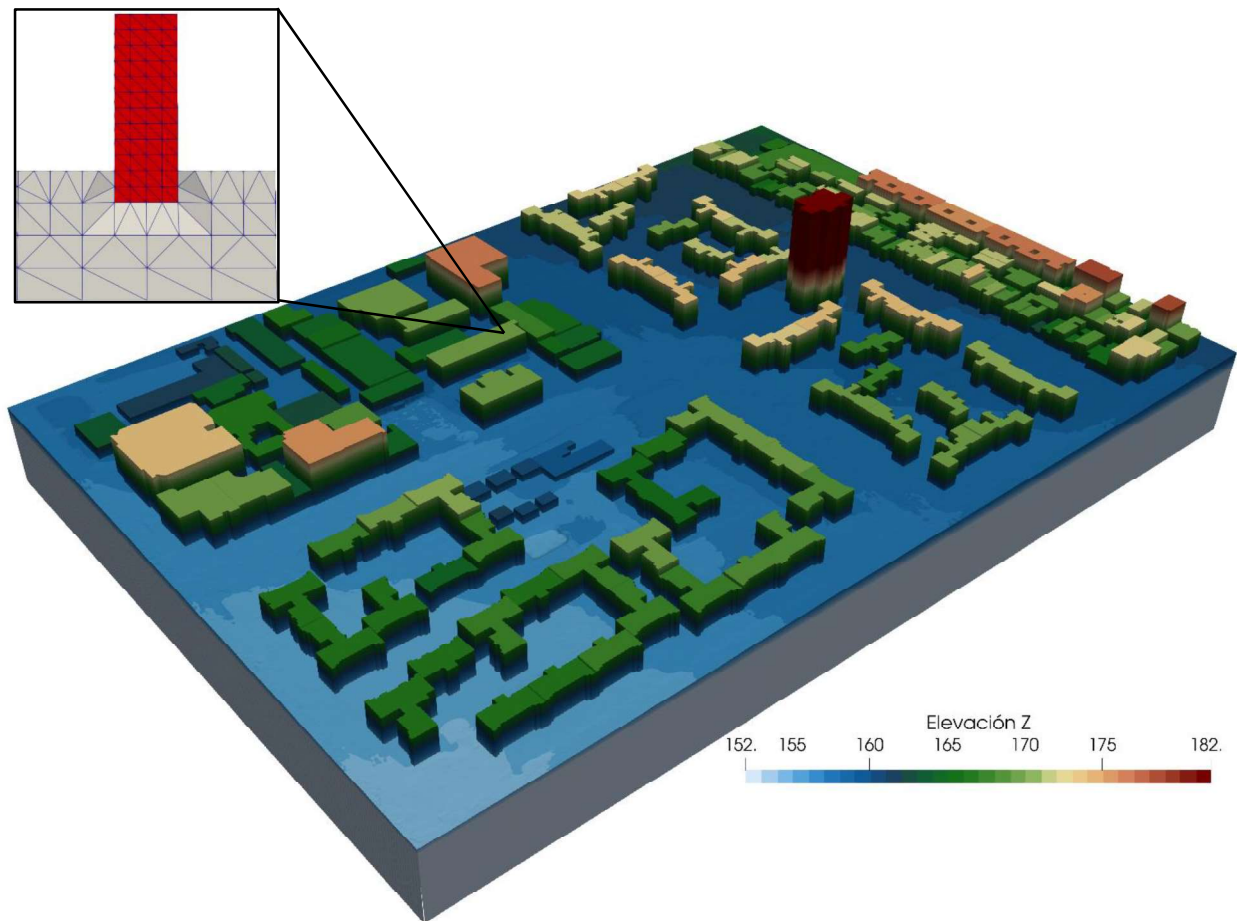


SERVICIO DE RECOPIACIÓN Y DIGITALIZACIÓN DE INFORMACIÓN DE ESTRUCTURAS DE EDIFICIOS EN ZONA ALEDAÑA A LA SEDE CENTRAL DE SENCICO PARA EL MODELAMIENTO 3D



ELABORADO POR
MAG. ING. JULIAN MILLER PALACIOS ESPINOZA



SEGUNDO ENTREGABLE
OCTUBRE DE 2024

CONTENIDO

RESUMEN	3
LISTA DE FIGURAS	4
LISTA DE TABLAS	5
1. INTRODUCCIÓN	6
1.1. Generalidades	6
1.2. Descripción del problema	6
1.3. Zona de estudio	7
1.4. Objetivos	8
2. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN MEDIANTE FOTOGRAMETRÍA	9
2.1. Puntos de control	9
2.2. Levantamiento fotogramétrico con RPAS	11
3. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN	13
3.1. Calibración de las imágenes	13
3.2. Generación del modelo de puntos 3D	13
3.3. Generación de la ortofoto y el DEM	14
4. METODOLOGÍA PARA LA GENERACIÓN DEL MODELO 3D	17
4.1. Descripción del procedimiento para la generación del modelo 3D	17
4.2. Definición del sistema de coordenadas	18
4.3. Generación de malla de elementos finitos del área urbana	20
5. LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN DE ESTRUCTURAS	21
5.1. Digitalización del footprint de estructuras	21
5.2. Recopilación de características de estructuras	23
6. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DE ESTRUCTURAS	25
6.1. Análisis estadístico del Inventario de Estructuras	25
6.2. Recomendaciones para el modelamiento estructural	29
7. COMPUTACIÓN EN PARALELO PARA EL ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS	40
7.1. Propuesta de procedimiento para el análisis estructural	41
7.2. Estimación del tiempo de cómputo y almacenamiento requerido	42
CONCLUSIONES	44
DESCARGO DE RESPONSABILIDAD	44
REFERENCIAS	45
ANEXOS	47

RESUMEN

Debido a que el Perú se encuentra en la región del cinturón de fuego del Pacífico, conocida por su alta actividad sísmica, se prevé la ocurrencia de un terremoto de magnitud Mw 8.8 en la región central del país. Dado que estos eventos ocasionan pérdidas significativas en términos monetarios y de vidas humanas, surge la necesidad de estimar los posibles daños que se generan ante un evento sísmico de gran magnitud. Sin embargo, para poder llevar a cabo esta estimación en zonas urbanas de grandes dimensiones, es necesario apoyarse de los métodos y herramientas computacionales actuales. En ese sentido, el presente servicio se enfoca en la recopilación y digitalización de datos estructurales de edificaciones en una zona urbana, con el objetivo de proporcionar los insumos necesarios para la generación de un modelo numérico tridimensional.

El Capítulo 1 introduce el contexto de las simulaciones sísmicas y detalla cómo la recopilación de información en la zona de estudio contribuye a la creación del modelo tridimensional. Además, se describe el problema a resolver, los objetivos del servicio y la delimitación de la zona de estudio. En el Capítulo 2, se lleva a cabo la recopilación de datos mediante fotogrametría aérea, lo que permite la generación de un Modelo Digital de Elevación (DEM). Estos datos se procesan y validan mediante puntos de control, alcanzando una resolución del terreno de cuatro centímetros por píxel.

El Capítulo 3 describe el proceso de obtención del DEM, que incluye la calibración de imágenes, la generación del modelo de puntos 3D y, finalmente, la creación del DEM. A partir de este modelo, se obtienen representaciones 3D de la zona de estudio, planos en planta y cortes transversales de la superficie. En el Capítulo 4, se explica el procedimiento para generar un modelo de elementos finitos basado en el DEM, estableciendo un nuevo sistema de coordenadas y utilizando el “footprint” o forma espacial de cada lote para integrarlo con el terreno, considerando así la interacción suelo-estructura.

El Capítulo 5 se centra en el levantamiento de estructuras, donde se digitalizan 198 edificaciones en la zona de estudio, elaborando el footprint correspondiente para cada una y recopilando las características estructurales. En el Capítulo 6, se lleva a cabo un análisis estadístico del inventario de estructuras destacando el predominio de la albañilería como material de construcción. Además, en este capítulo se realiza recomendaciones para el modelamiento estructural inelástico de los diferentes tipos de sistemas estructurales identificados: albañilería, concreto y acero. Finalmente, en el Capítulo 7 se propone un procedimiento para el análisis eficiente de la respuesta sísmica de las estructuras a escala urbana, que incluye la generación de modelos estructurales inelásticos y el uso de técnicas de computación en paralelo. Además, se estiman valores referenciales del tiempo de cómputo y del espacio de almacenamiento necesarios para llevar a cabo estos análisis.

La recopilación y digitalización de información de estructuras realizadas en este servicio es necesaria para hacer viables las simulaciones numéricas de propagación de ondas sísmicas en áreas urbanas, mejorando así la estimación de daños, particularmente en estructuras como edificios antiguos, viviendas informales y estructuras especiales.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación de la zona de estudio delimitada por los puntos U1, U2, U3 y U4.....	7
Figura 2 Ubicación de los puntos de control en la zona de estudio.	11
Figura 3 Vista del modelo de puntos tridimensional.	13
Figura 4 Ortofoto de la zona de estudio.	14
Figura 5 Modelo digital de superficie DSM de la zona de estudio (vista en planta).	15
Figura 6 Modelo digital de superficie DSM de la zona de estudio (vista 3D).	15
Figura 7 Modelo digital del terreno DTM de la zona de estudio (vista 3D).	16
Figura 8 a) Representación gráfica de una estructura construida en un suelo. b) Modelo de elementos finitos para considerar la interacción suelo-estructura.....	17
Figura 9 Ejemplo de digitalización de geometrías de las plantas de edificaciones en una parte de la zona de estudio.....	18
Figura 10 Sistema de coordenadas para la zona de estudio.....	19
Figura 11 Rotación de ejes coordenados.	19
Figura 12 Representación de mallado de elementos finitos tridimensionales.	20
Figura 13 Footprint de las manzanas de la zona de estudio.....	21
Figura 14 Footprint de las estructuras de la Manzana A de la zona de estudio.	22
Figura 15 Footprint de las estructuras de la Manzana B de la zona de estudio.	22
Figura 16 Footprint de las estructuras de la Manzana C de la zona de estudio.....	22
Figura 17 Footprint de las estructuras de la Manzana D de la zona de estudio.....	23
Figura 18 a) Foto de una estructura típica en la manzana B. b) Foto de una estructura típica en la manzana D.....	23
Figura 19 Distribución del uso del inventario de estructuras.....	25
Figura 20 Distribución del material de construcción del inventario de estructuras.	25
Figura 21 Distribución del sistema estructural en X' del inventario de estructuras.....	26
Figura 22 Distribución del sistema estructural en Y' del inventario de estructuras.	26
Figura 23 Distribución de la cantidad de estructuras en intervalos de Número de Pisos.	27
Figura 24 Distribución de la cantidad de estructuras en intervalos de Altura.	27
Figura 25 Distribución de la cantidad de estructuras en intervalos de Área.....	28
Figura 26 Distribución de la cantidad de estructuras en intervalos de Volumen.	28
Figura 27 Curva de capacidad de muros albañilería elaborado por Diaz et al., (2020). La curva de color negro representa el comportamiento del muro sin reforzamiento.	30
Figura 28 Expresiones matemáticas del Modelo Histeretico Degrading Tri-Linear Model (T. Saito, 2023).	31
Figura 29 Ingreso de propiedades en el programa STERA 3D del Modelo Histerético "Degrading Tri-Linear" (T. Saito, 2023).	31
Figura 30 a) Interfaz para la definición de las características de un elemento viga. b) Interfaz para la definición de parámetros para el comportamiento no lineal de un elemento viga. Fuente: T. Saito (2023).....	32
Figura 31 Elemento tipo barra para vigas. Fuente: D. T. Saito (2021).	33
Figura 32 a) Interfaz para la definición de las características de un elemento columna. b) Interfaz para la definición de parámetros para el comportamiento no lineal de un elemento columna. Fuente: T. Saito (2023).	33
Figura 33 Elemento tipo barra para columnas. Fuente: (D. T. Saito, 2021)	34
Figura 34 Representación gráfica de los resortes verticales de un elemento columna. Fuente: (D. T. Saito, 2021)	34

Figura 35 a) Interfaz para la definición de las características de un elemento muro. b) Interfaz para la definición de parámetros para el comportamiento no lineal de un elemento muro. Fuente: T. Saito (2023).	35
Figura 36 Modelo de un elemento muro. Fuente: (D. T. Saito, 2021)	35
Figura 37 Representación gráfica de los resortes verticales de un elemento muro. Fuente: (D. T. Saito, 2021).	36
Figura 38 Modelo tri-lineal para los resortes de flexión. Fuente: (D. T. Saito, 2021)	36
Figura 39 Modelo no lineal para el resorte de corte. Fuente: (D. T. Saito, 2021)	36
Figura 40 a) Comportamiento no lineal de un resorte vertical de acero. b) Comportamiento no lineal de un resorte vertical de concreto. Fuente: (D. T. Saito, 2021).	37
Figura 41 Expresiones matemáticas del Modelo de histéresis de la viga de acero (T. Saito, 2023).	37
Figura 42 Ingreso de propiedades en el programa STERA3D del Modelo de histéresis de la viga de acero (T. Saito, 2023).	38
Figura 43 Expresiones matemáticas del momento - curvatura de la columna de acero (T. Saito, 2023).	38
Figura 44 Expresiones matemáticas del modelo de histéresis bilineal de la columna de acero (T. Saito, 2023).	39
Figura 45 Ingreso de propiedades en el programa STERA3D del Modelo de histéresis de la columna de acero (T. Saito, 2023).	39
Figura 46 Metodología para la estimación de la respuesta sísmica empleando simulaciones numéricas tridimensionales (Palacios, 2024).	40
Figura 47 Modelo “maestro-esclavo” según Agata et al. (2016). Se observa que el proceso maestro asigna el trabajo de cómputo a los procesos esclavos tan pronto como estos completan un análisis.	41

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Coordenadas de los puntos que delimitan la zona de estudio.	8
Tabla 2 Características de lectura de GPS diferencial.	9
Tabla 3 Coordenadas de estación de rastreo permanente LI01.	10
Tabla 4 Parámetros para el cálculo de coordenadas de los puntos de control.	10
Tabla 5 Coordenadas de los puntos de control.	10
Tabla 6 Precisión y error de los puntos de control GCP.	12
Tabla 7 Validación de los productos fotogramétricos a partir de los puntos de validación.	12
Tabla 8 Propiedades geométricas y del comportamiento inelástico del muro de albañilería.	29
Tabla 9 Respuestas obtenidas de un muro de albañilería en el programa STERA 3D y ETABS.	29
Tabla 10 Costo por hora de diferentes computadoras en dólares, obtenidos del sitio oficial de AWS (https://calculator.aws) actualizado al mes de abril de 2024.	42

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

Debido a la alta actividad sísmica en la región del cinturón de fuego del Pacífico, los países ubicados en esta zona, incluyendo Perú, se encuentran expuestos a la amenaza constante de terremotos. Según estudios que analizan la deformación de la corteza terrestre, se prevé la ocurrencia de un terremoto de magnitud Mw 8.8, en la región central de Perú (Villegas et al., 2016), donde reside aproximadamente la mitad de la población del país. Este evento podría generar cuantiosas pérdidas humanas y económicas, por lo que es crucial mejorar la estimación y mitigación del daño en infraestructura.

Las zonas urbanas son especialmente vulnerables a los terremotos. Estudios como el de Alva Hurtado & Ortiz Salas, (2020) describen el impacto de fenómenos registrados en terremotos, como la licuación de suelos, en diferentes ciudades del país desde el año 1582. Otro fenómeno es el deslizamiento de rocas en zonas urbanas de pendiente pronunciada como el estudio del comportamiento sísmico del acantilado de Lima realizado por Pretell & Aguilar, (2016). Asimismo, la vulnerabilidad de las viviendas construidas informalmente es un problema latente en el país; por ejemplo, durante el terremoto de Pisco en 2007 se evidenció que aproximadamente 90,000 edificios colapsaron siendo un gran porcentaje de ellos viviendas construidas de manera informal (Matsuzaki et al., 2014).

Si bien se han llevado a cabo estudios para estimar el impacto de terremotos en varias ciudades del país, esta evaluación puede mejorarse significativamente mediante el uso de simulaciones numéricas tridimensionales que modelen la propagación de ondas sísmicas en zonas urbanas. Este enfoque se ha vuelto factible gracias a los sistemas de computación de alto rendimiento (High-Performance Computing, HPC) disponibles en la actualidad. Además de mejorar la precisión de las estimaciones, este tipo de simulaciones también permiten una evaluación integral de los fenómenos locales ocasionados por los terremotos.

Para realizar este tipo de simulaciones, Palacios (2024) propone una metodología que comienza con la recopilación de datos de la zona urbana, incluyendo el modelo digital de elevación, el modelo tridimensional de velocidades, la caracterización geotécnica y el inventario de estructuras. Luego, se realiza simulaciones a partir de registros sísmicos y se obtiene la respuesta sísmica en la superficie mediante técnicas de computación de alto rendimiento. Finalmente, esta respuesta es utilizada para la estimación del daño en viviendas, edificios y estructuras enterradas. En este sentido, el objetivo del presente servicio es recopilar información sobre los edificios y elaborar el modelo digital de elevación de la zona de estudio.

1.2. Descripción del problema

Debido a la actividad tectónica asociada a la convergencia de placas en zonas de subducción, como es el caso del cinturón de fuego del Pacífico, países ubicados en tales zonas, incluyendo Perú, se enfrentan a una amenaza constante de terremotos. En respuesta a esta amenaza inminente de terremotos, se han llevado a cabo diversos estudios con el propósito de estimar el impacto en la infraestructura y en líneas vitales ante este tipo de eventos. Tradicionalmente, la evaluación del daño se efectúa de manera aproximada mediante el empleo de modelos simplificados y funciones que establecen la relación entre la intensidad sísmica y el nivel de daño, conocidas como curvas de fragilidad.

No obstante, es necesario mejorar la estimación del daño en zonas urbanas que incluyen viviendas, estructuras subterráneas y líneas vitales. Una estrategia viable para mejorar dicha estimación es la aplicación de simulaciones numéricas mediante modelos tridimensionales de alta fidelidad a escala urbana. La ejecución de estas simulaciones de gran escala es posible mediante recursos computacionales y técnicas de computación de alto rendimiento.

Gracias a la evolución tecnología y a fondos para la investigación científica, países desarrollados como Japón han aprovechado el poder de las supercomputadoras para realizar este tipo de simulaciones numéricas. Por ejemplo, Ichimura et al., (2022) realizaron por primera vez una simulación totalmente acoplada de la propagación de ondas sísmicas desde la falla sísmica, pasando por los estratos del suelo hasta llegar a la ciudad donde se encuentran las estructuras.

Sin embargo, la aplicación de estas herramientas tecnológicas aún no se ha llevado a cabo en nuestro país debido a la falta de información y experiencia técnica en este ámbito. Para superar este obstáculo, es fundamental recopilar y digitalizar información de las estructuras, de modo que sirva de base para la creación de modelos numéricos tridimensionales a escala urbana. Estas simulaciones no solo optimizarían la estimación del daño en escenarios sísmicos, sino que también proporcionarían a las autoridades una herramienta más precisa y eficiente que las metodologías convencionales para la gestión del riesgo en áreas urbanas.

1.3. Zona de estudio

La zona de estudio abarca la sede central de SENCICO y las zonas aledañas que están dentro del distrito de San Borja. En la Figura 1, se muestra la ubicación de la zona de estudio.



Figura 1 Ubicación de la zona de estudio delimitada por los puntos U1, U2, U3 y U4.

Las coordenadas de los puntos de delimitan la zona de estudio se pueden observar en la Tabla 1.

Tabla 1 Coordenadas de los puntos que delimitan la zona de estudio.

Punto	Este [m]	Norte [m]
U1	281465	8662986
U2	281420	8663271
U3	281850	8663339
U4	281894	8663045

1.4. Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo recopilar y digitalizar la información de estructuras de edificios en zona aledaña a la sede central de SENGICO para la generación de un modelo numérico tridimensional de esta zona urbana. Los objetivos específicos del servicio son:

- Elaborar un modelo digital de elevación (DEM) de la zona de estudio con una buena resolución utilizando métodos fotogramétricos, con el fin de aplicarlo en el modelamiento numérico tridimensional.
- Presentar el DEM como el Modelo Digital de Superficie (DSM) y Modelo Digital del Terreno (DTM) en formato TIF, TXT y XLSX.
- Plantear recomendaciones para el uso del modelo digital de elevación en la elaboración del modelo numérico tridimensional.
- Realizar la recopilación de información de los edificios que se encuentran en la zona de estudio, además de digitalizar la información en una base de datos.
- Analizar la información recopilada de los edificios y realizar recomendaciones para el análisis sísmico considerando el comportamiento inelástico de acuerdo con el tipo de sistema estructural.
- Proponer un procedimiento para el análisis eficiente de la respuesta sísmica de estructuras a escala urbana utilizando la información recopilada.

2. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN MEDIANTE FOTOGRAMETRÍA

Este capítulo se enfoca en la recopilación de datos en campo, la cual consistió en dos actividades principales: la colocación de puntos de control, que son referencias físicas en el terreno con coordenadas conocidas y visibles en las fotografías aéreas, y la ejecución de vuelos fotogramétricos con RPAS (Sistemas Aéreos Pilotados Remotamente, por sus siglas en inglés).

2.1. Puntos de control

Con el objetivo de obtener un modelo digital de elevación de alta resolución, se consideró necesario colocar ocho puntos de control en la zona de estudio. En primer lugar, se marcaron los ocho puntos de control utilizando elementos reconocibles en las fotografías aéreas, como las esquinas de las veredas de concreto a nivel de la losa, sardinel o cajas de agua de SEDAPAL.

En segundo lugar, se llevó a cabo el registro de muestreo utilizando un GPS diferencial para determinar la posición exacta de los puntos de control. En la zona de estudio, se realizó el rastreo de datos durante aproximadamente 30 minutos en los ocho puntos, que fueron codificados para facilitar su identificación (P1, P2, ..., P8) y conectados a la estación base ERP LI01-Surquillo (Estación de Rastreo Permanente). Las características de la lectura del GPS diferencial se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2 Características de lectura de GPS diferencial.

Máscara de elevación:	10 grados
Radio de lectura:	1s
Elipsoide:	WGS84
Proyección:	UTM 18S
Geoide:	EGM 08

Una vez finalizados los trabajos de campo, se procedió con el procesamiento de los datos obtenidos. Para este procesamiento, se aplicó el método de línea base, que consiste en calcular las diferencias de posición entre los puntos de control y la estación base (ERP LI01 - Surquillo). Este método es eficaz porque permite compensar errores sistemáticos al aprovechar el hecho de que tanto los puntos de control como la estación base capturan señales de los mismos satélites de forma simultánea, lo que contribuye a mejorar la precisión de las mediciones.

Durante el procesamiento, se importaron los datos de las lecturas de los puntos de control y se realizaron ajustes para minimizar los errores de medición, utilizando algoritmos de ajuste como el método de mínimos cuadrados. Este proceso generó una línea base que proporciona un marco de referencia preciso para las coordenadas de los puntos de control. A través de este enfoque, se logró una mayor confiabilidad en la modelación del terreno, facilitando así la posterior elaboración del modelo digital de elevación.

Las coordenadas geodésicas WGS-84 se obtuvieron como resultado del procesamiento de los datos medidos y registrados durante los trabajos de campo. Los valores de las coordenadas de posición horizontal para la estación de rastreo permanente "LI01-Surquillo", proporcionados por el Instituto Geográfico Nacional (IGN), se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3 Coordenadas de estación de rastreo permanente LI01.

ERP	COORDENADAS UTM			COORDENADAS GEOGRÁFICAS		ALTURA
	ZONA	NORTE	ESTE	LATITUD S	LONGITUD W	
LI01	18 S	8661244.5791	280479.9175	12°06'10.85973"	77°01'00.98139"	157.6791

Los parámetros para los cálculos de las coordenadas tales como la precisión vertical y horizontal de los puntos de control geodésicos obtenidos, así como el RMS (Error Cuadrático Medio) y el PDOP (Dilución de Precisión Posicional) se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4 Parámetros para el cálculo de coordenadas de los puntos de control.

LINEA BASE	PRECISIÓN VERTICAL	PRECISIÓN HORIZONTAL	RMS	PDOP MÁX.	FRECUENCIA
LI01 – P1	0.013 m	0.007 m	0.013 m	2.368	L1, L2
LI01 – P2	0.013 m	0.010 m	0.014 m	1.894	L1, L2
LI01 – P3	0.011 m	0.007 m	0.011 m	4.619	L1, L2
LI01 – P4	0.018 m	0.010 m	0.015 m	2.462	L1, L2
LI01 – P5	0.016 m	0.008 m	0.011 m	3.728	L1, L2
LI01 – P6	0.012 m	0.008 m	0.015 m	45.47	L1, L2
LI01 – P7	0.014 m	0.008 m	0.015 m	2.128	L1, L2
LI01 – P8	0.024 m	0.012 m	0.016 m	3.496	L1, L2

Las coordenadas de los puntos de control obtenidas del procesamiento se muestran en la Tabla 5. En los **ANEXOS** se adjunta la ficha técnica de cada punto de control.

Tabla 5 Coordenadas de los puntos de control.

PUNTO	LATITUD (S) WGS-84	LONGITUD (W) WGS-84	ALTURA ELIPSOIDAL	ESTE (E) WGS-84	NORTE (N) WGS-84	ELEVACION (EGM-08)
P1	S12°05'08.82222"	O77°00'22.64844"	181.717	281625.273	8663159.755	157.799
P4	S12°05'09.92293"	O77°00'27.43884"	179.746	281480.631	8663124.863	155.849
P8	S12°05'04.31695"	O77°00'27.04812"	181.951	281491.184	8663297.242	158.041
P5	S12°05'13.19657"	O77°00'20.74877"	181.680	281683.717	8663025.737	157.765
P3	S12°05'10.28506"	O77°00'20.46992"	182.466	281691.495	8663115.280	158.543
P2	S12°05'06.15489"	O77°00'21.10286"	183.764	281671.420	8663242.075	159.835
P7	S12°05'12.71071"	O77°00'16.65076"	182.998	281807.556	8663041.578	159.065
P6	S12°05'03.73722"	O77°00'18.44451"	185.734	281751.280	8663316.968	161.790

Finalmente, en la Figura 2 se muestra un croquis detallado de la ubicación de los puntos de control, que proporciona una visión general del área de trabajo y la disposición de los puntos en el terreno. Este croquis es fundamental para comprender la configuración espacial de los puntos de control y su relación con la zona de estudio.

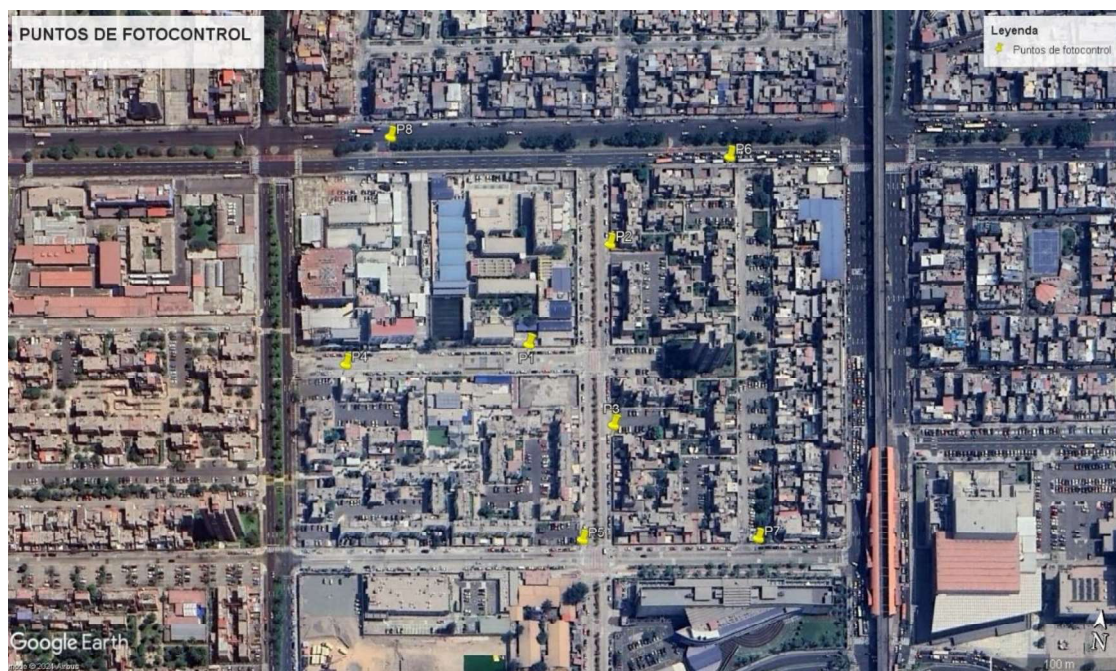


Figura 2 Ubicación de los puntos de control en la zona de estudio.

2.2. Levantamiento fotogramétrico con RPAS

El levantamiento fotogramétrico fue ejecutado en dos fases. En la primera fase, correspondiente al trabajo de campo, se realizaron dos vuelos planificados utilizando vehículos aéreos no tripulados equipados con cámaras de alta precisión. Estos vuelos siguieron una disposición en doble grilla, diseñada específicamente para garantizar la máxima cobertura de la zona de estudio y evitar que quedaran zonas sin información. La altura de vuelo se mantuvo constante durante toda la operación, con el fin de preservar la homogeneidad en la calidad de los datos obtenidos, optimizando así la precisión de la información recopilada. Este enfoque meticuloso permitió capturar un conjunto de datos aéreo coherente y de alta resolución que es crucial para los objetivos del presente servicio.

En la segunda fase, en gabinete, se procesaron de manera conjunta los datos recopilados de los puntos de control y de los vuelos planificados, creando representaciones digitalizadas de la topografía de la zona de trabajo. Este proceso garantiza productos de alta calidad, con una georreferenciación adecuada tanto en vertical como en horizontal, lo que nos permite contar con una representación actualizada del terreno de la zona de estudio, que servirá como insumo fundamental para el desarrollo del presente trabajo.

Los parámetros de vuelo que se utilizaron son:

- Altura de vuelo : 150 m
- Traslape horizontal : 80%
- Traslape vertical : 80%
- Tamaño de píxel del suelo (GSD) : 4 cm

Se recolectaron 541 fotografías aéreas de la zona de estudio con lo cual se realizó la restitución fotogramétrica. Para garantizar la adecuada georreferenciación de los productos fotogramétricos, se introdujeron puntos de control (GCP, por sus siglas en inglés), cuya calidad se detalla en la Tabla 6. Estos puntos fueron esenciales para asegurar que los modelos generados correspondan con la realidad física del terreno, minimizando errores de localización.

Tabla 6 Precisión y error de los puntos de control GCP.

GCP	Precisión XY [m]	Error X [m]	Error Y [m]
P1 (3D)	0.020	0.000	-0.014
P4 (3D)	0.020	0.000	-0.018
P5 (3D)	0.020	-0.034	-0.017
P6 (3D)	0.020	0.028	-0.003
P7 (3D)	0.020	0.008	0.042
P8 (3D)	0.020	0.030	0.074
Promedio [m]		0.005405	0.01054
Sigma [m]		0.02138	0.035135
RMS Error [m]		0.022052	0.036682

Además, para validar la calidad de los productos generados, se utilizaron puntos de control independientes, llamados "puntos de validación". Estos puntos permiten una comparación directa entre las coordenadas medidas en campo y las obtenidas de los productos fotogramétricos, asegurando la precisión de los modelos generados. La Tabla 7 muestra los resultados obtenidos de dicha validación.

Tabla 7 Validación de los productos fotogramétricos a partir de los puntos de validación.

Punto de Validación	Error X [m]	Error Y [m]
P2	-0.0013	0.0027
P3	0.0662	-0.0338
Promedio [m]	0.032453	-0.015553
Sigma [m]	0.033754	0.018273
RMS Error [m]	0.046825	0.023995

El análisis de los errores y la validación de los puntos demuestran que los productos generados presentan un alto grado de precisión, lo que permite su uso en estudios y otras aplicaciones que requieren datos geoespaciales confiables.

3. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN

El Modelo Digital de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés) se generó mediante un proceso fotogramétrico integral que abarcó las fases de aerotriangulación y restitución fotogramétrica, las cuales se describen en este informe. Este modelo es esencial para obtener una representación tridimensional precisa de la superficie a analizar y se utiliza para diversas aplicaciones de análisis geoespaciales. El flujo de trabajo seguido para la generación del DEM se detalla en los siguientes subcapítulos.

3.1. Calibración de las imágenes

La primera fase del proceso consiste en la calibración de las imágenes obtenidas durante los vuelos fotogramétricos. Esta etapa es crítica para asegurar que las imágenes utilizadas en el proceso de modelado estén correctamente ajustadas. En esta fase se detecta automáticamente puntos clave en cada una de las fotografías, conocidos como puntos de coincidencia o "keypoints". Estos puntos son esenciales para corregir cualquier distorsión o aberración óptica provocada por el lente de la cámara, así como para garantizar que la calidad y la precisión de las imágenes sean óptimas. La calibración permite que las imágenes se alineen correctamente entre sí, lo que facilita las siguientes fases del procesamiento.

3.2. Generación del modelo de puntos 3D

Una vez calibradas las imágenes, se procede a la generación del modelo de puntos tridimensional. Esta etapa es una de las más importantes del proceso, ya que se reconstruye la superficie del terreno y los objetos visibles en las imágenes a partir de los puntos clave detectados durante la fase de calibración. El resultado es una nube de puntos densificada que representa con gran detalle las características físicas de la zona de estudio. Cada punto en la nube corresponde a una ubicación exacta en el terreno, con coordenadas X, Y, Z, lo que permite crear una representación tridimensional precisa de la zona de estudio. Este modelo de puntos es la base sobre la cual se generarán los productos finales, como la imagen aérea corregida (ortofoto) y el DEM.



Figura 3 Vista del modelo de puntos tridimensional.

3.3. Generación de la ortofoto y el DEM

En la fase final del proceso, se genera dos productos clave: la ortofoto y el DEM. La ortofoto es una imagen aérea corregida geométricamente que combina la precisión de un mapa con el nivel de detalle de una fotografía. A diferencia de una fotografía aérea sin corrección, la ortofoto no presenta distorsiones causadas por la perspectiva de la cámara o la topografía del terreno, lo que la convierte en una herramienta esencial para la medición precisa de distancias, áreas y formas en el terreno.



Figura 4 Ortofoto de la zona de estudio.

El DEM es una representación tridimensional del relieve del terreno que puede representar solo el terreno o también las estructuras y vegetación. En el presente trabajo, se generó un DEM con una resolución o tamaño de píxel del suelo de 4 cm, lo que implica un alto nivel de detalle y precisión en la representación de la superficie.

Usualmente, cuando el DEM considera la superficie de las estructuras y vegetación, se le denomina Modelo Digital de Superficie (DSM por sus siglas en inglés). El DSM representa la superficie terrestre, incluyendo todas las características elevadas como edificios, árboles, puentes y cualquier objeto sobre el terreno. El DSM generado en este trabajo se muestra en la Figura 5 y en la Figura 6.

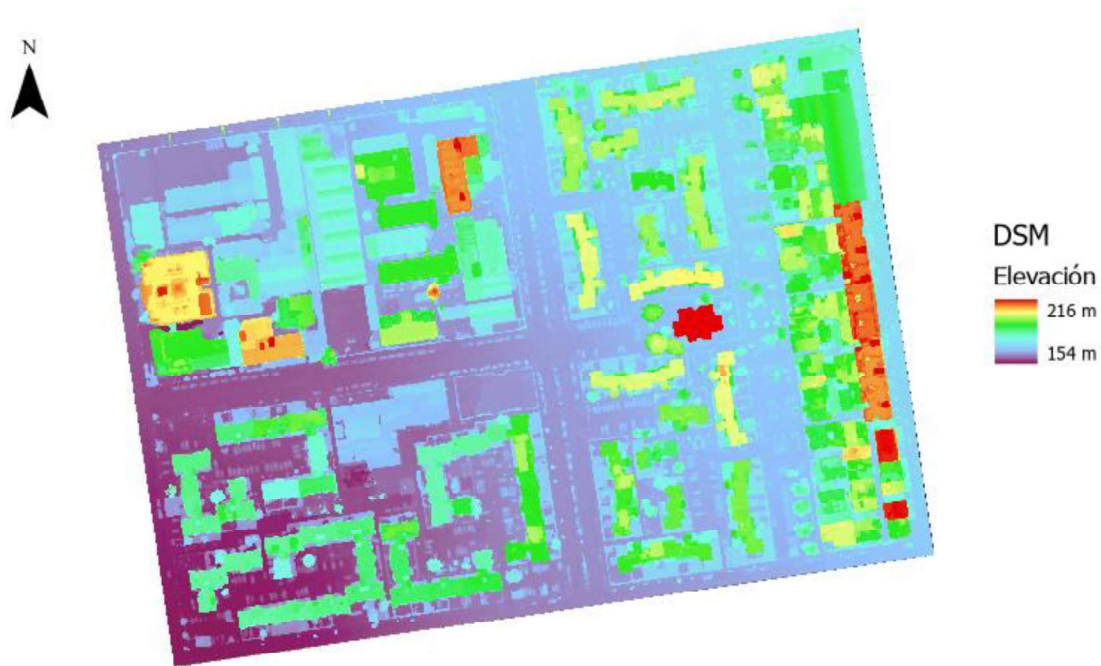


Figura 5 Modelo digital de superficie DSM de la zona de estudio (vista en planta).

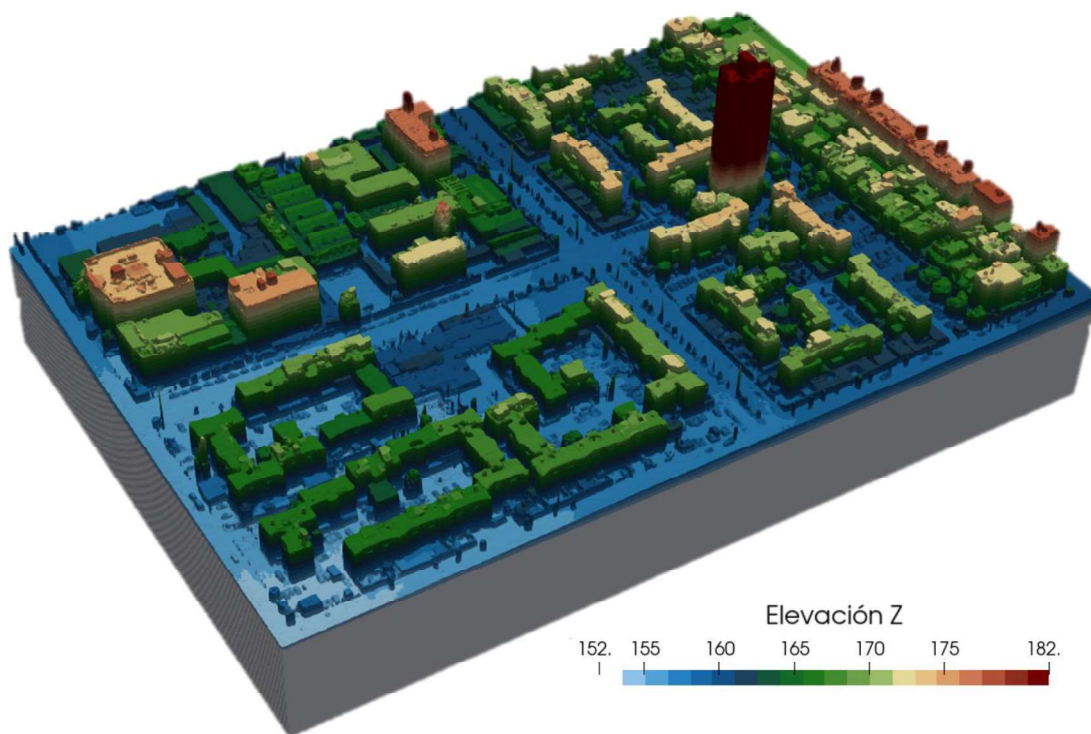


Figura 6 Modelo digital de superficie DSM de la zona de estudio (vista 3D).

Asimismo, realizando un procesamiento del modelo digital de superficie DSM, es posible obtener el Modelo Digital del Terreno (DTM por sus siglas en inglés) eliminando todos los objetos como edificios y vegetación, mostrando únicamente la topografía natural. Al realizar este procedimiento se obtiene el DTM de la zona de estudio, tal como se muestra en la Figura 7.

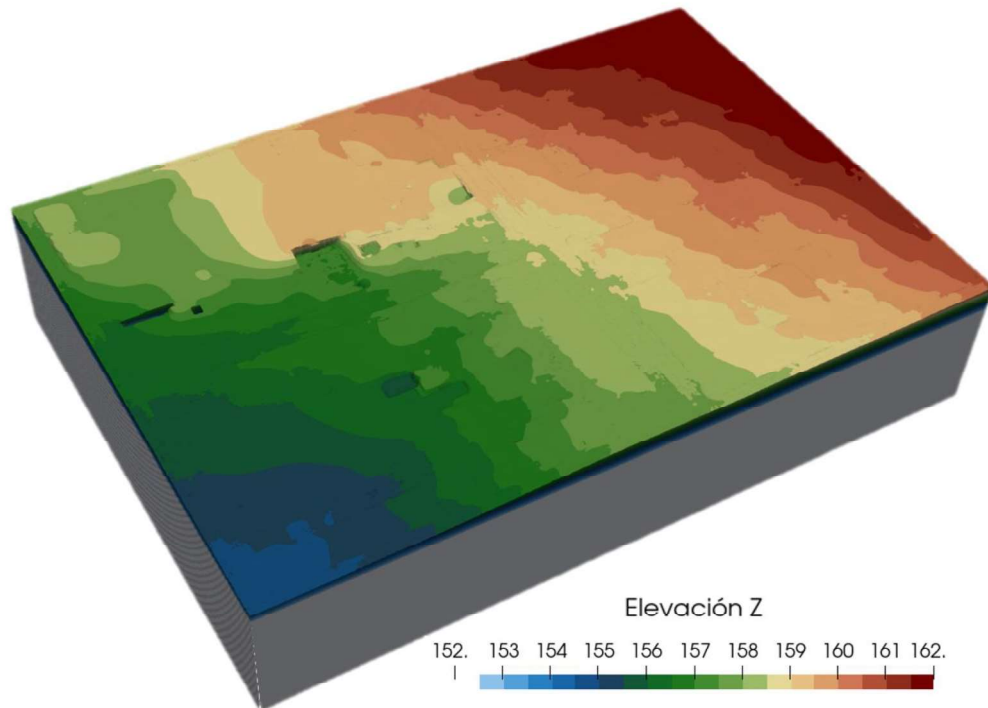


Figura 7 Modelo digital del terreno DTM de la zona de estudio (vista 3D).

El DSM y DTM son utilizados en este servicio para generar los siguientes resultados:

- a) Lista de coordenadas de puntos de la grilla y nivel de terreno.
- b) Planos en planta y cortes de superficie.
- c) Vista 3D de la zona de estudio a nivel de terreno.

Estos resultados se adjuntan a la entrega del presente servicio en los **ANEXOS**.

4. METODOLOGÍA PARA LA GENERACIÓN DEL MODELO 3D

En esta sección se detallarán las recomendaciones para el uso del modelo digital de elevación para la elaboración de la malla de elementos finitos tridimensional de la zona de estudio.

4.1. Descripción del procedimiento para la generación del modelo 3D

Para este servicio se ha considerado importante tener en cuenta los efectos de la interacción suelo-estructura en el modelamiento numérico, dado que en investigaciones realizadas por Taborda & Bielak (2011) y Isbilibroglu et al. (2015) se ha demostrado que este tipo de interacción cambia considerablemente la respuesta dinámica del suelo en un área urbana y que la respuesta sísmica de las edificaciones se reduce. Debido a la importancia de los resultados obtenidos en estos antecedentes, se incorporarán las estructuras del área urbana en estudio en el modelo numérico. Esto permitirá obtener una respuesta más precisa de las edificaciones a nivel de cimentación ante un evento sísmico. Las estructuras serán modeladas con el mismo tipo de elementos finitos tetraédricos utilizados para el modelamiento del suelo, las cimentaciones de las estructuras estarán en contacto con el modelo del suelo. En la Figura 8 se muestra una representación de lo descrito anteriormente.

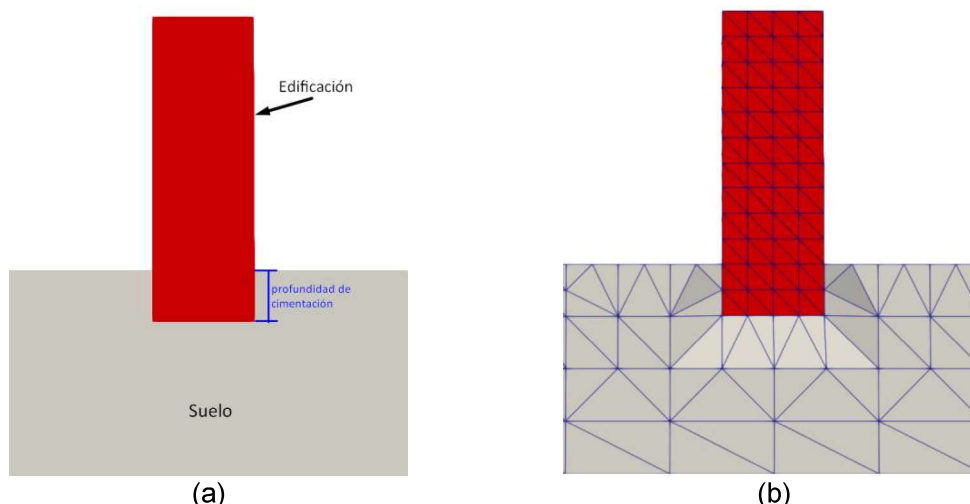


Figura 8 a) Representación gráfica de una estructura construida en un suelo. b) Modelo de elementos finitos para considerar la interacción suelo-estructura.

Para generar el modelamiento de elementos finitos antes mencionado, es necesario contar con el modelo digital de elevación, el cual está compuesto por el Modelo Digital del Terreno (DTM) y el Modelo Digital de Superficie (DSM).

El DTM brinda la información a nivel de terreno, con la cual se podrá representar en un modelo de elementos finitos la geometría superficial del suelo. Sin embargo, el DTM no cuenta con la información del nivel de las cimentaciones. Por ello, será necesario realizar un procesamiento adicional a la información obtenida del DTM, con el fin de tener una correcta representación de la geometría del suelo en las zonas donde existan cimentaciones.

Por otro lado, el DSM cuenta con información del nivel de elementos como árboles, postes, edificaciones, entre otros. Aunque la información sobre las edificaciones puede ser útil para el modelado, la precisión del DSM es limitada debido a las interpolaciones, lo que hace que

no sea conveniente emplear directamente estos datos para dicha tarea. En este sentido, utilizaremos la ortofoto para digitalizar las geometrías en planta de las edificaciones, lo que permitirá realizar un modelado con mayor precisión. Las formas de dichas geometrías serán ajustadas con inspecciones en campo realizadas en la zona de estudio. Con las plantas digitalizadas, será posible incorporar el modelo de elementos finitos de estas estructuras en el modelo del suelo. En la Figura 9 se pueden observar las geometrías digitalizadas de las plantas de edificaciones de parte de la zona de estudio.



Figura 9 Ejemplo de digitalización de geometrías de las plantas de edificaciones en una parte de la zona de estudio.

Luego de procesar la información del DEM, se obtendrá un modelo integrado de elementos finitos que considere la interacción suelo-estructura. Cabe resaltar que la inclusión de modelos de las edificaciones en el modelo de elementos finitos del suelo tiene el fin de brindar resultados más adecuados de la respuesta sísmica a nivel de sus cimentaciones, estos modelos no pretenden reemplazar el modelo estructural detallado en el cual se tiene en cuenta los elementos estructurales de las edificaciones en estudio.

4.2. Definición del sistema de coordenadas

Como se mencionó en la sección anterior, luego de procesar la información del DEM, será posible obtener el modelo de elementos finitos del área urbana. Para realizar el modelo de elementos finitos es importante definir un sistema de coordenadas adecuado con el fin de facilitar la generación de la malla. Por ello, a continuación, se describirá el procedimiento de la definición del sistema de coordenadas de trabajo.

Con fines prácticos, se definirá el origen de coordenadas de la nube de puntos en el punto U1. Los ejes Y y X se orientarán a los ejes cardinales norte (N) y este (E) respectivamente. El sistema de coordenadas descrito se puede observar en la Figura 10.



Figura 10 Sistema de coordenadas para la zona de estudio.

Sin embargo, como se puede observar en la figura anterior, el área delimitada no está orientada con los ejes coordenados (X, Y) definidos. Este detalle no resulta conveniente para la elaboración de la malla de elementos finitos, por lo cual, se optará por rotar los ejes coordenados con el fin de tener un sistema de referencia en el cual la zona de estudio esté orientada con los ejes de coordenadas. En la Figura 11 se puede observar el nuevo sistema de coordenadas (X', Y'), el cual está orientado con la zona de estudio. Esto, facilitará la generación de las mallas de elementos finitos del área urbana, la cual incluye el suelo y los edificios.



Figura 11 Rotación de ejes coordenados.

Si se tiene un punto P con coordenadas X, Y en el sistema de referencia inicial y se desea calcular sus coordenadas X', Y' en el sistema de referencia rotado, éstas se pueden determinar con las Ecuaciones 1 y 2:

$$X' = X\cos\theta + Y\sin\theta \quad (1)$$

$$Y' = -X\sin\theta + Y\cos\theta \quad (2)$$

4.3. Generación de malla de elementos finitos del área urbana

Luego de definir el sistema de coordenadas de la nube de puntos obtenida a partir del modelo digital de elevación, es posible generar la malla de elementos finitos mediante la aplicación del algoritmo de Triangulación de Delaunay para elementos 3D. Este método permitirá la creación de un modelo realístico de las geometrías complejas que se encuentran dentro de la zona de estudio. Sin embargo, este método demanda un alto costo computacional debido a que la escala del modelo requiere de miles de elementos finitos. Por ello, se empleará un método de construcción de un modelo de elementos finitos que permita la creación de un mallado más eficiente utilizando elementos tetraédricos. Este método permitirá obtener una malla de elementos finitos con mejor refinamiento en las zonas donde se requieran y un menor refinamiento en las zonas más alejadas de las interfaces de las capas que componen al suelo donde no es necesario un nivel de refinamiento alto. En la Figura 12 se puede observar una representación del mallado de elementos finitos empleando el algoritmo de la triangulación de Delaunay 3D.

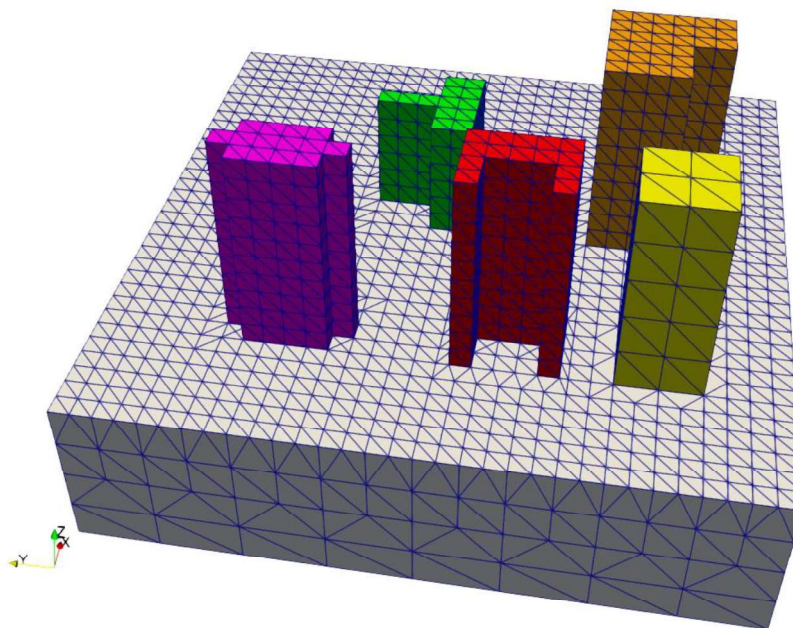


Figura 12 Representación de mallado de elementos finitos tridimensionales.

5. LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN DE ESTRUCTURAS

5.1. Digitalización del footprint de estructuras

El footprint de un edificio es la proyección en planta que delimita el contorno exacto de su estructura sobre el terreno, representando su ubicación, forma y área ocupada. Además, puede incluir información adicional sobre las características de la estructura y su entorno, como el uso, número de pisos, entre otros detalles.

Utilizando el levantamiento fotogramétrico y el modelo digital de superficie, se generó el footprint inicial de las estructuras en la zona de estudio. Durante este proceso, se identificaron grupos de edificaciones con distribuciones en planta similares, lo cual sugiere patrones comunes de construcción. A partir de esta agrupación, se delimitaron cuatro manzanas en la zona de estudio, denominadas A, B, C y D, como se muestra en la Figura 13. Los footprints correspondientes a cada una de estas manzanas se presentan en las Figura 14, Figura 15, Figura 16 y Figura 17.



Figura 13 Footprint de las manzanas de la zona de estudio.

En la manzana A, las estructuras colindan entre sí, con una alta densidad de 64 edificaciones por hectárea, como se muestra en la Figura 14. En la manzana B, se observan estructuras con geometrías similares en planta y una densidad baja de 11 edificaciones por hectárea, como se indica en la Figura 15. La manzana C alberga organismos públicos como INDECOPI, INACAL, OSIPTEL y SENCICO, con una densidad de 14 estructuras por hectárea, también baja, como se muestra en la Figura 16. Finalmente, en la manzana D, se encuentran edificaciones con geometrías similares en planta y una densidad de 13 estructuras por hectárea, considerada baja, como se ve en la Figura 17.



Figura 14 Footprint de las estructuras de la Manzana A de la zona de estudio.



Figura 15 Footprint de las estructuras de la Manzana B de la zona de estudio.



Figura 16 Footprint de las estructuras de la Manzana C de la zona de estudio.

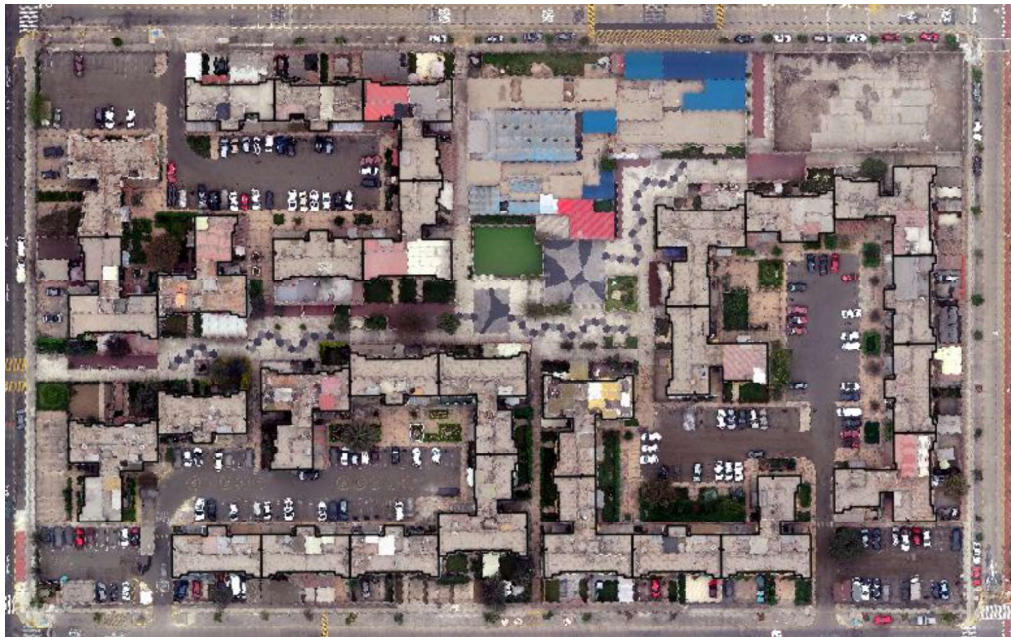


Figura 17 Footprint de las estructuras de la Manzana D de la zona de estudio.

5.2. Recopilación de características de estructuras

Después de la digitalización inicial de las estructuras, se realizó una salida de campo para recolectar información sobre las características de las estructuras y verificar la precisión de la digitalización realizada en gabinete. Durante esta inspección en campo, se identificaron estructuras típicas tanto en la manzana B como en la manzana D. La Figura 18 muestra fotografías tomadas en campo de estas estructuras representativas.



Figura 18 a) Foto de una estructura típica en la manzana B. b) Foto de una estructura típica en la manzana D.

A continuación, se presenta la información recopilada en campo mediante una inspección visual. A cada estructura se le asignó un código "CodLte" que comienza con la letra correspondiente a la manzana, por ejemplo, A-44 para una estructura en la manzana A o D-10 para una de la manzana D. Para cada estructura se recopiló la siguiente información:

1. **Altura:** Altura de la estructura (m).
2. **N_pisos:** Número de pisos de la estructura.
3. **Uso:** Uso de la estructura.
4. **Sist_Est_X:** Sistema Estructural en el eje X' (ver dirección en la Figura 11).
5. **Sist_Est_Y:** Sistema Estructural en el eje Y' (ver dirección en la Figura 11).
6. **Material:** Material principal utilizado en la construcción.
7. **Volumen:** Volumen de la estructura (m^3).
8. **Area:** Área en planta de la estructura (m^2).
9. **UbicacionE:** Coordenada UTM Este del centroide de la planta de la estructura.
10. **UbicacionN:** Coordenada UTM Norte del centroide de la planta de la estructura.

Las características consideradas son principalmente propiedades geométricas de las estructuras, como altura, área en planta, número de pisos, volumen y ubicación. Además, se recopiló información sobre el material, sistema estructural y uso de las edificaciones, de acuerdo con la norma técnica E.030 del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento del Perú (2018). La información completa de las estructuras, es decir las características de un total de 198 estructuras y el footprint de estas, se encuentra en los **ANEXOS**.

Para definir visualmente el sistema estructural, se establecieron los siguientes criterios: en primer lugar, se verificó si en la fachada, los laterales o cerca de la escalera de la estructura era posible observar los elementos estructurales, como la forma de las vigas, columnas y muros. En los casos en que no se pudo identificar claramente el sistema estructural, se realizaron preguntas a personas que conocían la estructura. Además, para contrastar la información de campo, se llevó a cabo una validación del sistema estructural utilizando las fotografías aéreas. Cabe resaltar que la información recopilada sobre las estructuras se utiliza para obtener una estimación global de su respuesta en la zona de estudio. Por lo tanto, los datos obtenidos deben considerarse como referencias preliminares o estimaciones iniciales. Se recomienda recopilar más información para lograr una estimación precisa de la respuesta sísmica.

Con la digitalización de las estructuras y el modelo digital del terreno, es posible generar un modelo digital de elevación, un insumo clave para la simulación numérica tridimensional de la propagación de ondas sísmicas, el cual también se adjunta en los **ANEXOS**.

6. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DE ESTRUCTURAS

6.1. Análisis estadístico del Inventario de Estructuras

En esta sección, se presenta un resumen y análisis estadístico de la información recopilada en el inventario de estructuras de la zona de estudio. Para visualizar los datos, se utilizaron gráficas circulares para mostrar los porcentajes de estructuras según su uso, material de construcción y sistema estructural. Asimismo, se emplearon histogramas para representar la distribución de las estructuras en términos de altura, área, volumen y número de pisos.

Con respecto al parámetro Uso, el valor predominante es el de vivienda, con un 71.2% de las estructuras en la zona de estudio. Le sigue un 24.3% de estructuras destinadas a educación u organismos públicos. El 4.5% restante corresponde a estructuras con uso comercial o viviendas con comercios en el primer nivel (Vivienda-Comercio). La distribución del parámetro Uso se muestra en la Figura 19. En cuanto al Material de Construcción, la mayoría de las edificaciones están construidas con albañilería, representando el 74.7%. Un 24.7% de las estructuras utiliza concreto armado. El 0.5% restante corresponde a edificaciones de acero, específicamente un mercado situado junto a la Av. Aviación. La distribución del material de construcción se presenta en la Figura 20.

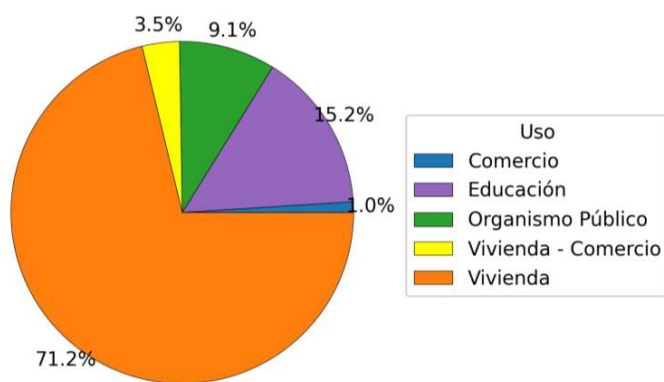


Figura 19 Distribución del uso del inventario de estructuras.

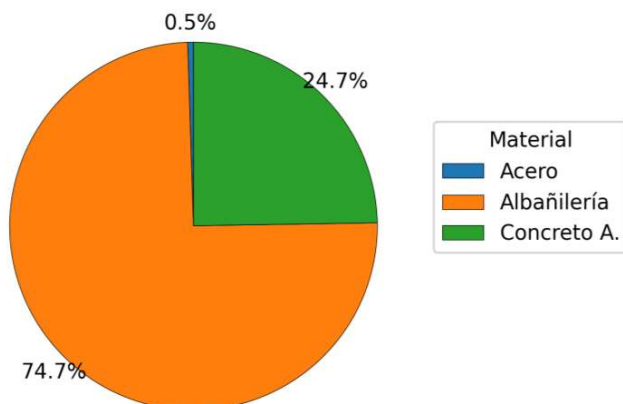


Figura 20 Distribución del material de construcción del inventario de estructuras.

En el caso del Sistema Estructural en el eje X' (ver dirección en la Figura 11), el sistema predominante es la albañilería confinada, presente en el 76.8% de las estructuras. Un 22.2% utiliza sistemas de pórticos de concreto o dual. El 1% restante corresponde a edificaciones

con muros de concreto y acero estructural. La distribución del sistema estructural en el eje X' se ilustra en la Figura 21.

Una distribución similar se puede observar para el Sistema Estructural en Y' (ver Figura 22). Sin embargo, se identificaron diferencias en los sistemas estructurales X' y Y' de tres estructuras de Uso vivienda en la Manzana A y cuatro estructuras de Uso educación en la Mazana C (ver las características de estas estructuras en los **ANEXOS**).

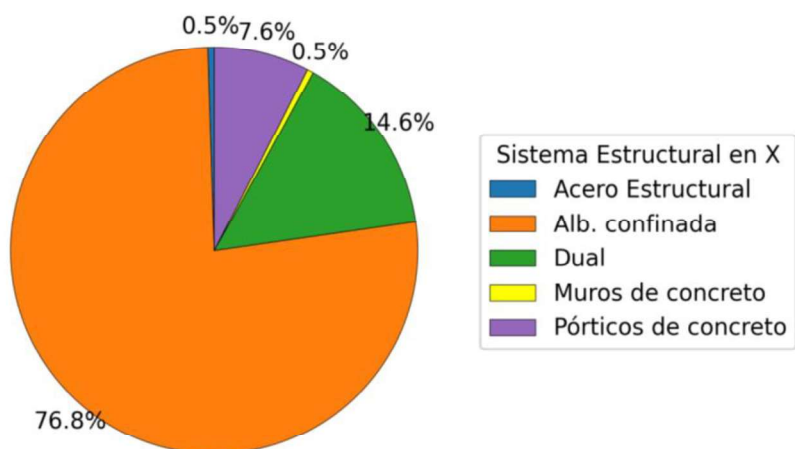


Figura 21 Distribución del sistema estructural en X' del inventario de estructuras.

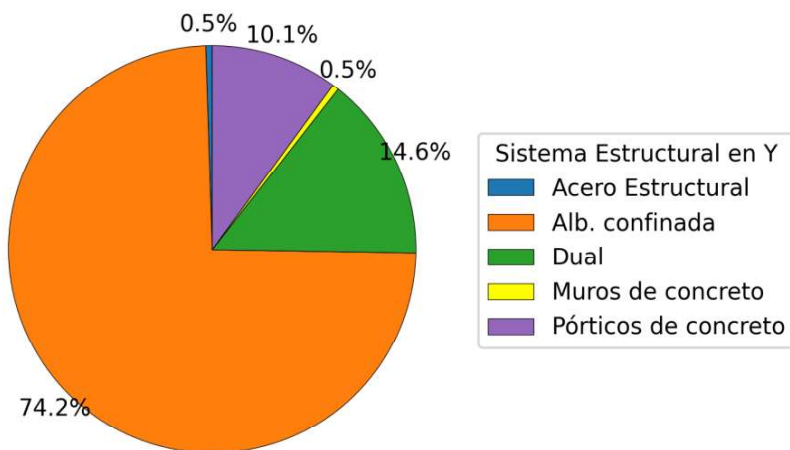


Figura 22 Distribución del sistema estructural en Y' del inventario de estructuras.

En cuanto al parámetro Número de Pisos, aproximadamente 123 de las 198 estructuras tienen 3 o 4 pisos. Además, unas 73 estructuras cuentan con 1, 2 o 5 pisos. De manera particular, en la zona de estudio solo hay una estructura de 6 pisos y otra de 18 pisos. La distribución del número de estructuras por intervalo de pisos se muestra en la Figura 23.

Respecto al parámetro Altura, alrededor de 63 de las 198 estructuras tienen una altura cercana a los 11 metros, lo que corresponde a edificaciones de 3 o 4 niveles. Asimismo, unas 100 estructuras tienen una altura inferior a 10 metros. Como caso particular, destaca una estructura de 51 metros de altura, correspondiente a la edificación de 18 pisos. La distribución

de las estructuras por intervalos de altura se presenta en la Figura 24. Al comparar los histogramas de distribución por número de pisos y altura, se observa una similitud en ambas distribuciones.

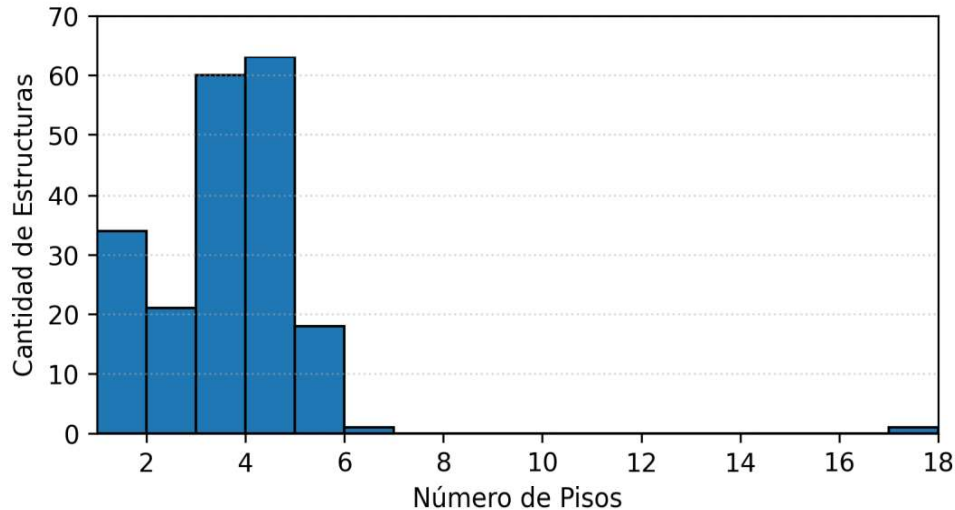


Figura 23 Distribución de la cantidad de estructuras en intervalos de Número de Pisos.

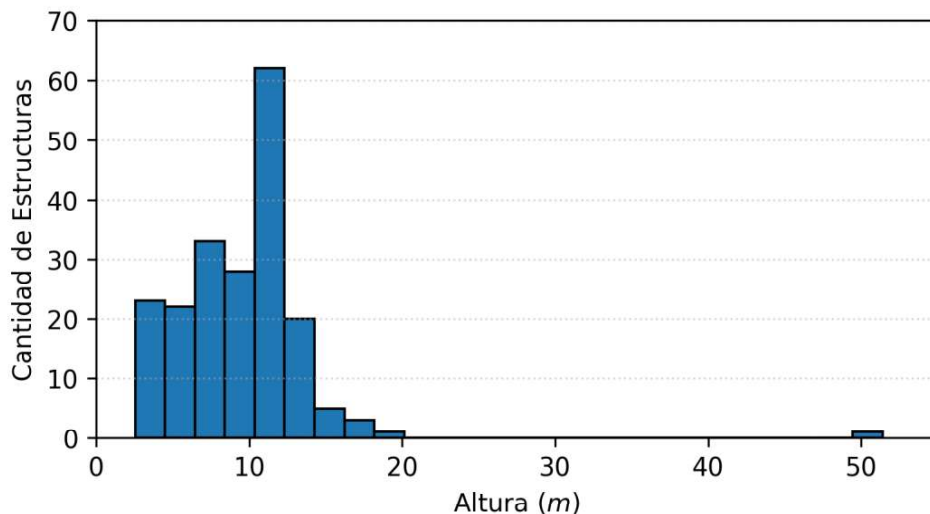


Figura 24 Distribución de la cantidad de estructuras en intervalos de Altura.

En cuanto al parámetro Área, aproximadamente 97 de las 198 estructuras tienen áreas menores a 100 m². Además, unas 82 estructuras poseen áreas entre 100 m² y 300 m². De manera particular, solo 6 estructuras superan los 600 m² en la zona de estudio. La distribución de las estructuras por intervalos de área se presenta en la Figura 25. Respecto al parámetro Volumen, alrededor de 103 de las 198 estructuras tienen volúmenes menores a 1,000 m³. Asimismo, unas 78 estructuras presentan volúmenes entre 1,000 m³ y 3,000 m³.

Como casos particulares, solo hay 4 estructuras con volúmenes superiores a 10,000 m³ en la zona de estudio. La distribución de las estructuras por intervalos de volumen se muestra en

la Figura 26. Aunque la altura influye en el cálculo del volumen, se observa una mayor similitud entre la distribución de los histogramas de área y volumen.

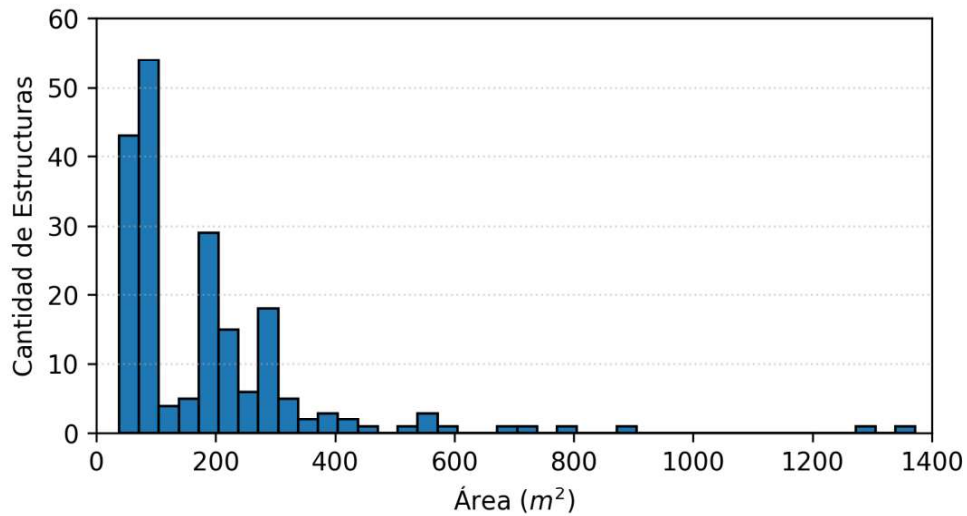


Figura 25 Distribución de la cantidad de estructuras en intervalos de Área.

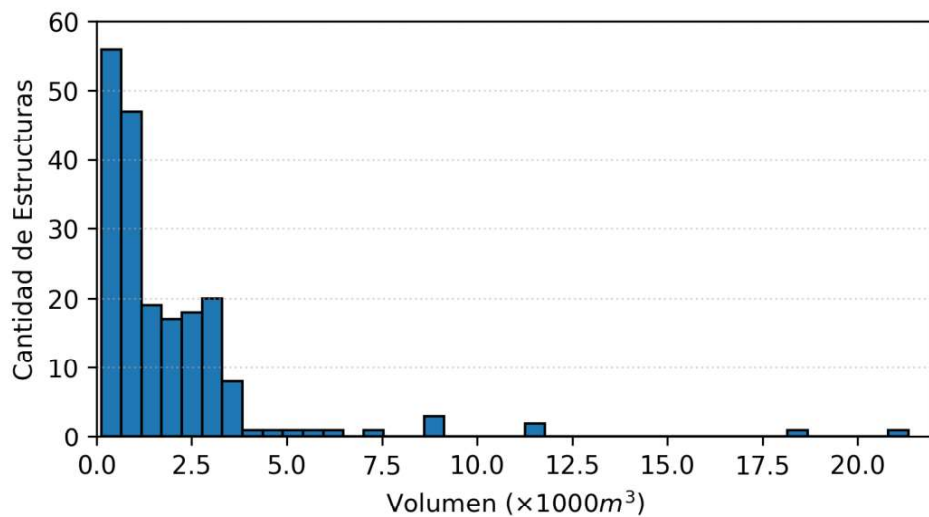


Figura 26 Distribución de la cantidad de estructuras en intervalos de Volumen.

6.2. Recomendaciones para el modelamiento estructural

De acuerdo con los resultados del análisis estadístico de la zona de estudio mostrados en el capítulo 6, los sistemas estructurales con las que fueron construidas las estructuras son de albañilería confinada, concreto armado y acero estructural con 76.8%, 22.2 % y 0.5%, respectivamente. Dado el alto porcentaje de estructuras construidas con sistema estructural de albañilería confinada, se realizó una comparación de las respuestas sísmicas obtenidas de un muro de albañilería, utilizando dos programas ampliamente conocidos en ingeniería estructural: STERA 3D (T. Saito, 2023) y ETABS (CSI, 2016). La geometría del muro y otras propiedades que definen su comportamiento se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8 Propiedades geométricas y del comportamiento inelástico del muro de albañilería.

Propiedad	Valor
Largo [m]	2.60
Altura [m]	2.35
Espesor [m]	0.12
Resistencia máxima [kN]	145
Peso tributario [kN]	200
Tipo de Histéresis en STERA3D	Degrading Tetralinear-model
Tipo de Histéresis en ETABS	Pivot
Rigidez inicial K0 [kN/mm]	83.33
Relación K1/K0 (ver Figura 29a)	0.24
Relación K2/K0 (ver Figura 29a)	0.09
Relación K3/K0 (ver Figura 29a)	-0.07

Para el modelamiento se empleó elementos con el mismo comportamiento estructural obteniéndose un periodo igual a 0.10 segundos en ambos modelos. La Tabla 9 muestra los resultados del análisis dinámico no lineal, considerando un movimiento en la base equivalente al registro sísmico de la estación del Parque de la Reserva, componente EW, correspondiente al sismo de Huaraz de 1970. Se evaluaron tres escenarios sísmicos, escalando este registro de tal manera que la PGA (aceleración máxima del suelo) alcanzara 104.9 cm/s², 209.7 cm/s² y 314.6 cm/s².

Tabla 9 Respuestas obtenidas de un muro de albañilería en el programa STERA 3D y ETABS.

Análisis	PGA	Respuesta del Techo	STERA3D	ETABS	<u>STERA 3D</u> <u>ETABS</u>
1	104.9	Distorsión $\times 10^{-3}$ [mm/mm]	0.30	0.43	0.70
		Desplazamiento [cm]	0.07	0.10	0.70
		Velocidad [cm/s]	4.27	6.20	0.69
		Aceleración absoluta [cm/seg2]	282.2	395.46	0.71
2	209.7	Distorsión $\times 10^{-3}$ [mm/mm]	0.64	0.77	0.83
		Desplazamiento [cm]	0.15	0.18	0.83
		Velocidad [cm/s]	6.98	8.18	0.85
		Aceleración absoluta [cm/seg2]	462.4	472.44	0.98
3	314.6	Distorsión $\times 10^{-3}$ [mm/mm]	1.45	1.23	1.17
		Desplazamiento [cm]	0.34	0.29	1.17
		Velocidad [cm/s]	13.37	11.79	1.13
		Aceleración absoluta [cm/seg2]	555.8	553.26	1.00

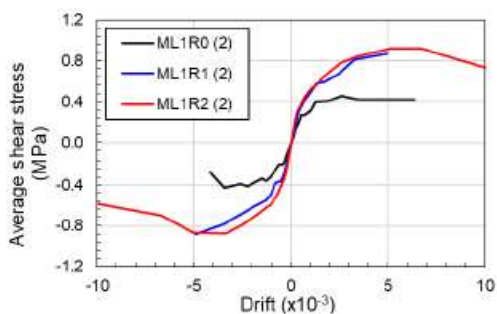
Los resultados indican que, para los valores de PGA de 104.9 cm/s² y 209.7 cm/s², las respuestas obtenidas con el programa ETABS son ligeramente mayores que las generadas por STERA 3D. No obstante, a medida que el PGA aumenta, los resultados de ambos programas se vuelven más comparables. Es importante destacar que, en todos los casos analizados, el muro incursiona en el rango no lineal. Los valores de la respuesta máxima de los modelos y la relación entre las respuestas STERA 3D/ETABS se presentan en la Tabla 9.

En promedio, los resultados obtenidos en ambos programas son similares, y ambos permiten el modelamiento de estructuras de albañilería, concreto y acero. Sin embargo, el programa STERA 3D (T. Saito, 2023), tiende a ofrecer resultados más conservadores y ofrece la opción de ejecutar simulaciones sísmicas por línea de comando, lo que hace posible el análisis de estructuras en simultáneo reduciendo así los tiempos de cómputo. En ese sentido, las siguientes secciones describen el modelamiento inelástico para los sistemas estructurales de albañilería, concreto y acero utilizando STERA 3D.

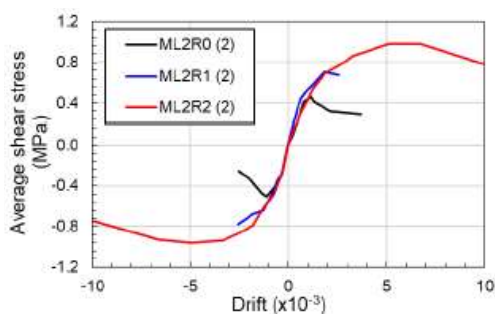
Adicionalmente, en la zona de estudio, se observó que varias estructuras estaban adosadas, separadas únicamente por delgadas juntas de dilatación de entre 2.5 cm y 5.0 cm. Si bien en el Capítulo 4.3 se consideran las estructuras adosadas para estimar el movimiento sísmico a nivel de cimentación, en el análisis inelástico de la estructura se asumirá conservadoramente que las estructuras responden de manera independiente. Esto significa que no se tomará en cuenta el impacto positivo que podría tener la interacción entre las edificaciones adosadas.

6.2.1. Estructuras de Albañilería

Para el modelamiento de estructuras de albañilería confinada es necesario conocer su comportamiento estructural inelástico frente a cargas laterales cíclicas. La Figura 27 muestra el estudio experimental realizado por Diaz et al., (2020) donde muestra el comportamiento estructural de muros de albañilería construidos con ladrillos sólidos artesanales y tubulares, respectivamente. Se puede observar que la albañilería tiene un comportamiento tri-lineal que se degrada (Degrading Tri-Linear) bajo cargas laterales cíclicas.



a) Muros de ladrillos sólidos artesanales.



b) Muros de ladrillos tubulares pandereta.

Figura 27 Curva de capacidad de muros albañilería elaborado por Diaz et al., (2020). La curva de color negro representa el comportamiento del muro sin reforzamiento.

En ese sentido para el modelamiento se debe considerar un elemento con un tipo de histéresis que considere este comportamiento, como el modelo “Degrading Tri-Linear” del

programa STERA 3D. La definición matemática y los parámetros de entrada en el programa de este modelo de histéresis se muestra en la Figura 28 y en la Figura 29, respectivamente. Además, dado que en la zona de estudio existen viviendas de albañilería construidas no solo con ladrillos sólidos y tubulares, sino también con ladrillos industriales como los ladrillos King Kong de 18 huecos, se pueden tomar como referencia estudios como el trabajo realizado por Zavala et al., (2019) para estimar el comportamiento estructural de estas edificaciones.

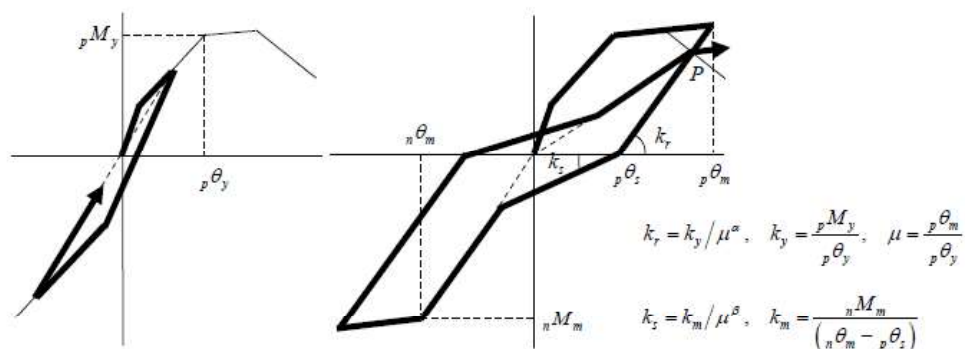
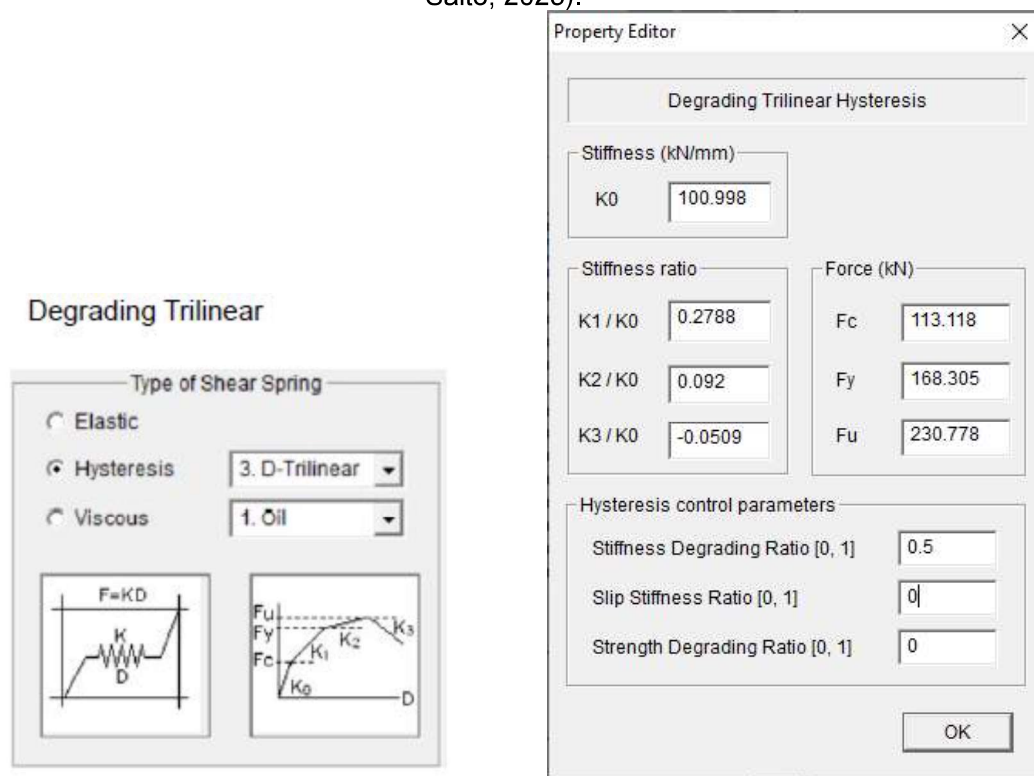


Figura 28 Expresiones matemáticas del Modelo Histeretico Degrading Tri-Linear Model (T. Saito, 2023).



a) Definición de histéresis.

b) Parametros de histéresis.

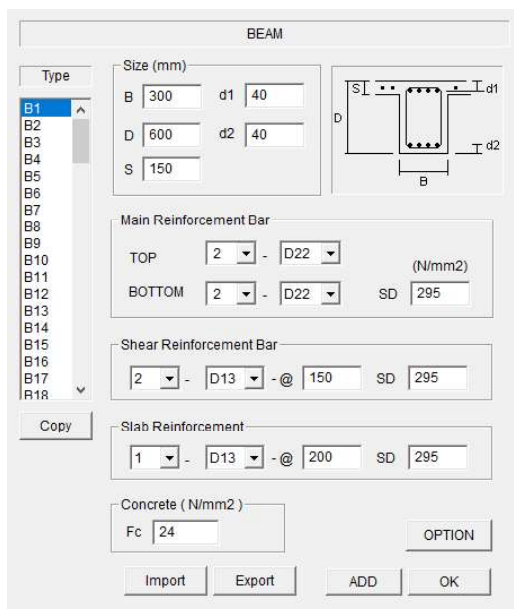
Figura 29 Ingreso de propiedades en el programa STERA 3D del Modelo Histerético “Degrading Tri-Linear” (T. Saito, 2023).

6.2.2. Estructuras de concreto

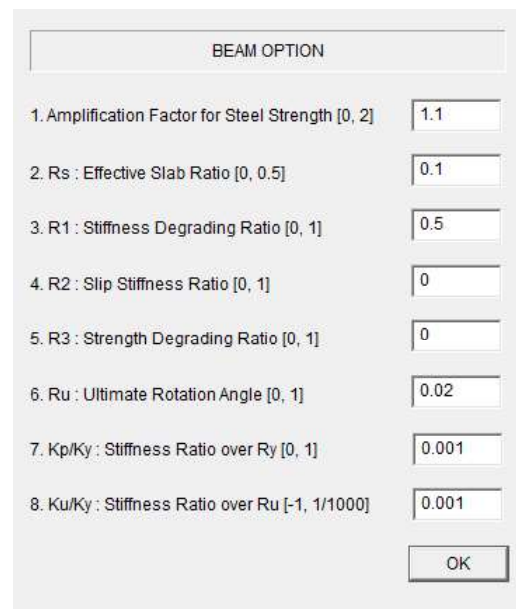
Para el modelamiento de estructuras de concreto es necesario definir los elementos estructurales identificados en las edificaciones de la zona de estudio. Entre los elementos identificados se tienen: vigas, columnas y muros de concreto armado. Las losas identificadas son del tipo aligerado o macizas de concreto armado, las cuales, se consideran como diafragmas rígidos en los modelos.

- Elementos viga

Para la definición de los elementos viga es necesario definir sus características según las inspecciones realizadas en campo y/o los planos disponibles con los que se cuente. Dichas características de las vigas incluyen el ancho (B), el peralte (D), los recubrimientos (d_1 y d_2), el número y los diámetros de las varillas de acero longitudinales, el espaciamiento y el diámetro de los estribos y la resistencia a la compresión del concreto (F_c). En el software de análisis sísmico STERA 3D es posible definir las características mencionadas anteriormente para cada una de las vigas como se puede observar en la Figura 30a. Por otro lado, con el fin de poder estudiar el comportamiento inelástico de los elementos viga, es posible definir en STERA 3D algunos parámetros para considerar este comportamiento durante el análisis sísmico (ver Figura 30b).



(a)



(b)

Figura 30 a) Interfaz para la definición de las características de un elemento viga. b) Interfaz para la definición de parámetros para el comportamiento no lineal de un elemento viga.

Fuente: T. Saito (2023).

Luego de definir las características de las vigas, éstas pueden ser modeladas en STERA 3D. Para el modelamiento de este tipo de elementos se emplea modelos estructurales que representen su comportamiento a flexión y corte. Esto se logra con elementos tipo barra que sus extremos A y B tienen un resorte no lineal de flexión y en la parte central, un resorte no lineal de corte (Ver Figura 31).

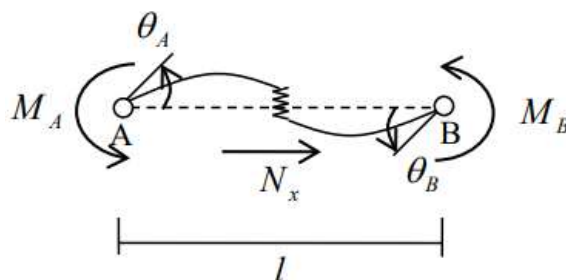


Figura 31 Elemento tipo barra para vigas. Fuente: D. T. Saito (2021).

- Elementos columna

Para la definición de los elementos columna será necesario definir sus características según las inspecciones realizadas en campo y/o los planos disponibles con los que se cuente. Dichas características de las columnas incluyen el ancho (B), el peralte (D), los recubrimientos (d1 y d2), el número y diámetros de las varillas de acero longitudinales, el espaciamiento y el diámetro de los estribos y la resistencia a la compresión del concreto (Fc). En el software de análisis sísmico STERA 3D es posible definir las características mencionadas anteriormente para cada una de las columnas como se puede observar en la Figura 32a. Por otro lado, con el fin de poder estudiar el comportamiento inelástico de los elementos columna, es posible definir en STERA 3D algunos parámetros para considerar este comportamiento durante el análisis sísmico (ver Figura 32b).

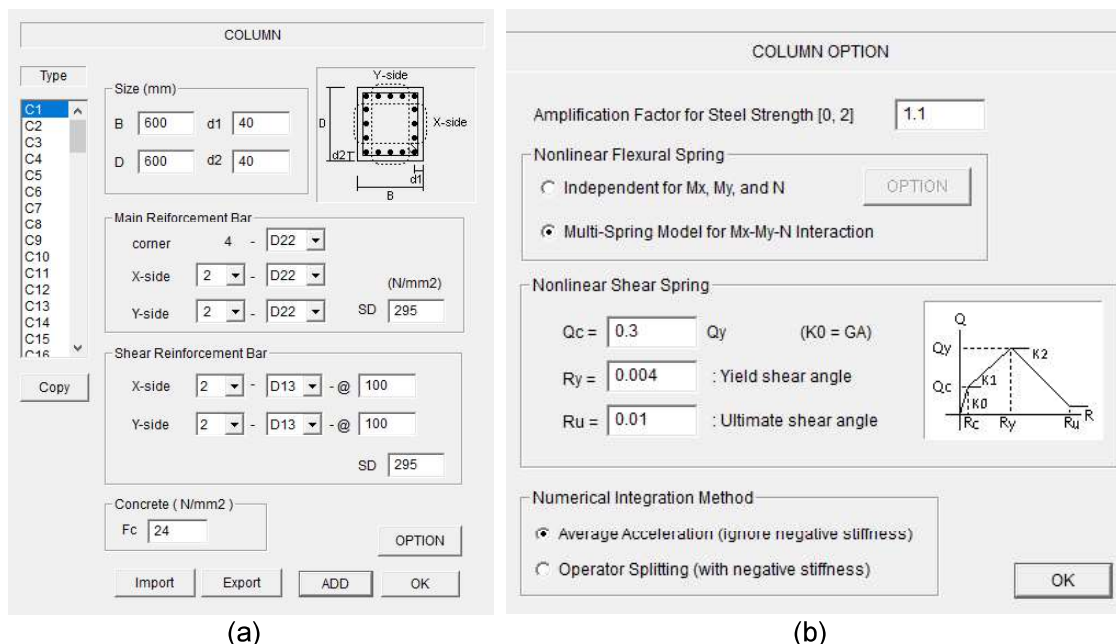


Figura 32 a) Interfaz para la definición de las características de un elemento columna. b) Interfaz para la definición de parámetros para el comportamiento no lineal de un elemento columna. Fuente: T. Saito (2023).

Luego de definir las características de las columnas, éstas pueden ser modeladas en STERA 3D. Para el modelamiento de este tipo de elementos se emplea modelos estructurales que

representen su comportamiento a flexo-compresión, tracción y corte. Esto se logra empleando elementos tipo barra que en sus extremos A y B tienen resortes no lineales de flexión y en su parte central tiene dos resortes de corte en las direcciones X e Y (Ver Figura 33).

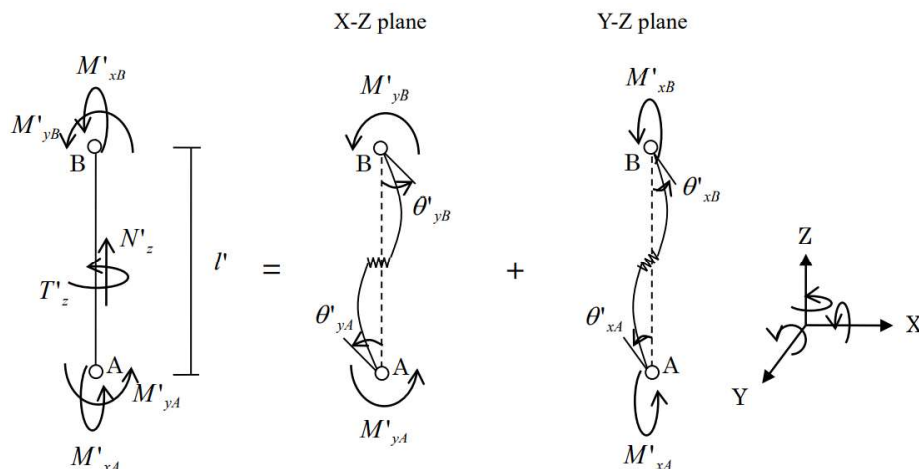


Figura 33 Elemento tipo barra para columnas. Fuente: (D. T. Saito, 2021)

Además, este tipo de elementos cuenta con cinco resortes verticales de concreto y cuatro resortes verticales de acero. En la Figura 34 se puede observar la sección de un elemento tipo columna, en el cual se pueden observar los resortes verticales mencionados.

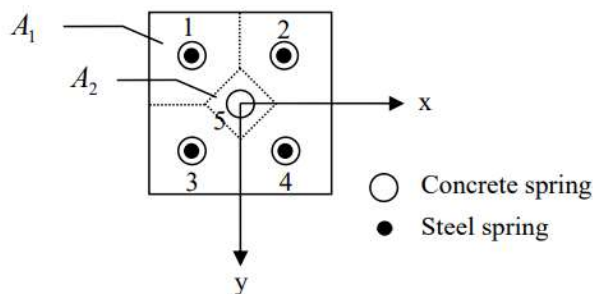
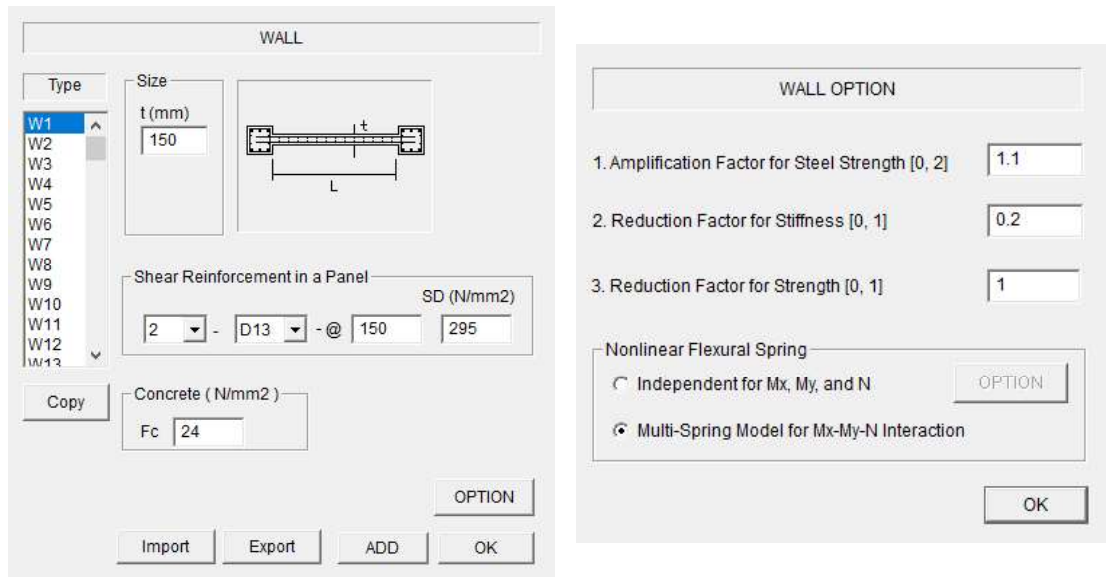


Figura 34 Representación gráfica de los resortes verticales de un elemento columna. Fuente: (D. T. Saito, 2021)

- Elementos muro

Para la definición de los elementos columna es necesario definir sus características según las inspecciones realizadas en campo y/o los planos disponibles con los que se cuente. Dichas características de los muros incluyen el espesor (t), la longitud, el espaciamiento y el diámetro de los refuerzos de corte y la resistencia a la compresión del concreto (F_c). En el software de análisis sísmico STERA 3D es posible definir las características mencionadas anteriormente para cada uno de los muros como se puede observar en la Figura 35a. Por otro lado, con el fin de poder estudiar el comportamiento inelástico de los elementos muro, es posible definir en STERA 3D algunos parámetros para considerar este comportamiento durante el análisis sísmico (ver Figura 35b).



(a) (b)
 Figura 35 a) Interfaz para la definición de las características de un elemento muro. b) Interfaz para la definición de parámetros para el comportamiento no lineal de un elemento muro. Fuente: T. Saito (2023).

Luego de definir las características de los muros, éstos pueden ser modelados en STERA 3D. Para el modelamiento de este tipo de elementos se emplea modelos estructurales que representen su comportamiento a flexo-compresión, tracción y principalmente, de corte. Esto se logra empleando un elemento barra en la zona central del muro y dos elementos columna en sus extremos. Por lo tanto, un elemento muro estará definido por un total de seis resortes de flexión no lineales y tres resortes de corte no lineal (Ver Figura 36).

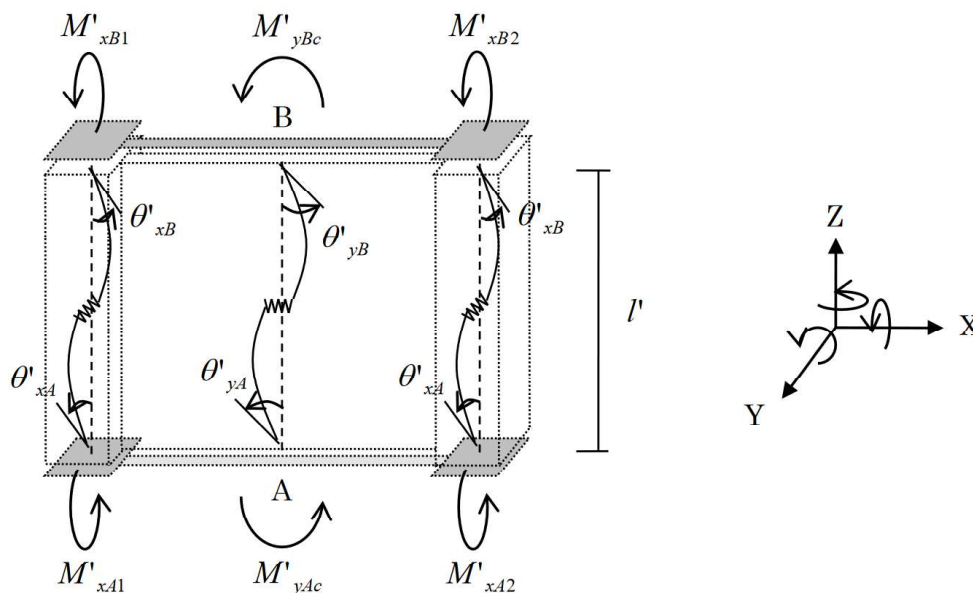


Figura 36 Modelo de un elemento muro. Fuente: (D. T. Saito, 2021)

Además, los elementos de los muros cuentan con quince resortes verticales de concreto y trece resortes verticales de acero. En la Figura 39 se puede observar la sección de un elemento tipo muro, en el cual se pueden observar los resortes verticales mencionados.

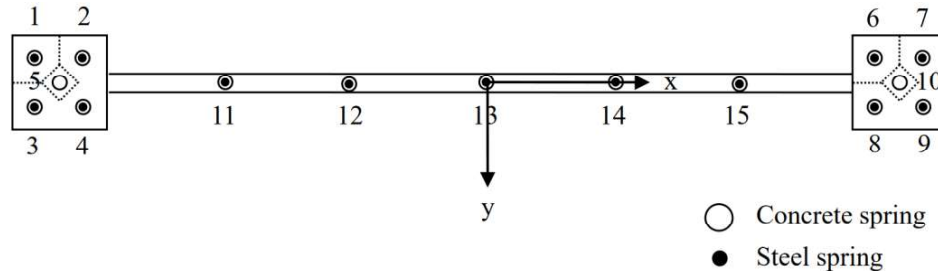


Figura 37 Representación gráfica de los resortes verticales de un elemento muro. Fuente: (D. T. Saito, 2021)

- Comportamiento no lineal de resortes

El comportamiento dinámico no lineal de los resortes no lineales de flexión se describirá por el modelo histérico tri-lineal que se muestra en la Figura 38.

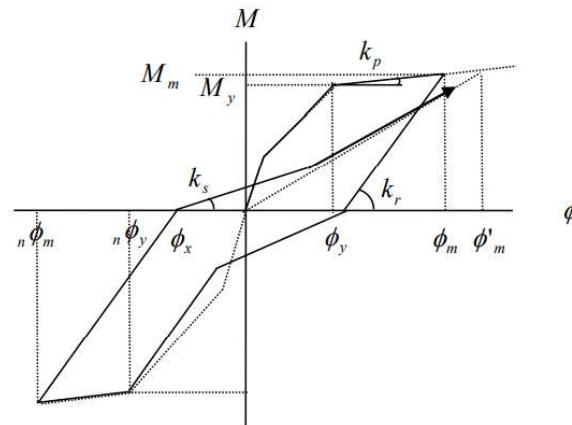


Figura 38 Modelo tri-lineal para los resortes de flexión. Fuente: (D. T. Saito, 2021)

Para el caso del resorte no lineal de corte se define un comportamiento no lineal que se muestra en Figura 39.

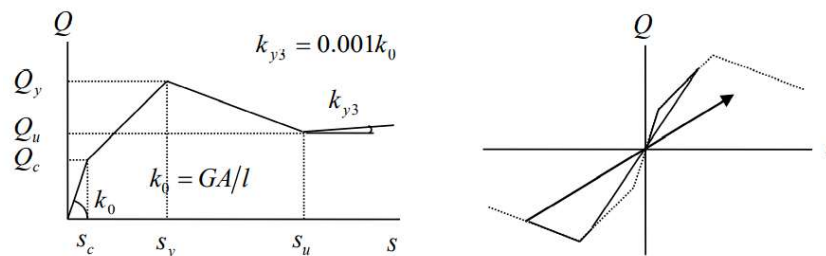


Figura 39 Modelo no lineal para el resorte de corte. Fuente: (D. T. Saito, 2021)

En Figura 40a se puede observar el comportamiento no lineal de tracción-compresión de un resorte vertical de acero. Además, en la Figura 40b se muestra el comportamiento no lineal de compresión de un resorte vertical de concreto, en esta figura se puede observar que este resorte no presenta resistencia de tensión.

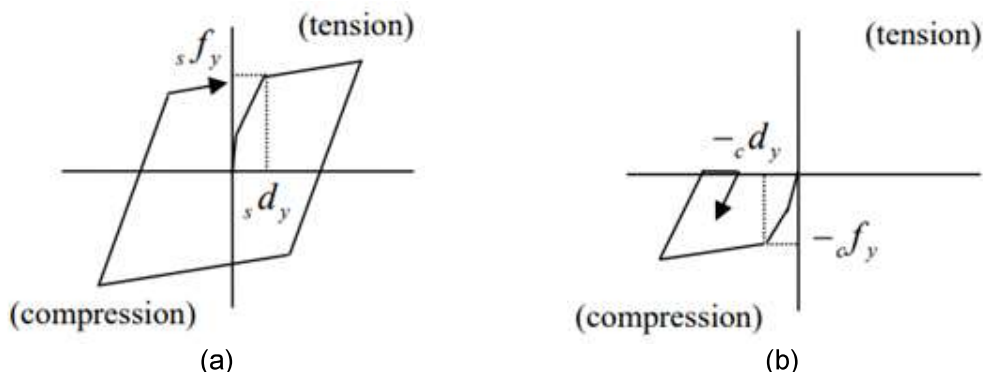


Figura 40 a) Comportamiento no lineal de un resorte vertical de acero. b) Comportamiento no lineal de un resorte vertical de concreto. Fuente: (D. T. Saito, 2021)

6.2.3. Estructuras de Acero

Para el modelamiento de estructuras de acero se emplea las secciones viga y columna del programa STERA3D cuya definición matemática de su comportamiento estructural e ingreso de valores se muestran a continuación.

- Elementos viga

El modelo de histéresis de las secciones del elemento viga es asumida como bilineal y está definido por su relación momento – curvatura. La Figura 41 muestra la definición de la histéresis del elemento viga de acero del programa STERA3D. Mientras que Figura 42 muestra el ingreso de las propiedades en el programa (T. Saito, 2023).

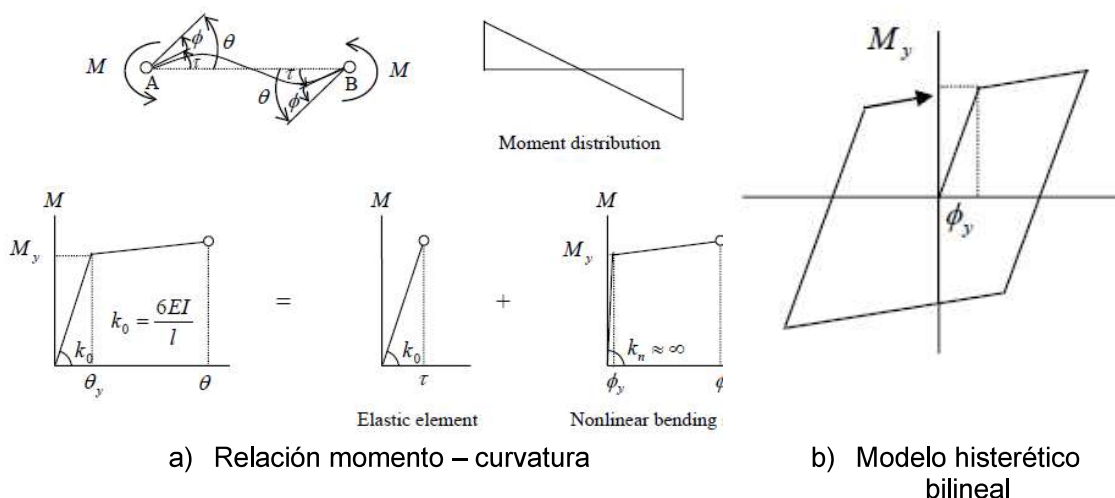
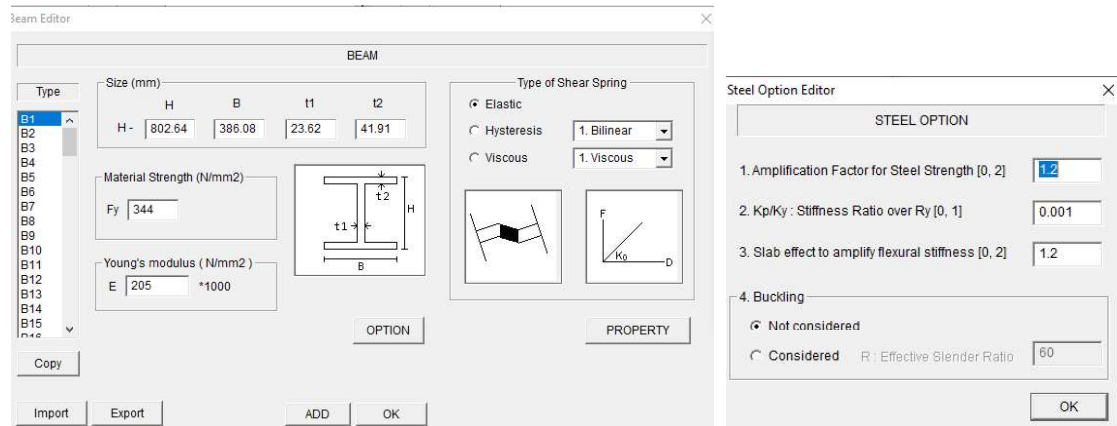


Figura 41 Expresiones matemáticas del Modelo de histéresis de la viga de acero (T. Saito, 2023).



a) Propiedades de la sección. b) Parametros de histéresis.
Figura 42 Ingreso de propiedades en el programa STERA3D del Modelo de histéresis de la viga de acero (T. Saito, 2023).

- Elementos columna

El modelo de histéresis de las secciones del elemento columna es asumida como bilineal y está definido por su relación momento – curvatura. La Figura 43 y Figura 44 muestra las expresiones matemáticas de modelo de histéresis de la columna de acero del programa STERA3D. Mientras que Figura 45 muestra el ingreso de las propiedades en el programa (T. Saito, 2023). En el caso de las columnas para considerar los efectos de carga axial y momentos biaxiales el programa considera un análisis de fibras en el modelo de histéresis de la sección columna.

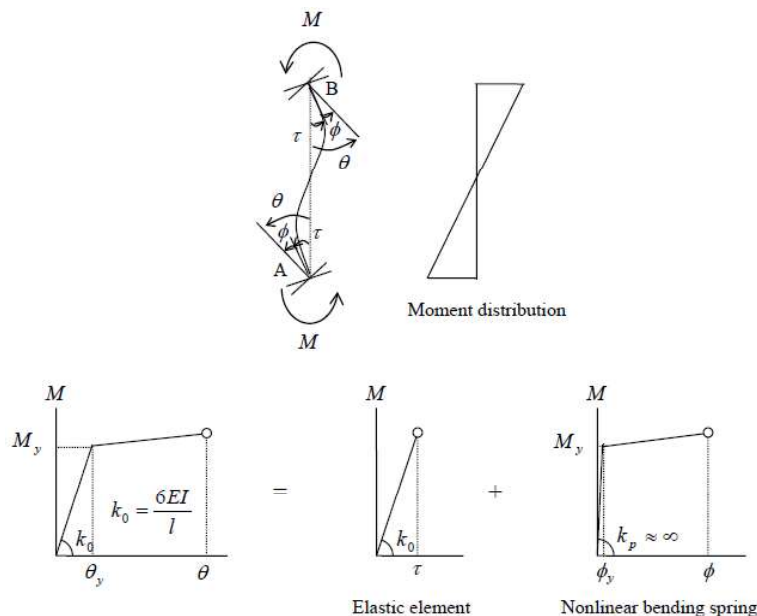


Figura 43 Expresiones matemáticas del momento - curvatura de la columna de acero (T. Saito, 2023).

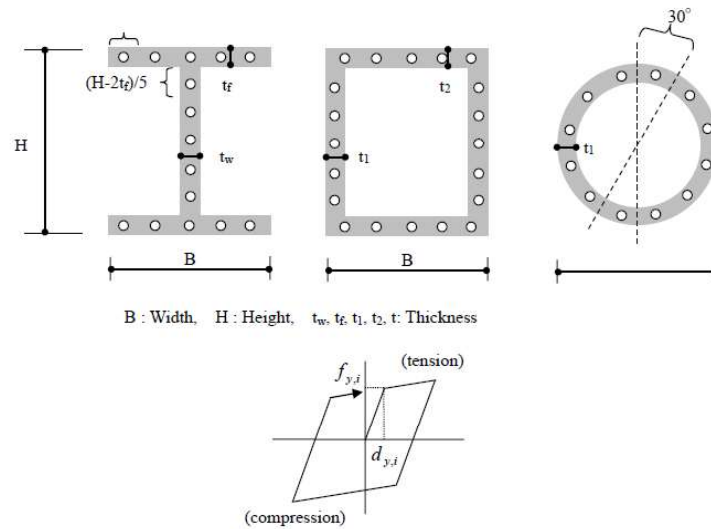
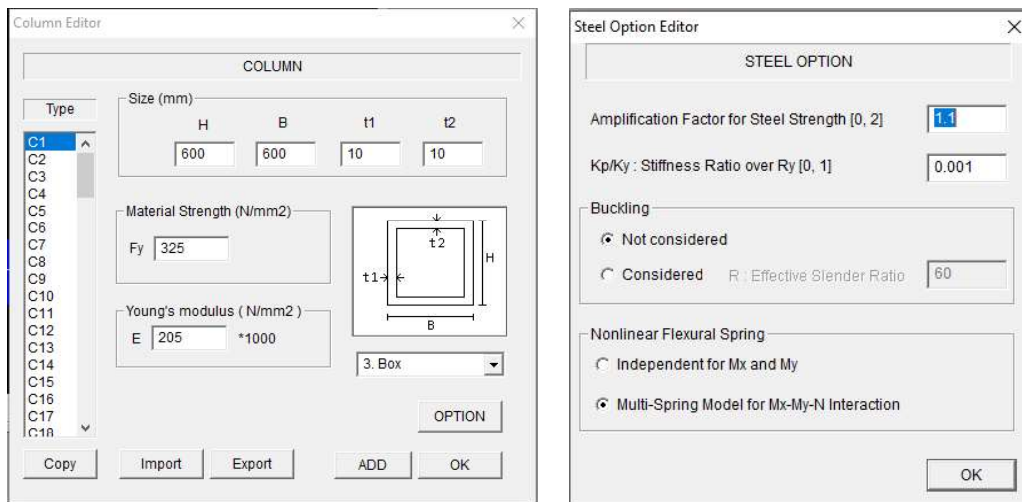


Figura 44 Expresiones matemáticas del modelo de histéresis bilineal de la columna de acero (T. Saito, 2023).



a) Propiedades de la sección y tipo de histéresis. b) Parametros de histéresis.

Figura 45 Ingreso de propiedades en el programa STERA3D del Modelo de histéresis de la columna de acero (T. Saito, 2023).

7. COMPUTACIÓN EN PARALELO PARA EL ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS

Con el objetivo de resumir el proceso para estimar la respuesta sísmica de las estructuras mediante simulaciones numéricas tridimensionales, la Figura 46 presenta el procedimiento a seguir propuesto por Palacios (2024). En la primera etapa, se genera el modelo numérico tridimensional utilizando el modelo digital de elevación, el inventario de estructuras, el modelo 3D de velocidades y la caracterización geotécnica. Este proceso de generación del modelo tridimensional sigue el procedimiento descrito en el Capítulo 4 del presente servicio. Posteriormente, se emplean técnicas de computación de alto rendimiento para analizar la propagación de ondas sísmicas en un escenario sísmico, obteniendo así la respuesta sísmica en la superficie o en el nivel de cimentación de las estructuras.

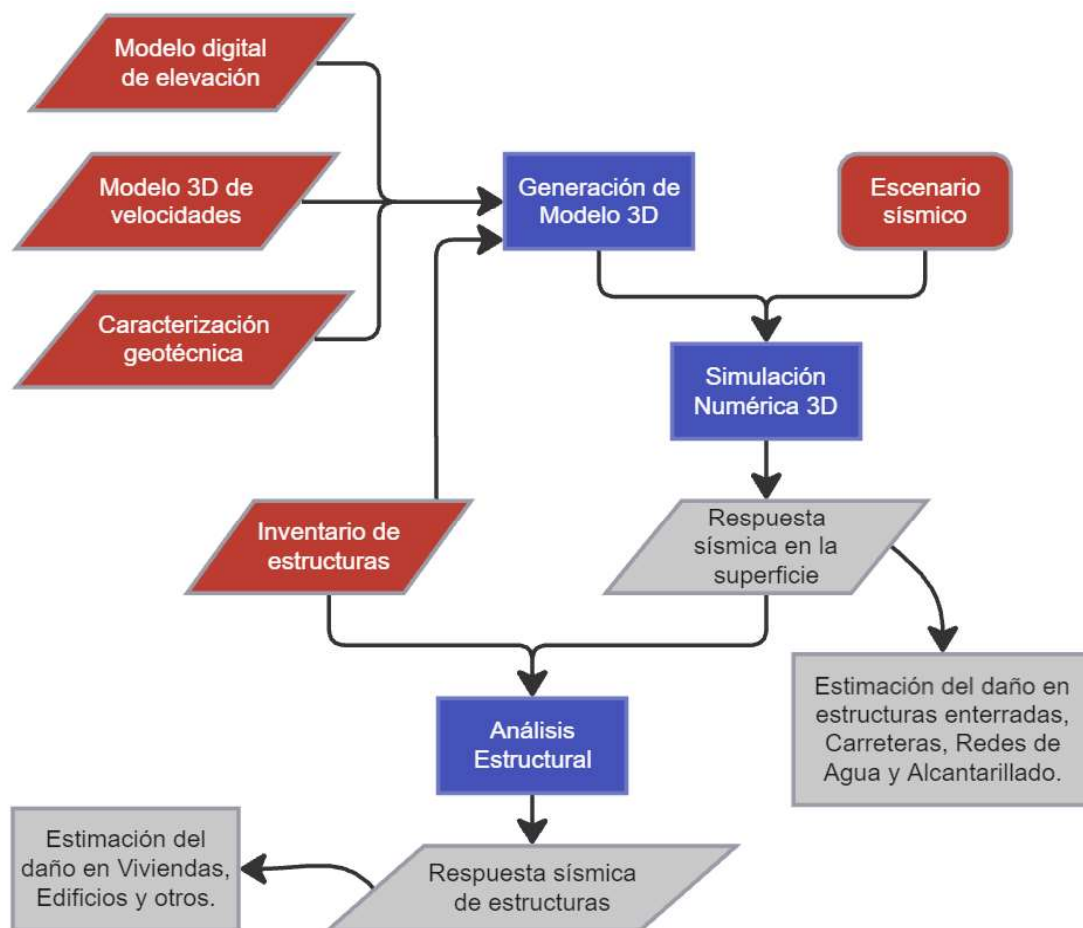


Figura 46 Metodología para la estimación de la respuesta sísmica empleando simulaciones numéricas tridimensionales (Palacios, 2024).

En la segunda etapa, para el análisis de estructuras a escala urbana es fundamental analizar de manera eficiente la respuesta sísmica de las estructuras a partir de los registros obtenidos a nivel de cimentación. Para optimizar el análisis inelástico de la respuesta estructural, se propone utilizar un software que permita ejecutar simulaciones en paralelo. En este sentido, el programa Stera3D cumple con este requisito, ya que puede ejecutarse desde líneas de comando (T. Saito, 2023).

7.1. Propuesta de procedimiento para el análisis estructural

Dado que las características estructurales son heterogéneas y es difícil predecir qué estructuras desarrollarán un comportamiento no lineal durante un evento sísmico, resulta imprescindible implementar un sistema para analizar eficientemente estructuras en paralelo. Este sistema debe contar con una distribución dinámica y eficiente de la carga computacional, adaptándose a las demandas específicas de cada análisis. Debido a esta heterogeneidad, es crucial paralelizar el proceso de análisis de tal manera que se mantenga la robustez y portabilidad del sistema en distintas plataformas de cómputo.

En este trabajo, se asume la realización de cientos de análisis inelásticos simultáneamente, utilizando una infraestructura de cómputo distribuido compuesta por docenas de núcleos de procesamiento. Para abordar este desafío, proponemos un método de análisis robusto y escalable basado en el enfoque de "computación de capacidad", en el cual múltiples análisis estructurales se ejecutan en paralelo para maximizar la eficiencia computacional. Este enfoque permite que el sistema mantenga la escalabilidad incluso cuando el número de simulaciones aumenta considerablemente.

Adicionalmente, proponemos la implementación de un modelo "maestro-esclavo" para garantizar un equilibrio dinámico de la carga computacional entre los procesos. En este modelo, un proceso maestro coordina las tareas y distribuye el trabajo a los procesos esclavos, quienes ejecutan las simulaciones de forma independiente. Esta arquitectura no solo permite un uso eficiente de los recursos de cómputo, sino que también minimiza los tiempos de espera.

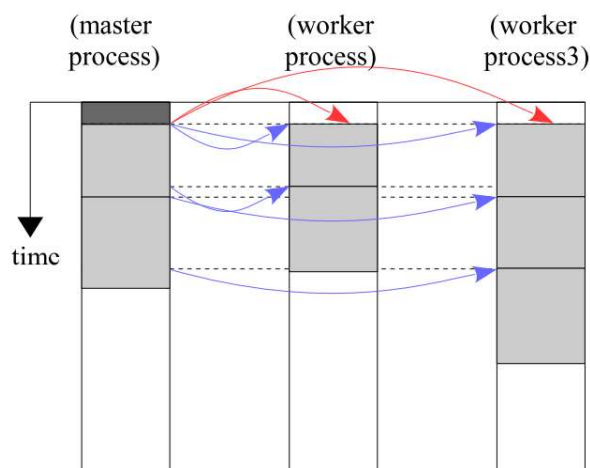


Figura 47 Modelo "maestro-esclavo" según Agata et al. (2016). Se observa que el proceso maestro asigna el trabajo de cómputo a los procesos esclavos tan pronto como estos completan un análisis.

El modelo "maestro-esclavo" propuesto garantiza tanto la robustez como la portabilidad del sistema, permitiendo que el análisis estructural sea adaptable a diferentes infraestructuras de cómputo, desde computadoras personales hasta servicios computación en la nube de alto rendimiento. Con este enfoque, es posible llevar a cabo análisis inelásticos complejos en un tiempo razonable, cumpliendo con las exigencias de simulaciones a gran escala en escenarios sísmicos.

A continuación, se propone un procedimiento para el análisis eficiente de estructuras a escala urbana:

- 1) Crear modelos estructurales con propiedades inelásticas para todo el inventario de estructuras.
- 2) Generar directorios específicos para cada modelo estructural, donde se llevará a cabo el análisis sísmico.
- 3) Almacenar en cada directorio los registros sísmicos obtenidos durante la primera etapa de simulación numérica 3D (ver Figura 46).
- 4) Utilizar un sistema de ejecución de tareas en paralelo para calcular la respuesta sísmica de cada estructura.

7.2. Estimación del tiempo de cómputo y almacenamiento requerido

En esta sección se estima el tiempo de cómputo y el espacio de almacenamiento necesario para el análisis eficiente de estructuras en la zona de estudio. Para ello, se toma como referencia la Tabla 10 recopilada por (Palacios, 2024), donde se detalla el costo por hora de diferentes computadoras de AWS (Amazon Web Services).

Tabla 10 Costo por hora de diferentes computadoras en dólares, obtenidos del sitio oficial de AWS (<https://calculator.aws>) actualizado al mes de abril de 2024.

Computadora sugerida de AWS	Memoria RAM (GB)	#CPUs	Costo por Hora (\$)
c7i.16xlarge	128	64	2.86
r7i.16xlarge	512	64	4.23
hpc6id.32xlarge	1,024	64	5.70
x2idn.32xlarge	2,048	128	13.3
x2iedn.32xlarge	4,096	128	26.7

Asumiendo conservadoramente que el análisis de cada estructura toma un tiempo promedio de t_1 , podemos estimar el tiempo de cómputo mediante la siguiente fórmula:

$$t_{tot} = \frac{n_{est}}{n_{pp}} * t_1$$

Donde:

- t_{tot} es el tiempo total del análisis de todas las estructuras.
- t_1 es el tiempo promedio que demora el análisis de una estructura.
- n_{est} es el número de estructuras por analizar.
- n_{pp} es el número de procesos en paralelo que se puede ejecutar en la computadora.

Para la zona de estudio, que abarca aproximadamente $n_{est} = 200$ estructuras en un área de 0.13 km² de San Borja, y asumiendo un tiempo promedio de análisis de $t_1 = 5min$ por estructura, utilizando la computadora c7i.16xlarge con $n_{pp} = 64$ procesos de CPU (ver Tabla 10), el tiempo total de cómputo se estima en:

$$t_{tot} = \frac{200}{64} * 5min \approx 16min$$

Para el espacio de almacenamiento, se estima que cada análisis genere aproximadamente 40 MB de datos, considerando que se guarda la respuesta sísmica de tres grados de libertad (traslaciones horizontales y rotación en el eje vertical) para cada piso de las estructuras, con 24,000 pasos de tiempo (equivalente a 2 minutos de registro con una frecuencia de muestreo de 200 Hz). En total, se requerirían alrededor de 8 GB para almacenar los archivos de entrada y salida.

En el caso de un área urbana más extensa, donde puede existir alrededor de $n_{est} = 1600$ estructuras en un área de 1 km², manteniendo los mismos supuestos de $t_1 = 5min$ y considerando la computadora c7i.16xlarge con $n_{pp} = 64$ procesos de CPU (ver Tabla 10). El tiempo total de cómputo se estima en:

$$t_{tot} = \frac{1600}{64} * 5min \approx 2horas y 5min$$

En cuanto al espacio de almacenamiento, se estiman unos 64 GB para guardar los datos de entrada y salida correspondientes a la respuesta sísmica de las estructuras en un área urbana más extensa.

CONCLUSIONES

- En este servicio, se recopiló y digitalizó información sobre las estructuras de edificios en la zona aledaña a la sede central de SENCICO, con el objetivo de proporcionar los insumos necesarios para la generación de un modelo numérico tridimensional.
- Se llevó a cabo el levantamiento fotogramétrico mediante dos vuelos planificados con un vehículo aéreo no tripulado, equipado con una cámara de alta precisión. Se procesaron los datos recopilados junto con los puntos de control para crear un modelo digital de elevación de alta calidad con georreferenciación precisa.
- Se generó el modelo digital de elevación, que comprende tanto el modelo digital de superficie (DSM) como el modelo digital del terreno (DTM) mediante la calibración de imágenes aéreas y un modelo de puntos en 3D. Los archivos del DSM y DTM se entregaron en los formatos requeridos. Además, se describió el procedimiento para utilizar el modelo digital de elevación y los productos del levantamiento fotogramétrico en la elaboración del modelo numérico tridimensional de elementos finitos.
- Se digitalizaron 198 estructuras dentro de la zona de estudio, elaborando el footprint correspondiente para cada una. Este proceso permitió identificar patrones de distribución y geometría en planta, diferenciando áreas de alta densidad, como la manzana A, con 64 edificaciones por hectárea, de zonas con menor densidad, como las manzanas B, C y D, que cuentan con entre 11 y 14 estructuras por hectárea.
- Se recopilaron las características de 198 estructuras en la zona de estudio mediante trabajos de campo y se realizó un análisis estadístico de la información recopilada. Los principales datos estadísticos revelan que el 71.2% de las estructuras se destinan a vivienda, predominando el uso de albañilería como material de construcción en el 74.7% de los casos.
- Se realizaron recomendaciones para el modelamiento inelástico de las estructuras en la zona de estudio, considerando los diferentes tipos de sistemas estructurales identificados: albañilería, concreto y acero. Asimismo, se compararon los resultados de la respuesta sísmica obtenidos de dos programas de análisis estructural, recomendando el uso del programa que proporciona resultados más conservadores.
- Se propuso un procedimiento para el análisis eficiente de la respuesta sísmica de estructuras a escala urbana, que incluye la generación de modelos estructurales inelásticos y la utilización de técnicas de computación en paralelo. Además, se estimaron valores referenciales del tiempo de cómputo y del espacio de almacenamiento necesarios para llevar a cabo estos análisis.

DESCARGO DE RESPONSABILIDAD

El servicio de "Recopilación y Digitalización de Información de Estructuras de Edificios en Zona Aledaña a la Sede Central de SENCICO para el Modelamiento 3D" se ha llevado a cabo en base a la inspección visual y experiencia en ingeniería estructural. La información recopilada sobre el sistema estructural, la delimitación de las plantas, los materiales de construcción, el área construida en planta, el volumen, entre otros parámetros es para obtener una estimación global de la respuesta de las estructuras en la zona estudio. Por lo tanto, los datos obtenidos deben considerarse como referencias preliminares o estimaciones iniciales, recomendándose la realización de evaluaciones más detalladas para obtener una estimación precisa de la respuesta sísmica.

REFERENCIAS

- Agata, R., Ichimura, T., Hirahara, K., Hyodo, M., Hori, T., & Hori, M. (2016). Robust and portable capacity computing method for many finite element analyses of a high-fidelity crustal structure model aimed for coseismic slip estimation. *Computers & Geosciences*, 94, 121–130. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.05.015>
- Alva Hurtado, J. E. D., & Ortiz Salas, C. E. (2020). Updating the Occurrence of the Soil Liquefaction Phenomenon in Peru. *TECNIA*, 30(2), 6–17. <https://doi.org/10.21754/tecnia.v30i2.756>
- CSI. (2016). *ETABS* [Software]. Computers and Structures, Inc.
- Diaz, M., Zavala, C., & Flores, E. (2020, del al 18 de setiembre). *Structural Assessment of Confined Masonry Retrofitting Under Multi-Seismic Scenarios in Metropolitan Lima Area [Presentación de artículo]*. The 17th World Conference on Earthquake Engineering, Sendai, Japan.
- Ichimura, T., Fujita, K., Koyama, K., Kusakabe, R., Kikuchi, Y., Hori, T., Hori, M., Maddeggedara, L., Ohi, N., Nishiki, T., Inoue, H., Minami, K., Nishizawa, S., Tsuji, M., & Ueda, N. (2022). 152K-computer-node parallel scalable implicit solver for dynamic nonlinear earthquake simulation. *International Conference on High Performance Computing in Asia-Pacific Region*, 18–29. <https://doi.org/10.1145/3492805.3492814>
- Isbilibiroglu, Y., Taborda, R., & Bielak, J. (2015). Coupled Soil-Structure Interaction Effects of Building Clusters during Earthquakes. *Earthquake Spectra*, 31(1), 463–500. <https://doi.org/10.1193/102412EQS315M>
- Matsuzaki, S., Pulido, N., Maruyama, Y., Estrada, M., Zavala, C., Yamazaki, F., Graduate School of Engineering, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522, Japan, & Japan-Peru Center for Earthquake Engineering Research and Disaster Mitigation, National University of Engineering, Lima, Peru. (2014). Evaluation of Seismic Vulnerability of Buildings Based on Damage Survey Data from the 2007 Pisco, Peru Earthquake. *Journal of Disaster Research*, 9(6), 1050–1058. <https://doi.org/10.20965/jdr.2014.p1050>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento del Perú. (2018). *Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente del RNE*.
- Palacios, J. (2024). *Recolección y sistematización de información referida a metodologías de simulación numérica tridimensional de propagación de ondas sísmicas a escala urbana*.
- Pretell, R., & Aguilar, Z. (2016). *DYNAMIC ASSESSMENT OF THE COSTA VERDE CLIFFS IN LIMA*.
- Saito, D. T. (2021). *Structural Earthquake Response Analysis 3D - Technical Manual Version 7.0*.
- Saito, T. (2023). *STERA 3D. STructural Earthquake Response Analysis 3D. User Manual. 2023*.

- Taborda, R., & Bielak, J. (2011). *Full 3D integration of site-city effects in regional scale earthquake simulations*.
- Villegas, J. C., Chlieh, M., Cavalié, O., Tavera, H., Baby, P., Chire-Chira, J., & Nocquet, J.-M. (2016). Active tectonics of Peru: Heterogeneous interseismic coupling along the Nazca megathrust, rigid motion of the Peruvian Sliver, and Subandean shortening accommodation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(10), 7371–7394. <https://doi.org/10.1002/2016JB013080>
- Zavala, C., Diaz, M., Flores, E., & Cardenas, L. (2019). Damage limit states for confined masonry walls based on experimental test. *TECNIA*, 29(2). <https://doi.org/10.21754/tecnia.v29i2.715>