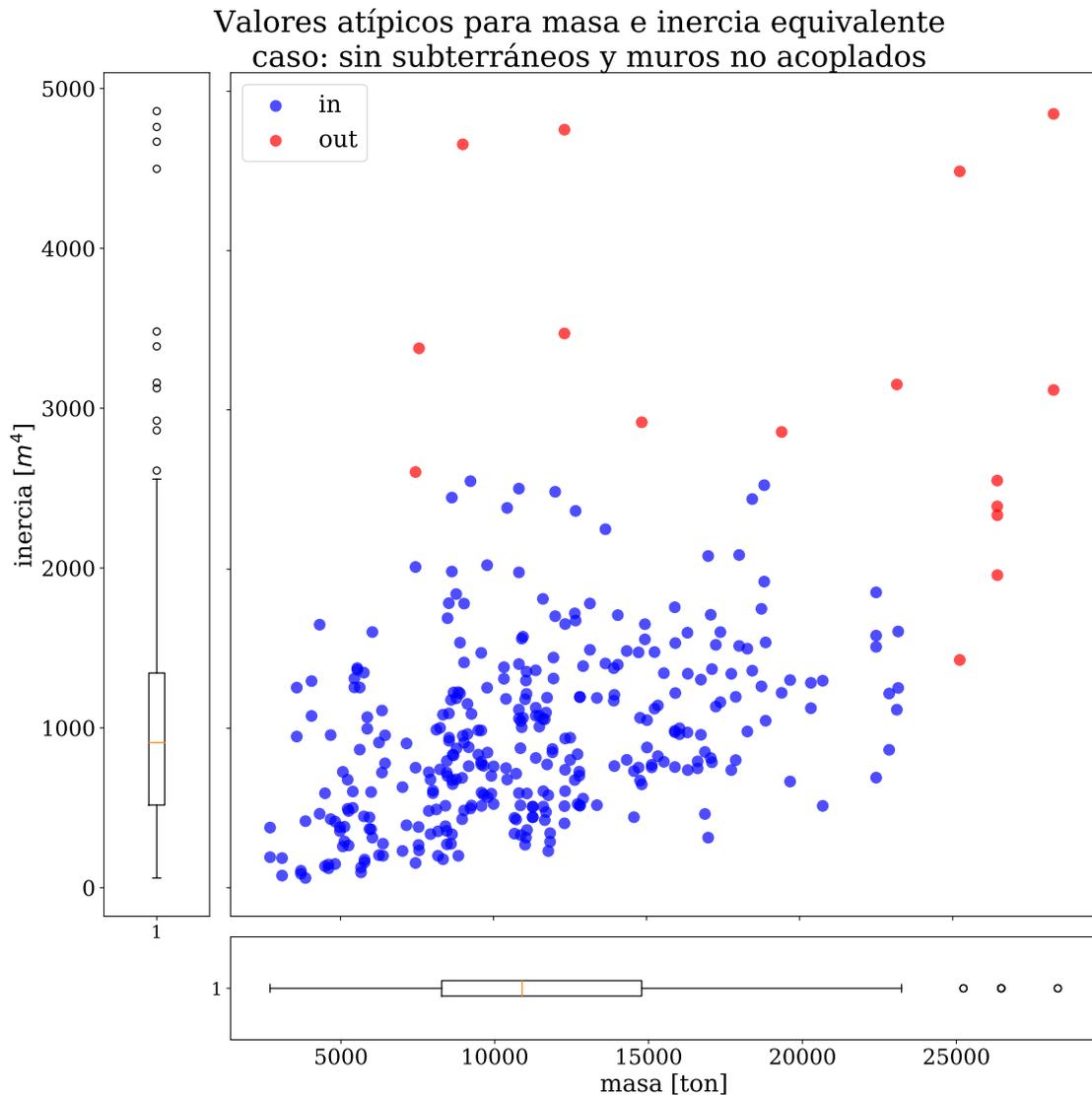


Figura 5.10: Valores atípicos para la inercia equivalente y masa total en conjunto

En la tabla 5.2 están los porcentajes de datos que se conservan luego de eliminar valores atípicos en cada caso a estudiar:

Tabla 5.2: Porcentaje de datos que se conservan luego de eliminar valores atípicos

casos		dirección longitudinal	dirección transversal	ambas direcciones
muros no acoplados	con subterráneos	91.2 %	88.1 %	91.2 %
	sin subterráneos	94.7 %	94.2 %	95.3 %
muros acoplados	con subterráneos	89.5 %	89.0 %	89.5 %
	sin subterráneos	92.4 %	91.2 %	90.6 %

Métrica para evaluación de modelos

Para medir el desempeño de los modelos se sigue utilizando el coeficiente de determinación R^2 . Sin embargo, éste es calculado mediante validación cruzada con k -iteraciones cuyo algoritmo se expone a continuación:

Algoritmo 2 Método de validación cruzada de k -iteraciones (Reich, 1996)

1. Dividir los datos en k subconjuntos.
 2. Realizar k iteraciones tal que para la iteración j :
 - (a) Aprender un modelo de los $(k-1)$ subconjuntos (todos excepto el subconjunto j)
 - (b) Evaluar el desempeño con el subconjunto j y registrar la precisión obtenida.
 3. Calcular el promedio de las precisiones obtenidas para los k subconjuntos
-

La ventaja de utilizar esta metodología es que la evaluación es independiente de los conjuntos de entrenamiento y prueba escogidos (Alpaydin, 2014). Así, calculando R^2 con validación cruzada a la regresión lineal hecha anteriormente utilizando el número de pisos, los valores disminuyen a 0.64 y 0.72 para la dirección longitudinal y transversal, respectivamente.

Resultados

Los cuatro casos mencionados al comienzo de la sección son analizados para la dirección longitudinal, dirección transversal y agrupando ambas direcciones. Con esto se llega a un total de 12 casos que sirven para conocer la influencia de cada atributo y la importancia de estos al momento de estimar el período.

Por otra parte, dado que no se conoce con precisión la relación existente entre las diferentes variables, no es correcto suponer la función que define al problema. Por lo tanto es necesario probar varias sobre cada uno de los casos a estudiar. Ahora bien, las funciones propuestas se definen a partir de la relación física que masa y rigidez tienen con el período.

De esta manera se calibran los coeficientes α , β , γ y k para las siguientes expresiones:

1. $T(H, I, M) = \alpha M + \beta I + \gamma H + k$
2. $T(H, I, M) = kH^\alpha I^\beta M^\gamma$
3. $T(H, I, M) = k \left(\frac{M}{I}\right)^\alpha H^\beta$
4. $T(H, I, M) = \alpha H + \beta \left(\frac{M}{I}\right) + k$
5. $T(H) = \alpha H^\beta$

Para poder realizar la regresión sobre las expresiones 2, 3 y 5 se aplica la función logaritmo para obtener una relación lineal entre las variables y el logaritmo del período.

De esta manera, se utiliza la biblioteca *Scikit-learn* en Python para aplicar la regresión lineal y obtener los coeficientes sobre cada función utilizando un 70% de los datos para entrenamiento y el 30%, para testeo. Los resultados para cada caso se exponen en forma extendida en el Anexo B.

De todas las funciones, la que presenta mejores resultados corresponde a la número 2. Los valores para los coeficientes que acompañan a cada variable se muestran a continuación:

Tabla 5.3: Resultados para expresión $T = kH^\alpha I^\beta M^\gamma$

casos		coeficientes				R^2
		α	β	γ	k	
dirección longitudinal	muros no acoplados y sin subterráneos	0.778	-0.2	0.382	0.0036	0.70
	muros no acoplados y con subterráneos	0.901	-0.194	0.334	0.0029	0.69
	muros acoplados y sin subterráneos	0.802	-0.1	0.266	0.0070	0.66
	muros acoplados y con subterráneos	1.015	-0.09	0.168	0.0058	0.64
dirección transversal	muros no acoplados y sin subterráneos	0.877	-0.262	0.44	0.0026	0.78
	muros no acoplados y con subterráneos	0.991	-0.245	0.396	0.0019	0.74
	muros acoplados y sin subterráneos	0.89	-0.177	0.317	0.0067	0.74
	muros acoplados y con subterráneos	1.025	-0.244	0.361	0.0040	0.77
ambas direcciones	muros no acoplados y sin subterráneos	0.828	-0.234	0.417	0.0029	0.75
	muros no acoplados y con subterráneos	0.946	-0.233	0.38	0.0022	0.74
	muros acoplados y sin subterráneos	0.839	0.15	0.296	0.0077	0.74
	muros acoplados y con subterráneos	0.992	0.163	0.279	0.0048	0.74

De la tabla 5.3 se tiene que en todas las direcciones, el mejor valor de R^2 se alcanzan en el caso de muros no acoplados y sin subterráneos. De esto se infiere que la inercia y masa de los subterráneos es tal que impone una condición de empotramiento a nivel de terreno. Así, la forma modal que define el período fundamental en cada dirección depende de la estructuración de los pisos superiores.

En relación al acoplamiento de muros, analizando los coeficientes de la inercia estos son menores para el caso acoplado. Esto indica que en dichos casos la inercia tiene mayor influencia para analizar el período, por ende, no es representativa de la rigidez real en planta.

Al analizar por dirección, se obtienen mejores resultados en la dirección transversal que en la dirección longitudinal (figura 5.11). Esto hace que al analizar el caso generalizado, el coeficiente de determinación más alto sea igual a 0.75.

En general, el valor obtenido para cada coeficiente está acorde a la relación física que cada propiedad, ya sea física o geométrica, tiene sobre el período de vibración. Además es la altura del edificio el atributo que mayor importancia muestra en todos los casos.

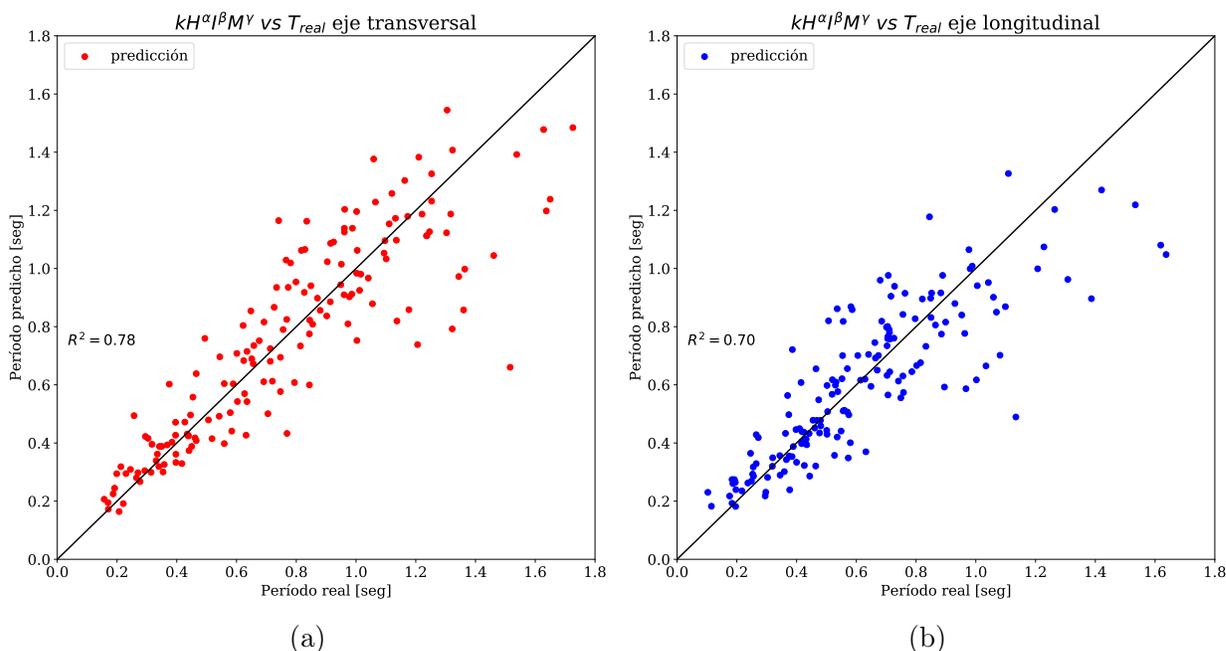


Figura 5.11: Ajuste de la expresión $T = \alpha N$ en cada dirección

Al comparar los valores de R^2 de los modelos con la expresión $T = N/20$ se tiene que estos son mayores pese a que el coeficiente de determinación se obtuvo con validación cruzada. En efecto, al calcular R^2 sobre toda la muestra el valor aumenta a 0.78, 0.86 y 0.8 para la dirección longitudinal, dirección transversal y ambas direcciones, respectivamente.

Para estudiar la importancia de cada atributo en la expresión $T = kH^\alpha I^\beta I^\gamma$ para la estimación del período, en las figuras 5.12 a 5.14 se expone la variación de R^2 entre cada par de variables:

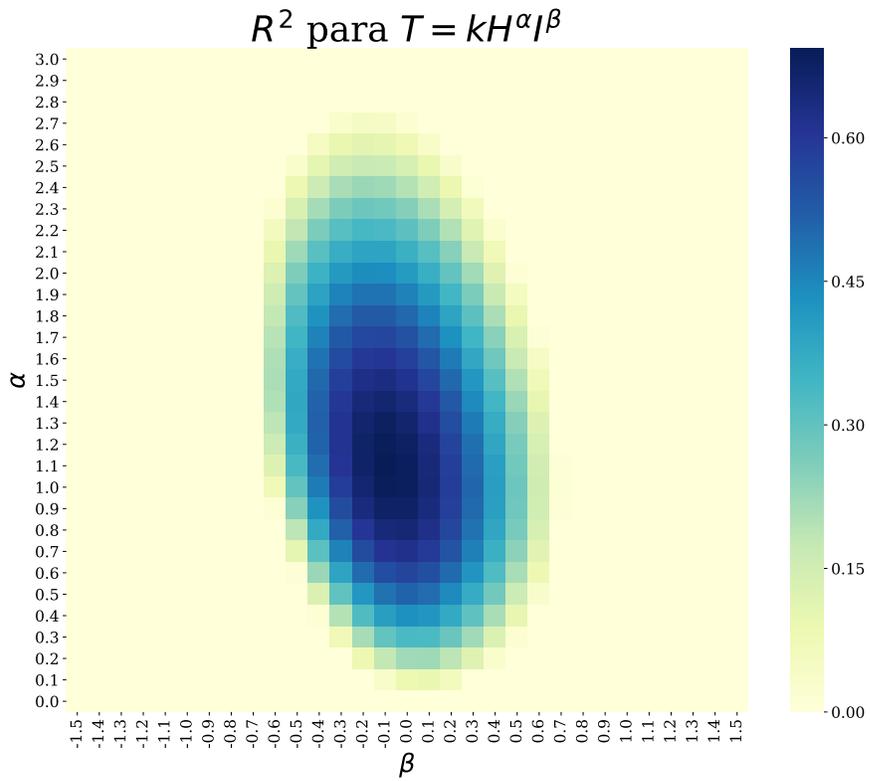


Figura 5.12: Variación de R^2 considerando altura e inercia

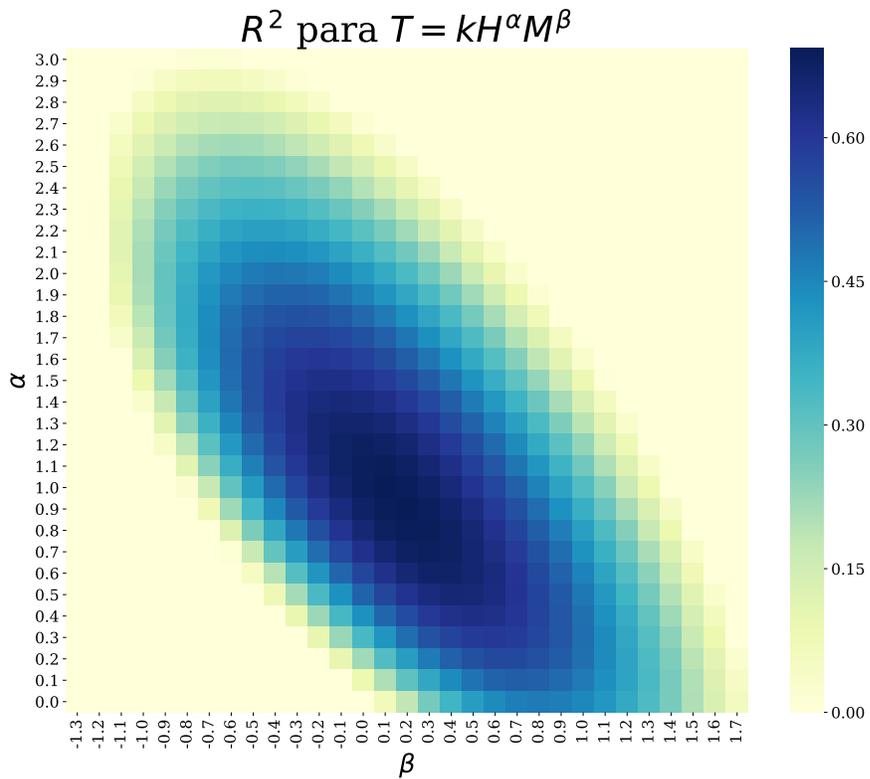


Figura 5.13: Variación de R^2 considerando altura y masa

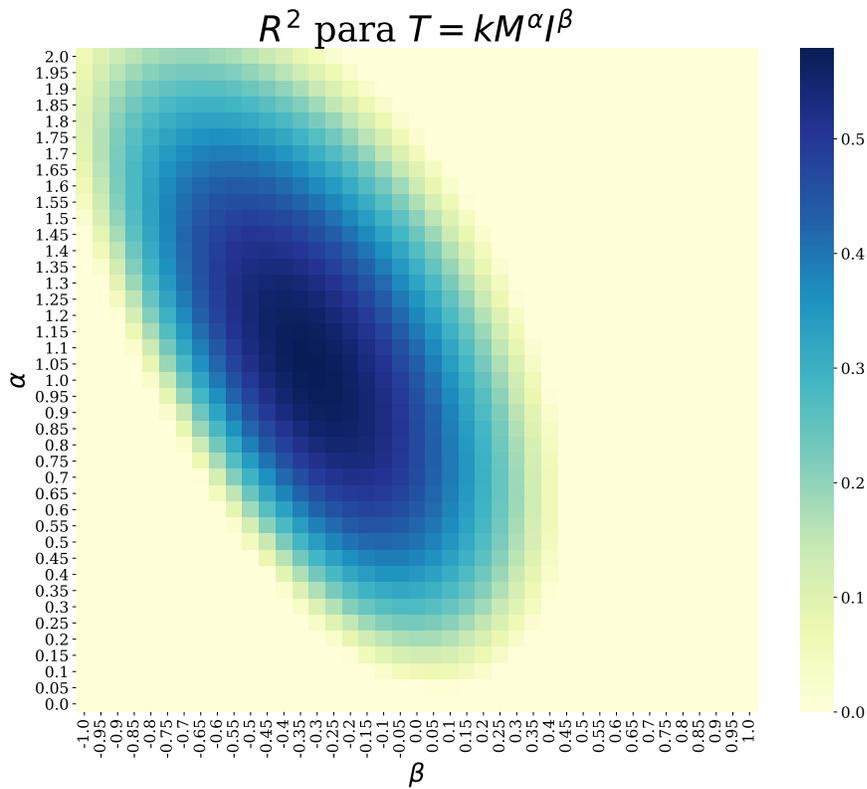


Figura 5.14: Variación de R^2 considerando masa e inercia

De los gráficos se tiene que el coeficiente asociado a la altura entrega buenos resultados con valores cercanos a 1; para la inercia los coeficientes suelen ser negativos muy cercanos a 0; y para la masa en su mayoría positivos entre 0 y 0.5. Además se observa que entre par de variables se definen curvas elípticas con igual R^2 . Esto quiere decir que para un R^2 fijo existe más de una combinación para los coeficientes que definen la función $T(H, I, M)$.

En definitiva, se concluye que las expresiones desarrolladas con aprendizaje automático establecen una relación físicamente correcta entre las variables de masa, inercia y altura. Ahora bien, durante la metodología se consideraron una serie de supuestos y simplificaciones que afectaron en la precisión y la magnitud de los coeficientes. Pese a ello, se logra obtener una expresión para el período que solo considera la disposición geométrica de los elementos en planta y cuya precisión es mejor a $T = N/20$, la cual es sólo válida en el eje flexible de la estructura.

Capítulo 6

CONCLUSIÓN Y COMENTARIOS FINALES

En base a los indicadores sísmicos y la información recopilada entre los años 1953 y 2006 para edificios de hormigón armado, diferentes autores han concluido que el buen desempeño de las estructuras chilenas frente a sismos se debe en gran medida a la densidad de muros en planta. De esta manera se tienen estructuras con una rigidez lateral importante, que reduce los desplazamientos entrepiso y por ende el daño de los elementos estructurales. No obstante, ha transcurrido más de una década del último estudio de caracterización. Es por ello que se genera una base de datos con proyectos entre los años 2003 y 2018 para edificios habitacionales con muros de hormigón armado.

En una primera instancia, de la descripción general se obtuvo que un 77 % de los edificios están en la Región Metropolitana. Lo anterior es un reflejo del proceso de construcción en altura, el cual no se da igual en todo Chile sino que se concentra en la zona central del país (Sepúlveda, 2018). Ahora bien, considerando el hecho de que todos los proyectos fueron realizados por solo una oficina de cálculo, los resultados no necesariamente reflejan las prácticas de diseño estructural en Chile.

Respecto a los principales resultados obtenidos en torno a las características estructurales, para el indicador de rigidez H/T , el 95.9 % de los edificios son de rigidez normal o rígidos según la clasificación del Perfil Bio-sísmico. Además la tendencia en el tiempo es decreciente aunque los valores siguen manteniéndose dentro del rango aceptable. Para la densidad de muros, un 70 % presenta valores entre 2 y 4 % con un promedio de 2.73 %, cuya tendencia en el tiempo es prácticamente constante. Además se observa que la clasificación del tipo de suelo y zona sísmica influyen en este indicador, siendo esta última variable la que genera más impacto.

Por otro lado, del análisis en la estructuración entre el diseño de arquitectura y la última revisión de ingeniería, se obtiene que los mayores cambios se encuentran en los espesores de los muros. En arquitectura, el espesor es constante en altura con un promedio de 21 cm, mientras que en ingeniería el espesor es mayor en los pisos inferiores y disminuye hacia los pisos superiores. En efecto, el valor promedio en subterráneos y primer piso es de 24 cm,

aunque en los subterráneos hay un mayor porcentaje de proyectos cuyo promedio de espesores está sobre 25 cm.

En cuanto a la disposición de los muros en planta, en general se conserva el diseño inicial tanto en ubicación como número de elementos. Sin embargo el nivel subterráneo es el que presenta mayores cambios. Esto se debe a la incorporación de elementos estructurales en estacionamientos, los cuales aumentan el área total de muros en planta para este nivel.

Además, considerando una tolerancia de 5 cm en la ubicación de los muros, solo un 38 % de los casos conserva más del 75 % del área de muros en los subterráneos. Para una tolerancia de 50 cm, el porcentaje de casos aumenta a 64 %. Ahora bien, se observa que esto se debe a modificaciones en las dimensiones de los ejes en planta y no a cambios respecto al diseño propuesto al inicio del proyecto. El piso tipo por su parte, es el nivel que menos cambios sufre, dado que conservan los espesores de muro entre ambas especialidades y un 80 % de los proyectos conserva más de un 75 % la ubicación de los muros propuestos por arquitectura, para una tolerancia de 50 cm.

En última instancia, en la estimación del período se obtiene una expresión generalizada en función de propiedades geométricas, con un coeficiente de determinación $R^2=0.75$. Por otro lado, la expresión simplificada $T = N/20$ solo es válida para la dirección transversal y con un R^2 igual a 0.70 (sobre el total de la muestra). De esta forma, se obtiene que la expresión resultante con aprendizaje automático es mejor en comparación a la simplificada, debido a que es independiente a la dirección de análisis y con una precisión mayor pese a los supuestos y simplificaciones que se consideraron.

Más aún, al generar modelos para cada dirección, el coeficiente R^2 para la estimación en la dirección transversal aumenta a 0.78. Por lo tanto, con aprendizaje automático se mejora significativamente la precisión en la dirección transversal si se compara a la fórmula simplificada $T = N/20$. La tabla que se expone a continuación resume los coeficientes obtenidos para la expresión $T = KM^\alpha I^\beta H^\gamma$, al considerar la dirección de análisis y el caso general:

Tabla 6.1: Resumen de funciones obtenidas para cada caso

dirección longitudinal	dirección transversal	generalización (ambas direcciones)
$T=0.0036 \frac{H^{0,778}M^{0,382}}{I^{0,2}}$	$T=0.0026 \frac{H^{0,877}M^{0,44}}{I^{0,262}}$	$T=0.0029 \frac{H^{0,828}M^{0,417}}{I^{0,234}}$

De la tabla 6.1, se observa que el parámetro más relevante es la altura del edificio. Esto es precisamente lo que establece la expresión simplificada. Lo anterior se debe a que los parámetros estructurales como la rigidez y densidad de muros, se mantienen constantes en la mayoría de los edificios con muros de hormigón armado. Al considerar la masa e inercia de los proyectos, se incorporan dichos parámetros obteniendo una expresión más precisa.

Con todo lo anterior, se concluye que las propiedades estructurales asociadas al “Edificio Chileno” se han mantenido constantes en la última década para los edificios de la muestra estudiada. Esto se puede interpretar como una consecuencia de la experiencia adquirida a través del tiempo, la cual define una metodología de diseño que asegura un correcto desempeño del edificio frente a cargas sísmicas importantes. Además, el hecho de tener indicadores sísmicos con rangos bien definidos implica una estructuración igual de estable, con pocas modificaciones en proyectos con muros de hormigón armado.

Para terminar, como trabajo futuro se propone extender la base de datos, agregando proyectos de otras oficinas de cálculo, con el fin de obtener una muestra representativa de los edificios chilenos. Además, con una mayor muestra aumentan los casos de edificios en diferentes regiones del país. De esta manera, se estudiarían cambios de indicadores estructurales en diferentes regiones, en donde la sismicidad y el tipo de suelo presentan un comportamiento distinto al de la zona central del país.

Bibliografía

- Alpaydin, E. (2014). *Introduction to Machine Learning*. The MIT Press, Londres, Inglaterra, 3 edición.
- Autodesk (2011). Multiple Polyline Export Challenge. <https://forums.autodesk.com/t5/visual-lisp-autolisp-and-general/multiple-polyline-export-challenge/td-p/3270377>. Revisado: 10-09-2019.
- Calderón, J. (2007). *Actualización de tipologías estructurales usadas en edificios de hormigón armado en Chile*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago.
- Gourley, K. y Green, D. (1983). A polygon-to-rectangle conversion algorithm. *IEEE COMPUT GRAPH*.
- Guendelman, T. (2014). Más allá de la norma. Seminario HILTI.
- Guendelman, T., Guendelman, M., y Lindenberg, J. (1997). Perfil Bio-Sísmico de Edificios. *Proc. séptimas jornadas chilenas de sismología e ingeniería antisísmica*.
- Guendelman, T., Guendelman, M., Medina, T., y Figueroa, L. (2017). Perfil Bio-Sísmico de Edificios 3.0. *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile*, Vol. 129(No. 3).
- Guzmán, M. (1998). *Caracterización de Tipologías Estructurales usadas en el diseño de edificios altos en Chile*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago.
- Gómez, C. (2001). *Caracterización de Sistemas Estructurales usados en las viviendas de hormigón armado y albañilería reforzada en Chile*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago.
- Hench, R. (2007). *Clasificación sísmica de edificios altos*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago.
- INN (2011). *NC433.Of96 Diseño sísmico de edificios, con modificaciones de 2009 y Decreto Supremo DS61 de 2011*. Norma Chilena Oficial, Santiago, Chile.
- Lagos, R., Kupfer, M., Lindenberg, J., Bonelli, P., Saragoni, R., Guendelman, T., Massone, L., Boroschek, R., y Yañez, F. (2012). Seismic Performance of High-rise Concrete Buildings in Chile. *International Journal of High-Rise Buildings*, Vol. 1(No. 3):181–194.

- Lagos, R., Kupfer, M., Lindenberg, J., , Bonelli, P., Saragoni, R., Guendelman, T., Massone, L., Boroschek, R., y Yañez, F. (2017). Seismic Performance of Concrete Buildings in Chile. In *16th World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago Chile.
- Lagos, R., Lafontaine, M., Bonelli, P., Boroschek, R., Guendelman, T., Massone, L., Saragoni, R., Rojas, F., y Yañez, F. (2019). The quest for resilience - The Chilean practice of seismic design for reinforced concrete buildings. inédito.
- Lee Mac Programming (2016). Outline objects. <http://www.lee-mac.com/outlineobjects.html>. Revisado: 09-09-2019.
- Lu, P., Chen, S., y Zheng, Y. (2012). Artificial Intelligence in Civil Engineering. *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2012.
- López, B. (s.f.). Introducción a la Inteligencia Artificial. Instituto Tecnológico de Nuevo Laredo.
- Reich, Y. (1996). Machine Learning Techniques for Civil Engineering Problems. *Microcomputers in Civil Engineering*.
- Salehi, H. y Burgueño, R. (2018). Emerging artificial intelligence methods in structural engineering. *Engineering Structures*, Vol. 171:170–189.
- Sepúlveda, P. (2018). En Chile ya hay más de un millón de departamentos y son el 17% de los hogares. <https://www.latercera.com/tendencias/noticia/chile-ya-mas-millon-departamentos-17-los-hogares/181244/>. Revisado: 09-01-2020.
- Steger, C. (1996). On the Calculation of Moments of Polygons. Reporte técnico, Technische Universität München.
- Tobar, F. (2019). *Aprendizaje en máquinas*. Centro de Modelamiento Matemático, Santiago.
- Tukey, J. (1997). *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley.
- Wood, S. L. (1991). Performance of Reinforced Concrete Buildings During the 1985 Chile Earthquake: Implications for the Design of Structural Walls. *Earthquake Spectra, EERI*, Vol. 7(No. 4):607–638.

Anexo A

Extracción de coordenadas AutoCAD

El código que se muestra a continuación corresponde a una modificación hecha a una rutina para AutoCAD extraída de los foros de Autodesk (2011). Esta se encuentra en lenguaje *Lisp* y los principales cambios realizados consisten en definir la separación entre polígonos, establecer cantidad de decimales y considerar solo con coordenadas X e Y, dado que la componente Z de los puntos no es relevante para el estudio.

```
1
2 (defun c:epl (/ *error* AT:GetVertices _rtos _trans old_ucsorg
3             old_ucsxdir old_ucsydir fn ss of i e data
4             )
5 (vl-load-com)
6 (defun *error* (msg)
7   (if (and msg
8       (null (member msg '("Función cancelada" "salir / abortar"))))
9     )
10    (princ (strcat "\nError: " msg)))
11    (command "_ucs" "3p" (trans old_ucsorg 0 1)
12    (trans old_ucsxdir 0 1) (trans old_ucsydir 0 1)
13    )
14    (setvar "osmode" osmode)
15    (princ)
16  )
17 (defun AT:GetVertices (e / p l)
18   ;; Devuelve los puntos de cada vértice asociado a la curva 'e' seleccionada
19   (if e
20     (if (eq (setq p (vlax-curve-getEndParam e)) (fix p))
21       (repeat (setq p (1+ (fix p)))
22         (setq l (cons (vlax-curve-getPointAtParam e (setq p (1- p))) l))
23       )
24     (list (vlax-curve-getStartPoint e) (vlax-curve-getEndPoint e))
25   )
26 )
27 )
28 (defun _rtos (v) (rtos v 2 2))
```

```

29 (defun _trans (u)(trans u 1 1))
30
31 (if (and
32     (setq fn (strcat (getvar 'Dwgprefix) (vl-filename-base (getvar 'Dwgname))
33                   ".txt"))
34     (setq ss (ssget '((0 . "*POLYLINE")))))
35     (progn
36       (if (not suff)
37           (setq suff 300))
38       (setq suff (cond
39                 ((getint
40                  (strcat "\nEnter Distance <" (itoa suff)
41                          ">: "))
42                  (suff)))
43       (repeat (setq i (sslength ss))
44               (setq e (ssname ss (setq i (1- i))))
45               (setq data (cons
46                           (list "1234.1234"
47                                 (strcat "\t" (Itoa (length (setq p (mapcar '_trans
48                                                                 (AT:GetVertices e)))))) "\t")
49                           ""
50                           (append
51                             (mapcar '(lambda (k)
52                                       (strcat "\n"
53                                               (_rtos (car k)) "\t"
54                                               (_rtos (cadr k)) " ")
55                                       )) p) (list "\n"))) data)))
56       (setq of (open fn "w"))
57       (foreach
58         itm_ (vl-sort
59              data
60              '(lambda (l1 l2) (< (caddr l1) (caddr l2))))
61         (princ (car itm_) of)
62         (princ (cadr itm_) of)
63         (princ (caddr itm_) of)
64         (foreach itm (last itm_) (princ itm of))
65         )
66       (close of)
67       (princ (strcat "\n" (itoa (length data)) " Puntos extraídos "))
68       (startapp "Notepad" fn)
69     )
70     (princ "\nNo se encontraron poli líneas:")
71     )
72     (*error* nil)
73     (princ)
74   )

```

Propiedades geométricas a partir de vértices

Código en MATLAB creado a partir de lo expuesto por Steger (1996).

```
1
2 function [A,Xcm,Ycm,Ixx,Iyy,Iuu,Ivv] = geometria( x, y )
3 % FUNCION GEOMETRIA
4 % variables de entrada:
5 %     x: vector con coordenadas en eje X
6 %     y: vector con coordenadas en eje Y
7 % resultados:
8 %     A: área de la sección
9 %     Xcm: coordenada en X del centro geométrico
10 %     Ycm: coordenada en Y del centro geométrico
11 %     Ixx: inercia en torno a X
12 %     Iyy: inercia en torno a Y
13 %     Iuu: inercia en torno a X en el centro de geométrico
14 %     Ivv: inercia en torno a Y en el centro de geométrico
15
16 % ÁREA
17 xp = x( [2:end 1] );
18 yp = y( [2:end 1] );
19 a = x.*yp - xp.*y;
20 A = sum( a ) /2;
21
22 % CENTRO GEOMÉTRICO
23 Xcm = sum( (x+xp).*a ) /6/A;
24 Ycm = sum( (y+yp).*a ) /6/A;
25
26 %INERCIAS EN X e Y
27 Ixx = sum( (y.*y +y.*yp + yp.*yp).*a ) /12;
28 Iyy = sum( (x.*x +x.*xp + xp.*xp).*a ) /12;
29
30 %SE CORRIGE SIGNO EN CASO DE QUE LOS VERTICES NO ESTÉN EN SENTIDO
31 %ANTIHORARIO
32 if A < 0,
33     A = -A;
34     Ixx = -Ixx;
35     Iyy = -Iyy;
36 end
37
38 %INERCIAS CON RESPECTO AL CENTRO GEOMÉTRICO DE LA SECCIÓN
39 %A PARTIR DEL TEOREMA DE STEINER
40 Iuu = Ixx - A*yc*yc;
41 Ivv = Iyy - A*xc*xc;
42
43 end
```

Anexo B

A continuación se exponen los coeficientes obtenidos con la regresión para cada una de las expresiones propuestas para obtener el período. Además se indica el coeficiente de determinación R^2 asociado en cada caso estudiado por función.

Tabla 6.2: Función: $T = kH^\alpha I^\beta M^\gamma$

casos		coeficientes				R^2
		α	β	γ	k	
dirección longitudinal	muros no acoplados y sin subterráneos	0.778	-0.2	0.382	0.0036	0.70
	muros no acoplados y con subterráneos	0.901	-0.194	0.334	0.0029	0.69
	muros acoplados y sin subterráneos	0.802	-0.1	0.266	0.0070	0.66
	muros acoplados y con subterráneos	1.015	-0.09	0.168	0.0058	0.64
dirección transversal	muros no acoplados y sin subterráneos	0.877	-0.262	0.44	0.0026	0.78
	muros no acoplados y con subterráneos	0.991	-0.245	0.396	0.0019	0.74
	muros acoplados y sin subterráneos	0.89	-0.177	0.317	0.0067	0.74
	muros acoplados y con subterráneos	1.025	-0.244	0.361	0.0040	0.77
ambas direcciones	muros no acoplados y sin subterráneos	0.828	-0.234	0.417	0.0029	0.75
	muros no acoplados y con subterráneos	0.946	-0.233	0.38	0.0022	0.74
	muros acoplados y sin subterráneos	0.839	0.15	0.296	0.0077	0.74
	muros acoplados y con subterráneos	0.992	0.163	0.279	0.0048	0.74

Tabla 6.3: Función: $T = k + \alpha H + \beta I + \gamma M$

casos		coeficientes				R^2
		α	β	γ	k	
dirección longitudinal	muros no acoplados y sin subterráneos	0.012	-1.24E-04	1.71E-05	0.0599	0.614
	muros no acoplados y con subterráneos	0.011	-9.44E-05	1.20E-05	0.0379	0.623
	muros acoplados y sin subterráneos	0.012	-1.34E-06	1.29E-05	0.033	0.581
	muros acoplados y con subterráneos	0.012	-1.10E-06	7.41E-06	-0.0243	0.547
dirección transversal	muros no acoplados y sin subterráneos	0.016	-1.53E-04	2.11E-05	-0.0156	0.701
	muros no acoplados y con subterráneos	0.014	-1.43E-04	1.78E-05	-0.0425	0.667
	muros acoplados y sin subterráneos	0.016	-1.03E-05	1.84E-05	-0.0037	0.698
	muros acoplados y con subterráneos	0.014	-1.17E-05	1.70E-05	-0.0425	0.723
ambas direcciones	muros no acoplados y sin subterráneos	0.013	-1.45E-04	2.05E-05	0.0241	0.639
	muros no acoplados y con subterráneos	0.013	-1.18E-04	1.47E-05	0.0037	0.615
	muros acoplados y sin subterráneos	0.013	-4.34E-06	1.76E-05	0.02	0.641
	muros acoplados y con subterráneos	0.013	-3.60E-06	1.29E-05	-0.0376	0.614

Tabla 6.4: Función: $T = k(M/I)^\alpha H^\beta$

casos		coeficientes			R^2
		α	β	k	
dirección longitudinal	muros no acoplados y sin subterráneos	0.0116	0.1822	0.9253	0.69
	muros no acoplados y con subterráneos	0.0070	0.1819	1.0169	0.68
	muros acoplados y sin subterráneos	0.0185	0.0824	0.9470	0.65
	muros acoplados y con subterráneos	0.0092	0.0809	1.0820	0.64
dirección transversal	muros no acoplados y sin subterráneos	0.0079	0.2452	1.0274	0.77
	muros no acoplados y con subterráneos	0.0049	0.2332	1.1193	0.73
	muros acoplados y sin subterráneos	0.0154	0.1661	1.0145	0.74
	muros acoplados y con subterráneos	0.0081	0.2332	1.1313	0.77
ambas direcciones	muros no acoplados y sin subterráneos	0.0095	0.2149	0.9793	0.74
	muros no acoplados y con subterráneos	0.0056	0.2200	1.0714	0.73
	muros acoplados y sin subterráneos	0.0187	0.1434	0.9617	0.73
	muros acoplados y con subterráneos	0.0098	0.1572	1.0867	0.73

Tabla 6.5: Función: $T = \alpha H + \beta(M/I) + k$

casos		coeficientes			R^2
		α	β	k	
dirección longitudinal	muros no acoplados y sin subterráneos	0.0140	0.0044	-0.044	0.60
	muros no acoplados y con subterráneos	0.0124	0.0062	-0.095	0.61
	muros acoplados y sin subterráneos	0.0135	0.1204	-0.014	0.59
	muros acoplados y con subterráneos	0.0125	0.1202	-0.063	0.57
dirección transversal	muros no acoplados y sin subterráneos	0.0187	0.0074	-0.162	0.71
	muros no acoplados y con subterráneos	0.0169	0.0069	-0.191	0.65
	muros acoplados y sin subterráneos	0.0174	0.0978	-0.130	0.72
	muros acoplados y con subterráneos	0.0159	0.1209	-0.220	0.73
ambas direcciones	muros no acoplados y sin subterráneos	0.0165	0.0055	-0.103	0.62
	muros no acoplados y con subterráneos	0.0147	0.0068	-0.151	0.59
	muros acoplados y sin subterráneos	0.0150	0.1235	-0.074	0.69
	muros acoplados y con subterráneos	0.0138	0.1343	-0.133	0.69

Tabla 6.6: Función: $T = kH^\alpha$

casos		coeficientes		R^2
		α	k	
dirección longitudinal	muros no acoplados y sin subterráneos	1.004	0.0137	0.66
	muros no acoplados y con subterráneos	1.155	0.0064	0.65
	muros acoplados y sin subterráneos	1.004	0.0137	0.66
	muros acoplados y con subterráneos	1.155	0.0064	0.65
dirección transversal	muros no acoplados y sin subterráneos	1.157	0.0093	0.74
	muros no acoplados y con subterráneos	1.329	0.0039	0.71
	muros acoplados y sin subterráneos	1.157	0.0093	0.74
	muros acoplados y con subterráneos	1.329	0.0039	0.71
ambas direcciones	muros no acoplados y sin subterráneos	1.081	0.0113	0.70
	muros no acoplados y con subterráneos	1.242	0.0050	0.70
	muros acoplados y sin subterráneos	1.081	0.0113	0.70
	muros acoplados y con subterráneos	1.242	0.0050	0.70