UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA

Entidades participantes:

Facultad de Arquitectura

Instituto de Investigaciones Históricas

FES Aragón

Implementación de nubes de puntos en la inspección y análisis energético de envolventes arquitectónicas conforme a la NOM-008-ENER-2001

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE

MAESTRO EN ARQUITECTURA

PRESENTA:

Arq. Jorge Alberto Bobadilla Contreras

TUTOR/A PRINCIPAL

Dr. Ronan Bolaños Linares

Facultad de Arquitectura, Laboratorio de Arquitectura + Diseño y Tecnología, UNAM

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR

Mtro. Alejandro Marambio Castillo

Facultad de Arquitectura, Centro de Investigaciones y Estudios de Posgrado, UNAM

Dr. Sergio Quezada García

Facultad de Ingeniería de la UNAM, Departamento de Sistemas Energéticos

Dr. David Morillón Gálvez

Instituto de Ingeniería de la UNAM

Dr. José Diego Morales Ramírez

Facultad de Arquitectura, UNAM

Ciudad Universitaria, CD. MX. 2024

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco ampliamente a mis profesores de la maestría, tutor, cotutores y sinodales por brindarme sus conocimientos y apoyo para generar el presente proyecto de investigación. Al laboratorio de Arquitectura + Diseño y Tecnología Experimental por facilitarme los equipos y asesorías técnicas indispensables en la generación del documento de tesis.

Igualmente agradezco al CONAHCYT por el apoyo económico otorgado por la duración de los estudios de la maestría.

Este documento se lo dedico a mis padres Pascual Bobadilla y Noemi Contreras por todo el apoyo, amor y compresión que me brindaron para alcanzar esta meta. Agradezco a mi hermana Amanda por darme ánimos a lo largo de esta trayectoria. A Daniela, te agradezco toda la paciencia, ánimos y apoyo que me brindaste para alcanzar este logro. Yo sin ustedes no habría podido solo, siempre se los agradeceré.

Investigación realizada gracias al Programa UNAM-PAPIIT IT400424 Laboratorio de arquitectura, diseño y tecnología experimental.

Contenido

INTRODUCCIÓN 5

1.0 NORMA MEXICANA PARA EL ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN ENVOLVENTES NOM-008-ENER-2001 8

Antecedentes 8

Características generales de la NOM-008-ENER-2001 12

Metodología de calculo 14

Retos existentes en la implementación de la norma 19

Flujo de trabajo de la NOM-008-ENER-2001 23

2.0 LAS NUBES DE PUNTOS COMO TECNOLOGÍA ALTERNATIVA A LAS TÉCNICAS DE MEDICIÓN 29

Flujo de trabajo para el procesamiento de las nubes de puntos 34

Adquisición 34

Limpieza de la información 41

Registro de la información 43

Segmentación de la información 44

Reconocimiento de objetos 47

Algoritmos de implementación específica 50

Las nubes de puntos frente a metodologías de medición convencionales. 57

3.0 NUBES DE PUNTOS EN LA INSPECCIÓN Y ANÁLISIS DE LAS ENVOLVENTES DE LOS EDIFICIOS 60

Descripción de propuesta metodológica 60

Implementación especifica de nubes de puntos 61

a) Adquisición de datos 65

Metodología de adquisición de datos 65

Adquisición de datos para procesamiento fotogramétrico 70

b) Procesamiento fotogramétrico de nubes de puntos 79

Importación 79

Alineación 80

Generación de nube densa 84

Filtrado y exportación 85

c) Extracción de superficies opacas y transparentes 87

Grasshopper y programación visual 87
Estructura de algoritmo 89
Parámetros para operación de algoritmo 97

d) Aplicación de datos en el cálculo de la eficiencia energética de acuerdo con la NOM-008-ENER-2001 98

Proceso actual para el cálculo de la NOM 98
Internalización del cálculo en programación visual 99

4.0 IMPLEMENTACIÓN METODOLOGICA EN CASOS DE ESTUDIO 102

Casos de estudio 103

Criterios de selección 103
Análisis de características 104

Implementación de metodología convencional 106

Obtención de superficies opacas y transparentes de fachada 106
Cálculo de la eficiencia energética a partir de superficies obtenidas ... 107
Estimación de tiempo de trabajo 108

Implementación de metodología propuesta a partir del uso de tecnología de nubes de puntos 109

Obtención de superficies opacas y transparentes de fachada 109
Cálculo de la eficiencia energética a partir de superficies obtenidas ... 115
Estimación de tiempo de trabajo 116

5.0 COMPARACIÓN METODOLÓGICA 118

Análisis de la precisión de las nubes de puntos 118

Comparación de superficies obtenidas con metodología propuesta y convencional 120

Impacto de la metodología en la ganancia energética calculada por la NOM-008-ENER-2001 124

Impacto de la metodología en los tiempos de trabajo 127

6.0 CONCLUSIONES 131

7.0 REFERENCIAS 136

Bibliografía consultada 142

8.0 ANEXO A 144

INTRODUCCIÓN

La eficiencia energética en las edificaciones ha sido un tema ampliamente abordado a nivel mundial a lo largo de las últimas décadas, las reglamentaciones, normas y certificaciones han permitido implementar de manera científica las estrategias de ahorro energético en los edificios contemplando desde la etapa de su proyección hasta la de su respectiva demolición. La importancia de este tema en la actualidad se refleja en la integración en cada país de normas específicas respectivas de su clima y características físicas. Para México esto ha significado la creación de normas obligatorias que evalúan la eficiencia energética de las envolventes de sus edificios como por ejemplo la NOM-008-ENER-2001.

Esta norma destaca debido a que es la única en el país con carácter obligatorio que regula las ganancias energéticas de todos edificios comerciales contemplando las características físicas de cada estado de la República. Sin embargo, su importancia no le ha impedido tener en los últimos años una baja aplicabilidad, ocasionando un atraso grave de la infraestructura urbana en materia de eficiencia energética. El análisis de esta problemática ha podido vislumbrar diferentes áreas de conflicto que dificultan su aplicación y difusión, de entre las cuales solo algunas tienen la capacidad de ser abordadas por las ramas técnicas de la arquitectura y la ingeniería.

Los procesos de inspección de las envolventes existentes estipulados por la norma, contemplan metodologías de medición desactualizadas que derivan en flujos de trabajo ineficientes y altamente demandantes de tiempo. La desactualización de dichos procesos ha permitido espacios de mejora en donde la implementación de técnicas actuales de medición tiene el potencial de mejorar los procesos de inspección y contribuir en el esquema general a la mejora de su implementación.

En la actualidad, las nubes de puntos son una herramienta utilizada en la industria de la construcción para la representación y medición precisa de las geometrías de los edificios y sus componentes, particularmente han sido utilizadas en diversas áreas de investigación como herramienta complementaria al análisis energético o estructural de las envolventes. La gran evolución técnica que han experimentado las nubes de puntos en los últimos años ha permitido la utilización de metodologías y dispositivos más económicos, haciendo de su implementación un campo más amplio y diverso. Sin embargo, su utilización requiere de métodos específicos de generación y procesamiento que deben ser optimizados hacia el cumplimiento de metas específicas.

Su implementación en los procesos de inspección de las envolventes tiene el potencial de hacer más eficientes y económicos los flujos de trabajo propios de la norma. En el presente trabajo se tiene como objetivo generar una metodología que permita la integración de la tecnología de nube de puntos en los procesos de inspección de la norma NOM-008-ENER-2001.

Puesto que la herramienta está destinada a la medición de las superficies de la envolvente se propone un algoritmo para el procesamiento de las nubes de puntos del cual se determina su exactitud e impacto en los resultados de la evaluación de la norma. Dicho algoritmo se encarga de la segmentación de la información respectiva de las fachadas analizadas y el cálculo de las ganancias energéticas estipuladas por la norma.

Los primeros 2 capítulos del presente documento tienen el objetivo de explicar los antecedentes, funcionamiento y problemáticas de la norma, así como sus potenciales áreas de mejora. De igual modo se explica la metodología de generación de las nubes de puntos, flujo de trabajo e investigaciones análogas al tema.

El capítulo 3 expone el método para la implementación especifica de la nube de puntos, así como las herramientas propuestas para el procesamiento de la información. La implementación del método en 3 casos de estudio se describe en el capítulo 4, al igual que la documentación de los resultados de medición obtenidos.

En el capítulo 5 se analizan los resultados de la metodología propuesta y se comparan con aquellos de una metodología de medición convencional. Las observaciones y respectivas conclusiones se desarrollan en el capítulo 6.

Uno de los objetivos principales de la investigación es que el método propuesto dote a los profesionales encargados de la inspección de la norma, de herramientas que faciliten la revisión de las envolventes existentes de los edificios comerciales y otorguen alternativas más eficientes a los flujos de trabajo convencionales. De igual manera, esta investigación busca sentar un presente en la actualización de los procesos propios de inspección de las normas mexicanas en materia de eficiencia energética a partir de la implementación de métodos y tecnología emergentes.

La disminución de los tiempos de trabajo dentro de un rango de exactitud propuesto, así como la generación de nubes de puntos a partir de dispositivos de bajo costo son las principales contribuciones que se espera analizar de la presente investigación.

Los resultados de la investigación a su vez, se limitan a las capacidades de dispositivos utilizados para la generación de las nubes de puntos, así como por las características del algoritmo de segmentación de datos y cálculo de las ganancias energéticas de la norma. De igual manera los resultados obtenidos del procesamiento corresponderán únicamente a las características físicas de los casos de estudio propuestos.

1.0 NORMA MEXICANA PARA EL ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN ENVOLVENTES NOM-008-ENER-2001

Antecedentes

La NOM-008-ENER-2001 es una norma creada y promulgada en el año 2001 por la Comisión Nacional para el Ahorro de la Energía (CONAE) una institución mexicana que a finales del siglo XX tenía la función de disminuir o regular el consumo energético del país, en la actualidad a esta institución se le conoce como Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE). Aunque al comienzo esta norma inició meramente como una estrategia orientada a las edificaciones residenciales ubicadas al norte del país, las cuales se caracterizan por utilizar la mayor parte de la energía eléctrica en la alimentación de equipos o sistemas de aire acondicionado, en la actualidad su aplicación abarca la totalidad de los estados de la República Mexicana y un amplio espectro de edificaciones de tipo comercial.

El primer antecedente de la norma se dio en 1991 cuando una iniciativa del Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE) propuso la creación de un estándar con la finalidad de regular la eficiencia energética de las envolventes de los edificios, en esta primera iniciativa se hizo un especial énfasis en el aislamiento de la envolvente tomando en cuenta los materiales usados en la misma así como los efectos de los elementos de sombrado en las ventanas y superficies transparentes El origen de esta iniciativa tuvo su fundamento en un estudio realizado por el Fideicomiso para la Aplicación del Aislamiento Térmico o FIPATERM alrededor de 1980 en donde se identificó de manera cuantitativa las grandes cantidades de energía utilizadas al norte del país para el uso de equipos de aire acondicionado, en este mismo estudio se reveló la importancia de contar con materiales aislantes en los techos de la vivienda para mitigar el gran gasto energético (Huang et al., 1998).

Si bien la primera iniciativa del FIDE fue al poco tiempo descontinuada ésta fue retomada por la CONAE en el año 1993 con el objetivo de generar un estándar en forma de normativa mexicana el cual concluiría en la creación de la NOM-008-ENER-2001. Para la generación de la norma la CONAE involucró a la que entonces era la Federación de Colegio de Ingenieros Civiles de la República Mexicana (FECIC) a través de la contratación del Ingeniero Alejando Rivas Vidal. (Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica, 2001). Cabe destacar que, para el desarrollo

de la norma la CONAE recibió a partir de 1994 ayuda técnica por parte de los Laboratorios Nacionales Berkeley (LBNL por sus siglas en inglés) a través del programa norteamericano USAID (“U.S Agency for International Development”). Uno de los principales colaboradores que trabajó para los Laboratorios Nacionales Berkeley fue el Dr. Joe Huang quien tuvo una participación clave en la generación de los modelos energéticos utilizados para establecer los parámetros que posteriormente regirían a la norma.

Una de las primeras aproximaciones para la creación del estándar mexicano proponía utilizar una metodología de cálculo proveniente de La Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado que por sus siglas en inglés es mejor conocida como ASHRAE (American Society Of Heating, Refrigerating And A-C Engineers). Si bien esta aproximación se contempló como un buen fundamento para generar la norma, uno de sus principales problemas en aquella época era que dichas metodologías contemplaban un nivel de complejidad demasiado alto para el contexto del país y que en consecuencia no permitiría una aplicación práctica por parte de los actores de la industria de la construcción mexicana. Esto incitó a los ingenieros a generar una metodología que estuviera basada en los conocimientos de la ASHRAE pero que contemplara los aspectos particulares del contexto mexicano siendo el aspecto de la practicidad y simplicidad uno de los ejes directivos del proyecto. Finalmente, se resolvió adecuar una metodología ampliamente utilizada por la ASHRAE y se creó para efectos de la norma el concepto de presupuesto energético, el cual se utilizaría para calcular los rangos máximos de ganancia térmica que se permitirían en los edificios regulados por el nuevo estándar.

La adecuación de la metodología conllevó a la simplificación del cálculo de las cargas térmicas del edificio que se considerarían en la norma, el cual estaría basado en un método de la ASHRAE conocido como método de diferencia total equivalente de la temperatura o TETD por sus siglas en inglés (total equivalent temperature difference) (Martin-Dominguez & Alarcón-Herrera, 2004). Este método simplificado permitió el cálculo de las cargas térmicas a partir de las propiedades físicas de la envolvente de los edificios, las cuales están determinadas por los coeficientes de conductividad térmica de los materiales, los coeficientes de sombreado, las superficies de la envolvente, las temperaturas equivalentes promedio y las ganancias solares promedio de la ubicación. No solo se eligió particularmente esta metodología por su simpleza sino también porque ésta era las más utilizada y familiar a los procesos utilizados por los ingenieros, diseñadores y contratistas mexicanos de aire acondicionado de la época.

Acompañado del concepto de presupuesto energético se requirió establecer un modelo de edificio de referencia mismo que se utilizaría para establecer las cantidades de ganancia energética máximas en los edificios. Este modelo de referencia sería un modelo adaptable a cada proyecto pero que restringiría las ganancias energéticas a través de las proporciones de sus superficies transparentes, sus coeficientes de sombreado y en las propiedades de los materiales de la envolvente; al ser estos parámetros adaptables a cualquier proyecto se podrían implementar en cualquier tipo de edificio comercial y en cualquier localidad de México. Para definir las variables de este edificio de referencia fue necesario utilizar software de modelado energético; en este punto los Laboratorios Nacionales Berkeley optaron por utilizar el software y motor DOE-2.1 que para la época había sido ampliamente utilizado en Estados Unidos para la generación de estándares, para el modelado energético y para el análisis dinámico del comportamiento térmico de las edificaciones. Se utilizó como base un edificio de oficinas “típico” como modelo para la creación de los parámetros del edificio de referencia, este edificio se emplazó en la simulación en 3 principales ciudades de México las cuales debían de contar con suficientes datos meteorológicos y al mismo tiempo ser representativas de las diferentes tipologías climáticas del país. En consecuencia, se eligieron la Ciudad de México o Distrito Federal para la época, Mérida, Monterrey y Mexicali; los datos meteorológicos se obtuvieron a partir de las estaciones propias de las ciudades y de la base de datos climática central de Estados Unidos la cual obtenía información a través de las estaciones que tenían los aeropuertos de dichas ciudades. Cabe señalar que a partir del modelado de estas 4 localidades se generó una caracterización de las normas climatológicas que permitió extrapolarlas al resto de las ciudades del país con la ayuda de la clasificación de las zonas climáticas y de métodos estadísticos.

Otro aspecto relevante fue que el método requería los datos de la temperatura de la localidad tomando en cuenta sus respectivas variaciones a lo largo de un día y a lo largo del año; sin embargo, ante la falta de datos y priorizando la simplificación metodológica del proyecto se optó por utilizar el concepto de “temperatura promedio o equivalente” el cual estaría determinado por la ubicación geográfica del edificio, la orientación de las fachadas del edificio a estudiar y los materiales de su respectiva envolvente. Un aspecto importante del concepto de temperatura promedio es que éste representa uno de los principales aportes introducidos por el Dr. Joe Huang quién como ya se mencionó participó junto con Laboratorios Nacionales Berkeley. (Huang et al., 1998). De igual modo que con las temperaturas equivalentes, los coeficientes de sombreado, los coeficientes globales de transferencia de calor y las ganancias solares establecidas para el edificio de referencia fueron obtenidas a

partir de la simulación energética con el motor DOE-2.0. En la actualidad la compilación de estos datos se puede obtener en el documento oficial de la norma en su Apéndice A y es el resultado de los esfuerzos en conjunto de los equipos de arquitectos e ingenieros mexicanos ayudados por las instituciones norteamericanas.

En conclusión, la metodología que se utiliza actualmente en la NOM-008-ENER-2001 fue resultado de las variaciones y adaptaciones del método TETD de la ASHRAE y consiste en el cálculo de un presupuesto energético, el cual establece en términos generales un consumo energético máximo permisible para la edificación en cuestión. La norma adquirió su formato actual hasta el año 2000 y fue publicada en el Diario Oficial de la Federación al año siguiente, si bien es una norma de relativa simpleza es importante en el contexto nacional debido a que representa a nivel nacional uno de los principales antecedentes de regular y estandarizar la eficiencia energética de las envolventes de los edificios con el objetivo de disminuir el gasto energético utilizado en sistemas de enfriamiento en edificios comerciales.

Características generales de la NOM-008-ENER-2001

La NOM-008-ENER-2001 en la actualidad forma parte de un conjunto de 17 normas oficiales mexicanas aprobadas por la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) enfocadas en certificar la eficiencia energética de determinados productos o sistemas. La NOM-008 en particular es una norma de sistema encargada de evaluar la eficiencia energética de las envolventes de los edificios y tiene como objetivo limitar la ganancia de calor a través de la envolvente de las edificaciones, esto con el fin de racionalizar en última instancia el uso de la energía dedicada a los sistemas de enfriamiento de los edificios. Esta norma está orientada a todos los edificios nuevos y a las ampliaciones de los edificios existentes y tiene su campo de aplicación en las edificaciones comerciales teniendo como excepción las edificaciones de tipo industrial y habitacional; cabe destacar que en la actualidad la NOM-020-ENER-2011 utiliza la misma metodología para el análisis de la eficiencia energética de las envolventes en edificaciones de tipo residencial.

En términos generales esta norma establece una ganancia máxima permisible de calor en la envolvente particular de cada edificio, el cálculo de la ganancia máxima se realiza a través de la generación de un edificio análogo o de referencia. De acuerdo con lo estipulado en el documento oficial, para la aprobación de la norma la ganancia de calor expresada en Watts del edificio proyectado (o real) debe ser igual o menor a aquella del edificio de referencia (o edificio análogo).

$$\emptyset_p \leq \emptyset_r \qquad (1)$$

En donde:

$\emptyset_p$ = La ganancia de calor total del edificio proyectado

$\emptyset_r$ = La ganancia de calor total del edificio de referencia

La norma define al edificio de referencia como “El edificio que, conservando la misma orientación, las mismas condiciones e colindancia, las mimas dimensiones en planta y elevación, es utilizado para determinar un presupuesto energético máximo”, la importancia del edificio de referencia radica en que servirá para contrastar los cálculos de ganancia energética pertenecientes al edificio proyectado; el cual, es definido en la norma como “El edificio que se pretende construir” lo cual implica el edificio proyectado y sus respectivas características como las orientaciones, colindancias, dimensiones, superficies, materiales, vanos y macizos, etc. (Norma oficial mexicana NOM-008-ENER-2001. Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales., 2001). Si bien el edificio de

referencia utiliza como base las características físicas del edificio proyectado existen diferencias relevantes entre los mismos, las cuales son:

- El porcentaje de área total de las áreas macizas y de los vanos transparentes ubicados en los componentes de la envolvente. En el caso del edificio de referencia, la propia norma nos estipula los porcentajes de área opaca y transparente que debe tener la envolvente, mientras que en el edificio proyectado las áreas corresponden al proyecto arquitectónico.
- Los coeficientes globales de transferencia de calor de las partes opacas y transparentes (techos y muros) los cuales en el caso del edificio de referencia están determinados por la ubicación del edificio y tabulados en el Apéndice A de la norma.
- Coeficientes de sombreado, en donde se tiene un estipulado para el edificio de referencia en comparación al sombreado perteneciente al edificio proyectado.

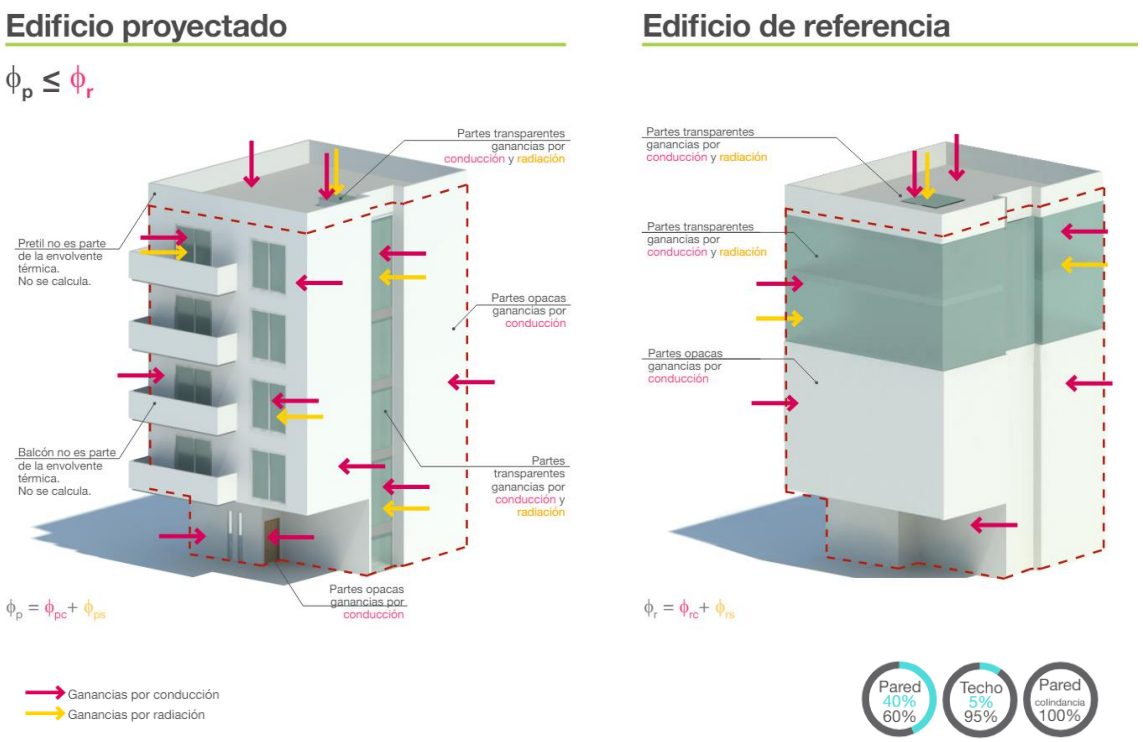


Figura 1 Nota. Comparación del edificio proyectado (edificio real) contra el edificio de referencia (con las proporciones opacas y transparentes estipuladas por la NOM). Recuperado de (CONUEE & SENER, 2017)

La norma determina las proporciones de área opaca/transparente de los muros y techos del edificio de referencia (ver Figura 1). Estas proporciones toman como base el área total de los murtos y techos con orientación norte, sur, este y oeste. De

igual modo determina los coeficientes globales de ganancia energética de acuerdo a una tabla en su Apéndice A (ver Tabla 1). Estos valores de visualizan en la siguiente tabla recuperada del documento oficial:

Techo			
Parte	**Porcentaje del área total %**	**Coeficiente global de transferencia de calor K (W/m² K)**	**Coeficiente de Sombreado CS**
Opaca	95	Tabla 1, Apéndice A	-----
Transparente	5	5,952	0,85

Pared			
Parte	**Porcentaje del área total %**	**Coeficiente global de transferencia de calor K (W/m² K)**	**Coeficiente de Sombreado CS**
Fachada opaca	60	Tabla 1, Apéndice A	-----
Fachada transparente	40	5,319	1
Colindancia opaca	100	Tabla 1, Apéndice A	-----

Tabla 1 Características del edificio de referencia. Recuperado de (Norma oficial mexicana NOM-008-ENER-2001. Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales., 2001).

Metodología de cálculo

Para comparar las ganancias del edificio proyectado y de referencia es necesario generar un presupuesto energético el cual considera exclusivamente las ganancias de calor pertenecientes a la envolvente de los edificios. La norma define a la envolvente como “La que está formada por techo, paredes, vanos, piso y superficies interiores que conforman el espacio interior” (Norma oficial mexicana NOM-008-ENER-2001. Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales., 2001); lo que en otras palabras correspondería a las fachadas de los edificios y sus techos tomando en cuenta todas sus orientaciones y colindancias.

Aunque en la literatura actual y en varios estándares de cálculo de ganancias de calor se consideran primordialmente 3 principales formas de transferencia energética (conducción, convección y radiación) la norma al ser una simplificación de la metodología TETD (por sus siglas en ingles “total equivalent temperature difference”) proveniente de la ASHRAE solamente considera el calor trasferido por conducción y por radiación. Por lo que la ecuación estipulada por la norma en donde

se calcula las ganancias de calor en la envolvente (del edificio proyectado y de referencia) es la siguiente:

$$\emptyset_{pr} = \emptyset_c + \emptyset_s \quad (2)$$

En donde:
$\emptyset_{pr}$ = La ganancia de calor total del edificio proyectado o del edificio de referencia
$\emptyset_c$ = La ganancia de calor por conducción total del edificio proyectado o referencia
$\emptyset_s$= La ganancia de calor por radiación total del edificio proyectado o referencia

Respecto a la ganancia de calor por conducción la norma establece lo siguiente:

$$\emptyset_c = \sum_{i=1}^{5} \emptyset_{ci} \quad (3)$$

i = son las diferentes orientaciones (1) techo, (2) norte, (3) este, (4) sur, (5) oeste.

Para el cálculo de las ganancia por conducción de cada orientación la norma establece la siguiente ecuación:

$$\emptyset_{ci} = \sum_{j=1}^{5} \left[K_j * A_{ij} * (t_{ei} - t)\right] \quad (4)$$

En donde:
$\emptyset_c$ = La ganancia de calor por conducción a través de la componente con orientación i. Con unidades en Watts.
j = Son las diferentes porciones que forman la parte de la componente de la envolvente. Cada porción tendrá un coeficiente global de transferencia de calor.
K_j = Es el coeficiente global de transferencia de calor de cada porción del edificio proyectado determinado según el Apéndice B en W/m^2K. En el caso del edificio de referencia este tiene un valor fijo de acuerdo a la tabla 1 del Apéndice A.
A_j = Área de la porción j con orientación i en m^2 . En el caso del edificio de referencia este tiene un valor de proporción fijo.
t_{ei} = El valor de la temperatura equivalente promedio, para la orientación i, determinada en la Tabla 1 del Apéndice A en °C
t =El valor de la temperatura interior del edificio igual a 25°C

En cuanto al coeficiente global de transferencia de calor es importante considerar que la norma establece un valor fijo para el edificio de referencia (en muros techos y piso) y establece uno variable para el edificio proyectado el cual que debe ser calculado de manera manual tomando en cuenta los materiales que

conforman los elementos de las envolventes. La metodología de cálculo de los coeficientes globales de transferencia de calor de las diferentes componentes de la envolvente del edificio proyectado se encuentra en el Apéndice B de la propia norma.

De acuerdo con la norma tenemos que la ecuación que nos permite calcular la ganancia de calor por radiación es la siguiente:

$$\emptyset_s = \sum_{i=1}^{5} \emptyset_{si} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (5)$$

i = Son las diferentes orientaciones (1) techo, (2) norte, (3) este, (4) sur, (5) oeste.

Para el cálculo de las ganancia por radicación de cada orientación la norma establece la siguiente ecuación:

$$\emptyset_{si} = \sum_{i=1}^{5} [A_i * CS_i * FG_i * SE] \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (6)$$

En donde:

$\emptyset_{si}$ = La ganancia de calor por radiación solar a través de la componente con orientación i. Con unidades en Watts.

A_j = Es el área de la parte transparente de la envolvente del edificio proyectado p de referencia con orientación i en m^2. En el caso del edificio de referencia este tiene un valor de proporción fijo.

CS_j = Coeficiente de sombrado del vidrio empleado en el edificio de referencia o proyectado con orientación i. En el caso del edificio de referencia este tiene un valor adimensional de 0.85 para los techos y 1.0 para paredes.

FG = Ganancia de calor solar por orientación determinada en la tabla 1 del Apéndice A en W/m^2

SE = El factor de corrección por sombreado exterior para cada porción transparente determinado en las Tablas 2 -5 del Apéndice A, con valor adimensional entre 0 y 1. En el edificio de referencia este valor equivale a 1.0.

Cabe destacar que, aunque la ganancia de calor por radiación tiene efectos en todos los componentes de la envolvente de los edificios (muros, puertas, ventanas pisos, etc.), la norma solamente considera las ganancias de las componentes transparentes del edificio proyectado y del de referencia; en otras palabras, se considera que la ganancia de calor por radiación en todas las componentes opacas de la envolvente es igual a cero.

Si bien el cálculo descrito requiere de numerosas variables para la estimación de las ganancias energéticas de las envolventes, podremos encontrar la mayoría de los valores en el propio documento de la norma; el Apéndice A de la misma nos permite obtener los siguientes valores de las variables por ciudad y estado de la República Mexicana:

- Coeficientes globales de transferencia de calor por componente opaco o transparente, correspondientes al edificio de referencia.
- Temperatura equivalente promedio por tipo de superficie ya sea opaca o transparente y por tipo de componente de la envolvente como muros y techos.
- Factor de ganancia solar promedio tomando en cuenta la orientación del componente de la envolvente ya sea esta norte, sur, este u oeste.
- Factor de corrección de sombreado de acuerdo con las dimensiones de los elementos de sombreado del propio edificio proyectado, la orientación del componente de la fachada y la ubicación geográfica del proyecto.

Dicho lo anterior tendremos que solo se requieren dos variables particulares correspondientes a cada edificio las cuales son:

- El sistema constructivo de cada uno de los componentes de la envolvente. En específico se busca obtener los materiales y sus respectivos espesores los cuales en conjunto y de acuerdo con lo estipulado en el Apéndice B permitirán determinar el coeficiente global de transferencia de calor de las fachadas, pisos y techos del edificio proyectado.
- Las áreas correspondientes a los componentes opacos y transparentes de la envolvente. Es importante considerar que es necesario diferenciar las áreas entre los propios elementos opacos y transparentes si estos corresponden a diferentes sistemas constructivos. Las áreas serán los valores base que se multiplicarán por los factores base obtenidos en el Apéndice A.

Dichas variables, deberán obtenerse a partir de la documentación técnica particular de cada construcción y verificarse en sitio por las correspondientes unidades de inspección aprobadas por la CONUEE.

Si bien es posible generar el cálculo del presupuesto energético de manera manual tomando en cuenta la metodología estipulada en la norma, en la actualidad existe una herramienta oficial de la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (ver Figura 2) que permite simplificar el cálculo del presupuesto energético y generar un resultado preliminar de la evaluación del edificio en cuestión.

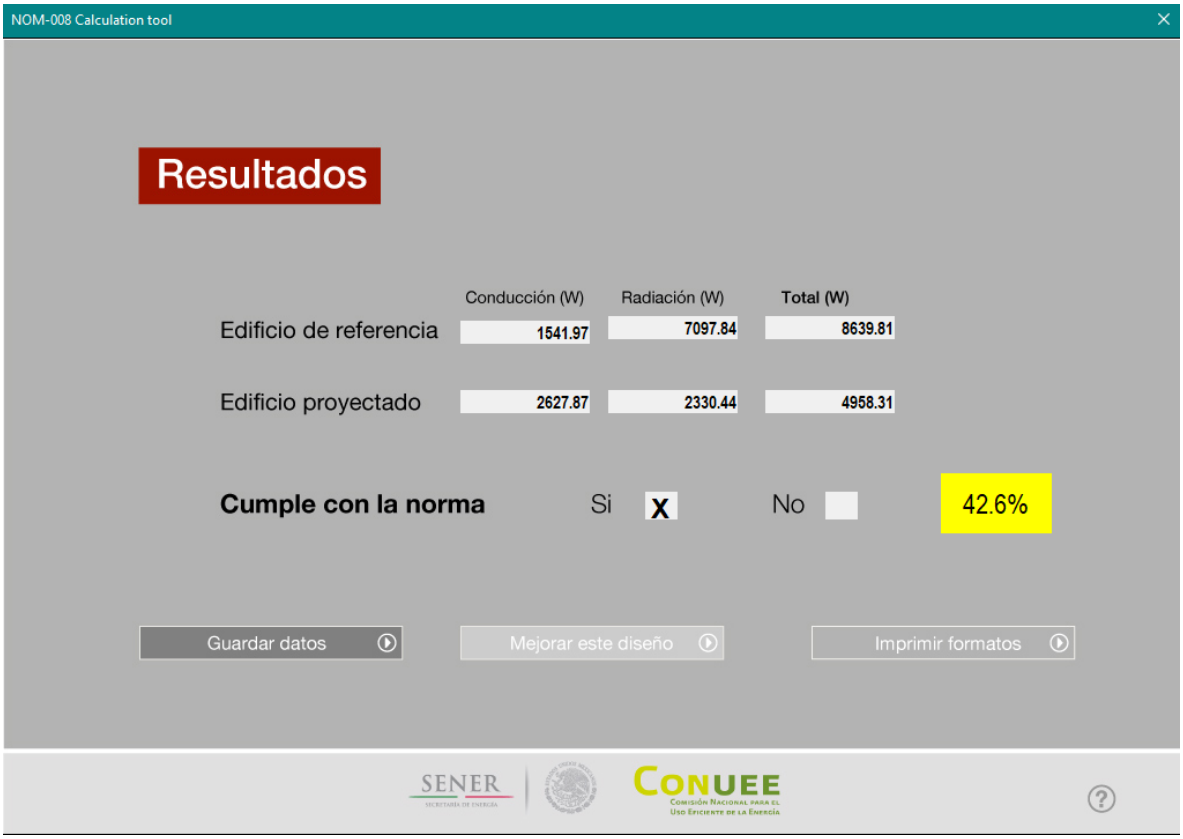


Figura 2. Resultado de ganancias energéticas generadas a partir de la herramienta de cálculo de la CONUEE (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, 2017).

Esta herramienta pública se comporta como una hoja de cálculo digital que nos permite introducir los datos de las variables particulares ya descritas de cada edificio. Como resultado del proceso la herramienta nos generará un informe que detalla las ganancias de calor por conducción y radiación del edificio proyectado y de las propias del edificio de referencia, así como su respectiva comparativa. Este reporte se divide en 5 partes que nos dan la siguiente información:

1. Datos generales el proyecto
2. Valores base para el cálculo de la ganancia de calor a través de la envolvente (latitud, temperatura equivalente, coeficiente global de transferencia de calor

del edificio de referencia, factores de ganancia solar y factores de corrección por sombreado)

3. Cálculo de los coeficientes globales de transferencia de calor de las porciones que conforman la envolvente
4. Cálculo de las ganancias de calor del edificio de referencia y proyectado tomando en cuenta las ganancias de conducción y radiación de cada uno.
5. Resumen del cálculo, en el que se comparan las ganancias y se concluye de manera preliminar el cumplimiento de la norma, así como el porcentaje de ahorro energético sea éste positivo o negativo.

Los resultados finales se concentran en una tabla, que documenta las ganancias de conducción, radiación y ganancias totales tanto del edificio de referencia como del edificio proyectado respectivamente. De igual modo se reporta la comparación de las ganancias entre ambos edificios expresada en porcentaje de ahorro energético. El último dato muestra si el edificio proyectado o real cumple o no los requerimientos estipulados por la norma.

Retos existentes en la implementación de la norma

Si bien es cierto que las normas mexicanas denominadas NOM son de carácter obligatorio a nivel nacional, la NOM-008-ENER-2001 a lo largo de la última década ha tenido que afrontar diversos contratiempos que han dificultado su aplicabilidad a lo largo del país. De acuerdo a los balances de eficiencia energética del 2020, 2021 y 2022 la NOM-008 ha tenido una aplicabilidad mucho menor que sus normas análogas (ver Tabla 2).

	Núm. de inspecciones de realizadas NOM de sistema - 007-ENER-2014	Núm. de inspecciones de realizadas NOM de sistema - 013-ENER-2013	Núm. de inspecciones de realizadas NOM de sistema - 008-ENER-2001
Año 2020	440	818	7
Año 2021	359	763	7
Año 2022	329	766	9
Total	1,128	2,347	23

Tabla 2 Número de inspecciones realizadas en el periodo 2020-2022. (CONUEE & SENER, 2020, 2021, 2022)

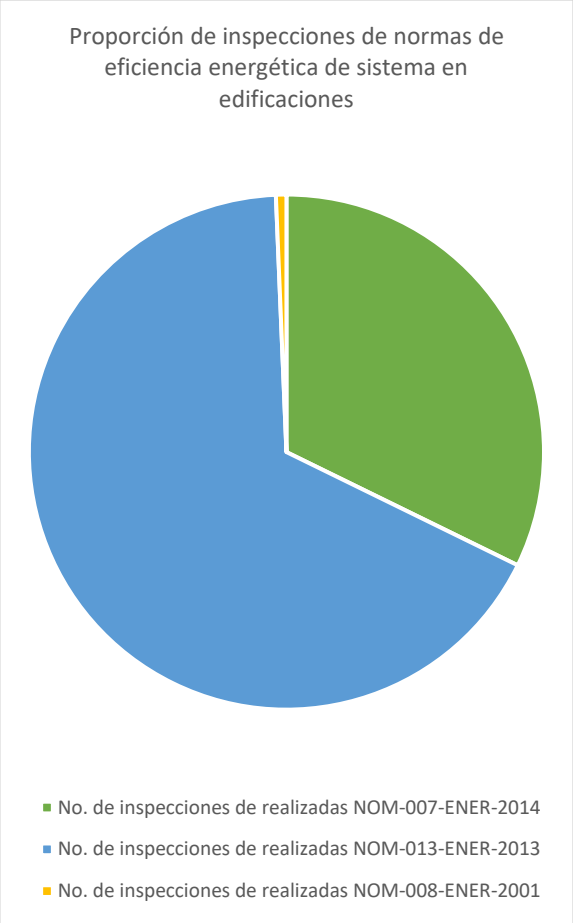


Figura 3 Proporción de inspecciones entre normas de sistema mexicanas. Elaboración propia.

Como se observa en los datos el número total de inspecciones realizadas por la NOM-008-ENER en los últimos 4 años corresponde a menos del 1% del total de inspecciones realizadas en materia de normas de sistema de eficiencia energética; perspectiva que se agrava si se considera que la NOM-008-ENER-2001 comprende el mayor sector de la edificación en México y que es la única norma vigente en la actualidad que comprende aspectos de la eficiencia energética de las envolventes de los edificios no habitacionales (ver Figura 3).

De acuerdo con los datos de la Encuesta Nacional de Empresas Constructoras (INEGI, 2024) en el sector de la edificación las construcciones no habitacionales comprenden el 60% del valor de la producción nacional siendo conformado por:

- Edificaciones comerciales, industriales y de servicios (52.6%)
- Escuelas (2.1%)
- Hospitales y clínicas (2.9%)
- Trabajos auxiliares en la edificación (1.5%)

Si bien las edificaciones industriales no entran dentro del campo de la aplicación de la norma, es innegable que aquellas comprendidas dentro de la misma corresponden a un sector representativo de la industria de la construcción y que una baja aplicación de la misma corresponde a una carencia importante que debe ser abordada si se busca sustancialmente alcanzar la eficiencia energética de las edificaciones en el país.

Dicho lo anterior es importante mencionar que en la última década algunos trabajos han hecho un esfuerzo por diagnosticar esta problemática y vislumbrar algunas opciones que permitan el mejoramiento de su aplicación así como la búsqueda de métodos que complementen los procedimientos propios de la norma

como es el caso del trabajo elaborado por Tapia Guillen et al., (2023); de las problemáticas identificadas por dichos trabajos podemos destacar aquellas que se centran en los problemas técnicos que tiene la norma en su metodología de cálculo y aquellas relacionadas a su deficiente implementación, impacto y difusión.

Un ejemplo de análisis de los problemas metodológicos es abordado por Martin-Dominguez & Alarcón-Herrera (2004) quienes reflexionan sobre la necesidad de actualizar los valores de las temperaturas ambientales promedio utilizadas en la norma 020-ENER, los cuales de acuerdo con los autores fueron generados a partir de la metodología de la NOM-008 propuesta en 1998 por Huang et al. Conforme a lo estipulado en el artículo, los valores de las temperaturas ambientales promedio sumados a los de reflectividad solar impactan a los parámetros del edificio de referencia y generan considerables inexactitudes en el cálculo final del presupuesto energético; debido a que la NOM-020-ENER y la NOM-008-ENER comparten la misma metodología de cálculo de presupuesto energético es razonable considerar que dichas observaciones del trabajo son válidas para ambas normas. Finalmente, Martin-Dominguez & Alarcón-Herrera (2004) concluyen que si bien estas inexactitudes impactan de manera negativa la implementación de la norma la implementación de las normas incluso en su estado actual permite un ahorro de energía general en los respectivos edificios.

Por otra parte, existen investigaciones como la realizada por Santiago Cruz (2004) que hacen un análisis de las problemáticas principales de la norma abarcando los aspectos de su deficiente implementación, bajo impacto y poca difusión; en su trabajo la autora no solo identifica, clasifica y jerarquiza las problemáticas que influyen en la aplicación de la norma, sino que también encuadra los principales factores clave que juegan un papel determinante en su mejoramiento. De acuerdo con su investigación los dos factores claves para el mejoramiento de la norma son el factor político y el factor educativo.

El factor político o denominado en su investigación como “factor poder” contempla aquellas variables que están directamente relacionadas con la política pública; la cual, está a cargo no solo de los programas de difusión relativos a la eficiencia energética sino también de los instrumentos puestos a disposición de la población para implementar de manera efectiva la norma, adicionalmente en este factor se contemplan las estrategias que tienen como objetivo impulsar el desarrollo educativo en materia de eficiencia y ahorro energético.

El segundo factor relevante en la investigación de Santiago Cruz (2004) es el denominado “factor educativo” el cual contempla los procesos y modos en los cuales

se difunden los conocimientos relacionados a eficiencia energética a los profesionistas que ejercen en la industria de la construcción. La autora desglosa este factor en 3 campos principales de acción: docencia, educación continua e investigación. El papel de la docencia se centra en formar personal calificado con una cultura y conocimientos consientes de la importancia de la eficiencia energética; el papel de la educación continua busca capacitar y actualizar a los actores de la industria de la construcción en materia de eficiencia con la finalidad de que se reflejen los conocimientos en los edificios construidos y finalmente el papel de la investigación se centra en la proposición de nuevas metodologías o mejoras enfocadas a impulsar la aplicación y desarrollo de las normas y estrategias relacionadas a la materia.

Detalladas las problemáticas que tiene la norma y las áreas de acción Santiago Cruz (2004) encuadra una serie de estrategias de desarrollo orientadas al mejoramiento general de la aplicación de la NOM, en donde una de las más relevantes hace especial énfasis en “Adoptar tecnología que coadyuve a la evolución de la norma” (Santiago Cruz, 2004). Cabe destacar que esta estrategia tiene una amplia relevancia en la presente investigación ya que por su naturaleza técnica tiene la capacidad de ser abordada por los campos de investigación de la Arquitectura e Ingenierías afines a la materia.

Uno de los primeros inconvenientes que tiene la estrategia de la “adopción tecnológica” propuesta por Santiago Cruz (2004) es su gran apertura a posibles aproximaciones para su implementación. Puesto que los avances técnicos de la última década en materia de eficiencia energética en edificaciones permiten la existencia de múltiples aproximaciones factibles en el escenario mencionado, es necesaria la generación de un marco técnico que sirva como eje fundamental para la creación de propuestas que integren dicha estrategia.

El tiempo de adopción de la estrategia es una variable a considerar si tomamos en cuenta que en caso de que la adecuación tecnológica conllevara alguna modificación directa de lo establecido en el documento expedido por el Diario Oficial de la Federación, como por ejemplo el proceso del cálculo del presupuesto energético o los datos establecidos en los Apéndices A y B de la norma, se requeriría la aprobación por parte del Comité Consultivo para la Preservación y Uso Racional de los Recursos Energéticos (CCNNPURRE) el cual está encargado de la elaboración, aplicación y vigilancia del cumplimiento de las normas en materia de eficiencia energética. Esto es importante no solo para contemplar los efectos de mejora que podría tener la adopción de la tecnología sino también para entender la complejidad que podría involucrar este proceso. Puesto que la alteración de

aspectos intrínsecos de la norma conlleva un proceso complejo debido a la necesaria aprobación de las autoridades competentes, la utilización de la tecnología en los aspectos secundarios como los flujos de trabajo es una alternativa para generar resultados con mayor inmediatez y menor complejidad.

Dicho lo anterior, el flujo de trabajo o proceso metodológico de la aplicación de la norma se comportará como una variable fundamental a considerar para estipular la aproximación más adecuada de dicha adopción tecnológica. Es por esto que es relevante comprender los procesos de trabajo y funcionamiento intrínsecos de la propia NOM-008-ENER-2001.

Flujo de trabajo de la NOM-008-ENER-2001

Entendiendo al flujo de trabajo como la serie de pasos realizados de inicio a fin para completar una tarea (*Definition of Workflow*, 2024), veremos que en el caso de la NOM-008-ENER-2001 este flujo está enmarcado legalmente en la Ley de la Infraestructura de la Calidad (LIC) y los lineamientos de la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE).

En términos generales, la creación de mecanismos para evaluar la conformidad o cumplimiento de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) es uno de los objetivos centrales abordados por la LIC (2020); la importancia de esta ley respecto al flujo de trabajo de la NOM-008 recae en dos aspectos principales. El primero es que la LIC establece que, para evaluar la conformidad (cumplimiento) de las normas mexicanas es necesario que éstas pasen un “procedimiento de muestreo, prueba, inspección, evaluación y certificación” (2020); la inspección a su vez es denominada como “La constatación ocular o comprobación mediante muestreo, medición, pruebas de laboratorio o examen de documentos, que se realiza para evaluar la conformidad en un momento determinado a petición de parte interesada.” (Ley de la Infraestructura de la Calidad, 2020). El segundo aspecto relevante es que la LIC establece que solamente los organismos acreditados denominados “Organismos de Evaluación de la Conformidad” tendrán facultades de realizar la evaluación de la conformidad de las normas mexicanas; adicionalmente establece en su artículo 53 las figuras legales que estos organismos podrán adquirir para realizar sus funciones, las cuales son:

- Laboratorios de ensayos y pruebas
- Unidades de inspección (UI)
- Organismos de certificación

Llegados a este punto están claros los requerimientos necesarios para evaluar el cumplimiento de una norma, así como los actores autorizados para la realización de dicha tarea. En el caso de la evaluación de la conformidad de la NOM-008-ENER-2001 al ser ésta una norma de sistema se requieren los servicios particulares de las Unidades de Inspección, esto debido a que el objeto regulado por la norma no es en sí un producto sino un sistema ligado a una edificación particular (entendiendo a la envolvente como sistema). En esta norma las UI se encargan de revisar las envolventes de los edificios y dictaminar si éstas cumplen con los requerimientos mínimos de eficiencia energética. La metodología especifica que utilizará la UI estará acorde con los requerimientos propios de la norma, sin embargo y de acuerdo con el Articulo 55 de la LIC esta metodología deberá estar también acorde con lo estipulado en las propias normas mexicanas, estándares, normas internacionales y reglamentos técnicos.

La CONUEE en concordancia con lo estipulado por la LIC, contempla un flujo de trabajo general aplicable a todas las normas de sistema en materia de eficiencia energética; dicho flujo de trabajo es reiterado y publicado anualmente en los balances de energía generados por la comisión (CONUEE & SENER, 2020, 2021, 2022). El objetivo de estos flujos es ahondar en las funciones y actividades específicas que se deben de llevar a cabo por las UI al momento de certificar el cumplimiento de una norma, así como organizar el orden de las actividades y los procedimientos necesarios.

La CONUEE en su balance anual contempla un flujo de trabajo general aplicable a todas las normas de sistemas en materia de eficiencia energética (ver Figura 4) de igual modo a lo estipulado por la LIC la CONUEE acuerdo con este flujo de trabajo y en concordancia a lo estipulado en la LIC, son las Unidades de Inspección las encargadas de llevar a cabo el proceso de revisión de la instalación de las edificaciones.

Dicho lo anterior tenemos que:

1. El trabajo de las UI inicia al convenir con un interesado en revisar la respectiva instalación de acuerdo a una cotización determinada.
2. La UI hace una revisión documental del proyecto en donde se solicita al interesado los planos ejecutivos o de anteproyecto que contienen la información técnica de la envolvente del edificio; adicional a esta información se requiere una lista de los materiales utilizados en la envolvente indicando sus espesores y los datos de sus propiedades físicas y térmicas (conductividad térmica, coeficientes globales de transferencia de calor, etc.).

3. La UI realiza una visita técnica a las instalaciones en donde se verifica la conformidad con la NOM tanto en el proyecto como en la obra.
4. Se realiza un reporte técnico y acta circunstanciada en donde se determina si se cumplen los requerimientos mínimos, en caso de que no se cumplan se generarán observaciones que el interesado deberá atender para posteriormente solicitar una nueva visita técnica.
5. En caso de que se cumplan los requerimientos se emite un dictamen de cumplimiento de la NOM, el cual servirá para obtener de la CONUEE la etiqueta de verificación que estipula el cumplimiento de la norma y el porcentaje de ahorro energético de la construcción. (Morales Martínez, 2013).

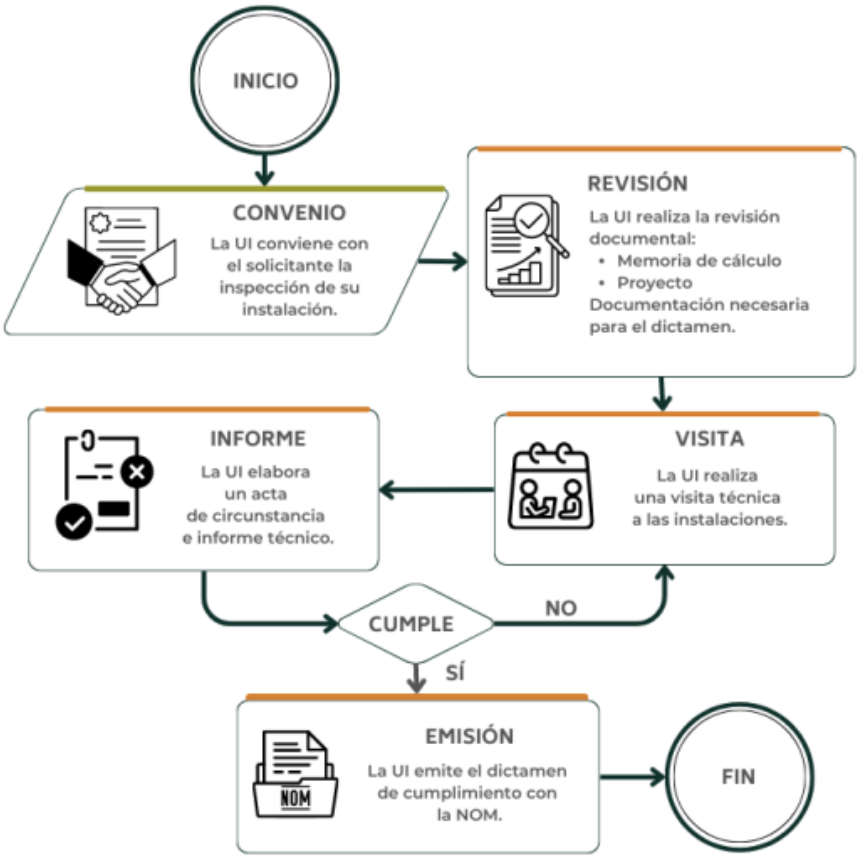


Figura 4 Flujo de trabajo en la inspección de una norma de sistemas. Recuperado de (CONUEE & SENER, 2022)

Una de las etapas críticas en el flujo de trabajo descrito es la realización de la visita técnica para la corroboración de la conformidad de la NOM, tanto en proyecto como en obra; este paso particularmente en la NOM-008-ENER implica la revisión de la concordancia de las características de la envolvente construida con los planos ejecutivos entregados en la etapa de la revisión documental, lo cual es

indispensable para determinar si la envolvente cumple los requerimientos de la norma. Como se había mencionado anteriormente la NOM-008 evalúa la eficiencia energética de las envolventes de los edificios a través del cálculo de un presupuesto energético; aunque la mayor parte de las variables necesarias para realizar el cálculo se encuentran tabuladas dentro del propio anexo A del documento de la norma, existen algunas intrínsecamente relacionadas con el edificio cuya información se obtiene directamente de la documentación dada por el cliente. Estas variables contextuales de los edificios son:

- El sistema constructivo de los componentes de la envolvente. Que en otras palabras es la composición de los muros y techos que dividen los espacios interiores de los exteriores, considerando los materiales y espesores de cada sección o fachada. La información sirve para determinar el coeficiente global de transferencia de calor de la envolvente del edificio proyectado.
- Las áreas correspondientes a los componentes opacos y transparentes de la envolvente, las cuales en conjunto con el coeficiente global de transferencia de calor permiten calcular las ganancias de calor por conducción y radiación del edificio proyectado.
- Las dimensiones de los elementos de sombreado, los cuales afectan directamente el cálculo de las ganancias de calor por radiación de la envolvente.

Si bien los datos de estas variables se encuentran reflejados en la información documentada dada por el cliente, la posible existencia de una discrepancia entre la información y la realidad modificaría los valores de ganancia térmica calculados y en consecuencia la resolución del cumplimiento de la NOM Dicho en otras palabras, las UI requieren de procedimientos independientes del cliente que les permitan conocer cuantitativamente las 3 variables contextuales mencionadas.

La importancia de este tipo de procedimientos se vislumbra cuando se considera que en México existe una gran cantidad de edificaciones que contienen irregularidades en sus respectivos procesos de construcción (López Moreno, 2016), algunas de las más relevantes para la inspección de la NOM-008 son: la inexistencia de la documentación necesaria para la construcción de la edificación y la discrepancia que existe entre los planos de licencias frente a la obra terminada. Ya sea por corrupción, impunidad, conflictos de interés o alguna otra razón este tipo de situación acentúa aún más la importancia de la verificación en sitio. Llegados a este punto se entiende que es la obligación de la UI de contar con mecanismos que permitan verificar la información documental de los sistemas constructivos, las

áreas de los elementos opacos/transparentes de los edificios y las dimensiones de los elementos de sombreado.

En el caso específico de la verificación de las áreas de las superficies opacas/ transparentes y de la medición de los elementos de sombreado en la fachada, se requieren de metodologías enfocadas al levantamiento de las envolventes (techos y fachadas). Si bien existen métodos e instrumentos comprobados que permiten realizar estas tareas garantizando un mínimo grado de exactitud, a lo largo de la última década el surgimiento de nuevas tecnologías y metodologías han permitido mejorar la eficiencia de los flujos de trabajo convencionales manteniendo o incluso mejorando la exactitud de los resultados. En el área de la inspección o medición de superficies las metodologías que utilizan nubes de puntos han destacado a nivel global por su capacidad de reproducir objetos de diferentes escalas con una precisión milimétrica y con flujos de trabajo de mayor eficiencia que los convencionales

Si bien los procesos de inspección particulares de la NOM-008-ENER-2001 no contemplan la utilización de estas nuevas tecnologías, el estudio de su implementación tiene el potencial de mejorar los flujos de trabajos actuales llevados a cabo por las Unidades de Inspección. Una posible mejora sería que las UI tendrían la capacidad de levantar en menos tiempo las envolventes de los edificios contemplando valores mínimos de error (lo cual está conforme a sus respectivas obligaciones estipuladas por la LIC y los lineamientos de la CONUEE). Por otra parte, existen metodologías como las propias de la fotogrametría que permiten levantar grandes extensiones de superficies con tiempos mínimos de trabajo en sitio, aspecto que permitiría mejorar la eficiencia del levantamiento de las envolventes e incluso masificar el levantamiento de las mismas.

Cabe agregar que aunque la tecnología mencionada tiene muchas ventajas sobre las metodologías convencionales (entendiendo a las metodologías convencionales como aquellas que no incorporan el uso de nubes de puntos como parte de los procesos de medición), ésta no está exenta de problemáticas y desventajas; por lo cual, es imprescindible estudiar las implicaciones de utilizar esta tecnología en el flujo de trabajo propuesto con la finalidad de determinar la instrumentación y procesos más adecuados para su implementación exitosa.

Es importante subrayar que la búsqueda de la actualización e implementación tecnológica abordada en el presente documento no solo está acorde con las estrategias de mejora estipuladas por Santiago Cruz (2004), sino que busca tener un enfoque pragmático que permita un mejoramiento a corto plazo de los procesos

internos de la NOM-008-ENER-2001 lo cual se ve reflejado en la intencionalidad de impactar solamente los flujos de trabajo de las UI sin la necesidad de intervenir la estructura propia de la norma, lo cual como ya se ha mencionado implicaría un proceso de mayor complejidad al necesitar la aprobación de las instituciones correspondientes. De igual manera se busca que este trabajo sea un antecedente para la implementación de esta tecnología no solo en la NOM-008-ENER-2001 sino en otras normas o procesos relativos a la evaluación energética de envolventes en México.

2.0 LAS NUBES DE PUNTOS COMO TECNOLOGÍA ALTERNATIVA A LAS TÉCNICAS DE MEDICIÓN

En las últimas décadas, el avance e implementación de la tecnología ha permitido generar mejoras considerables en los procesos de medición de objetos y superficies que son de interés para diversos campos de conocimiento como la geomática, la ingeniería y la arquitectura. Tradicionalmente para medir un objeto o superficie se requería de la toma de mediciones individuales de distancias relevantes útiles para la reconstrucción y representación del objeto, sin embargo, con el paso de los años estos métodos si bien fiables, han demostrado requerir un gran consumo de tiempo y personal para su correcta ejecución sin estar exentos en su totalidad a omisiones de información relevante y errores tanto en la reconstrucción geométrica como en la representación de los objetos (Wang et al., 2020). Alternativamente la disciplina de la percepción remota ha permitido generar metodologías e instrumentación con la capacidad de compensar las desventajas de los procedimientos tradicionales mientras recrea objetos o superficies contemplando detalles a escala milimétrica.

Las nubes de puntos en la actualidad son una de las principales herramientas utilizadas por la disciplina de la percepción remota para reproducir digitalmente los elementos capturados en la realidad, en la última década debido a su amplia diversidad de aplicaciones se ha vuelto un tema de investigación relevante para diferentes sectores económicos destacando el de la industria de la construcción. (Wu et al., 2021).

Existe un gran número de autores que definen de diferentes maneras a las nubes de puntos, sus características y componentes principales, por ejemplo:

- El manual de escaneo 3D láser orientado a patrimonio por Barber & Mills (2011) las define como “Una colección de coordenadas X, Y, Z en un sistema coordinado que permite la comprensión de la distribución espacial de una superficie descrita a un espectador. Ésta puede también incluir información adicional como la intensidad de valores RGB.”.
- Poux (2019) por otra parte en su investigación sobre la estructuración inteligente de datos 3D las define como “el conjunto espacial de coordenadas X, Y, Z con atributos adicionales, que representa de manera digital un contexto u objeto capturados cuyas características están en relación con las ventajas y limitaciones de los sensores, permitiendo réplicas que van desde la escala de un objeto hasta la escala de un país”.

- Finalmente, Wang & Kim, (2019) en su revisión de las aplicaciones de las nubes de puntos en la industria de la construcción define a las nubes como “El conjunto de datos/puntos en un sistema coordenado 3D, los cuales están definidos por sus coordenadas X, Y, Z y son usualmente utilizados para representar la superficie externa de un objeto” (ver Figura 5)

Figura 5 Nube de puntos de puente histórico generada a partir de tecnología Lidar y fotogrametría. Elaboración propia.

Si bien existen diversas variaciones de la misma definición, todas coinciden en que son un conjunto de puntos cuyas coordenadas describen las características geométricas de un objeto real, los cuales se utilizan como una “copia” tridimensional digital del mismo. Como ya se había mencionado, debido a su gran potencial las nubes de puntos en la actualidad son utilizadas por una amplia gama de campos de conocimiento e industrias que van desde campos generales como la física, la biología y la geología hasta industrias específicas como las relacionadas a la militar, la arqueología y sobre todo la industria de la construcción (Mostafa, 2014).

La posibilidad de implementar nubes de puntos en trabajos de medición de alta complejidad a diferentes escalas es una cualidad principal que permite su adaptación a diversos campos del conocimiento. En la Figura 6 se presenta la comparación de diversas técnicas de medición, tomando como referencia el número de puntos medidos por objeto y el alcance de las dimensiones evaluadas. Como se

observa, las técnicas de escaneo láser y fotogrametría, principales métodos para generar nubes de puntos, pueden obtener mediciones en un rango desde 0.1 metros hasta 100 km. Además, estas técnicas permiten registrar un número considerable de puntos, que varía desde 100 hasta más de un millón por objeto representado.

Dada la gran utilidad que tienen las nubes de puntos para representar las

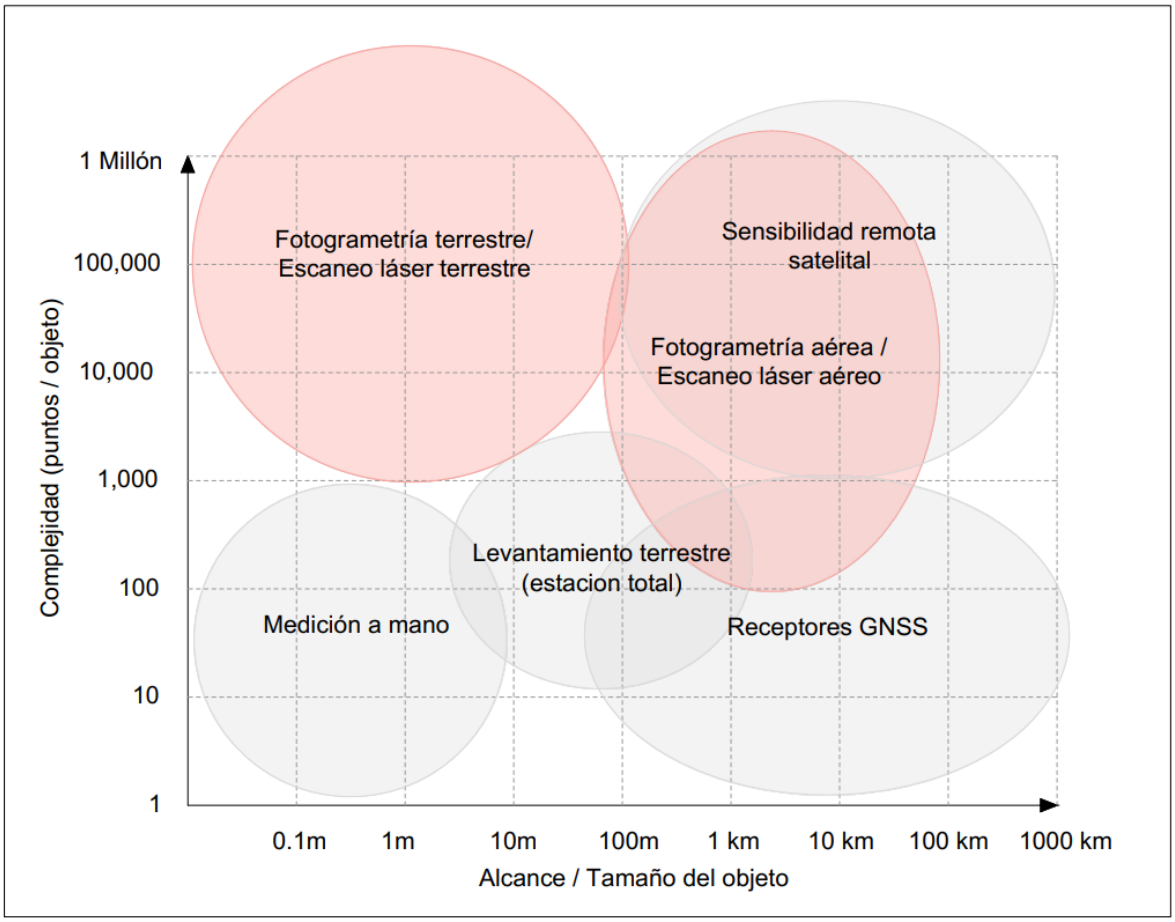


Figura 6 Comparación de diferentes técnicas de medición contra técnicas de generación de nubes de puntos. Recuperado de (Barber & Mills, 2011).

morfologías existentes se les han permitido desempeñar diversas funciones en la industria de la construcción, de entre las cuales se destacan: la reconstrucción de modelos 3d de edificios existentes, la inspección de la calidad de los trabajos en obra, la identificación de potenciales peligros en sitio, la inspección de calidad de edificios, la automatización en la construcción, el análisis de desempeño energético de edificios, la medición de deformaciones de elementos construidos entre otras. (Wang et al., 2020).

Algunos de los beneficios más destacables obtenidos de la aplicación de esta tecnología son la mejora de productividad en los levantamientos de edificios o terrenos, mejoras en la calidad de los entregables generados, mejora en los procesos de revisión de seguridad en los sitios de construcción, mejora de la eficiencia de los procesos relacionados a la gestión de las instalaciones de los edificios, mejora de la calidad y eficiencia en los procesos de renovación de edificios, etc. (Wang & Kim, 2019). Dado su potencial no es de extrañarse la importancia que tienen en la actualidad los estudios e investigaciones que han abordado la implementación de esta tecnología en las diferentes practicas

Figura 7 Gráfica de líneas mostrando el número de publicaciones por año, relacionadas a la implementación de algoritmos relacionados al procesamiento de nubes de puntos en la industria de la construcción. Recuperado de Scopus (2024).

especificas ejercidas por los campos de la arquitectura, la ingeniería y geomática mismos que han presentado un aumento considerable en los últimos años.

Ahora bien, aunque la utilización de las nubes de puntos en la industria de la construcción ha permitido generar avances en múltiples áreas de aplicación, su implementación ha requerido a su vez la integración de metodologías y flujos de trabajos específicos. Las metodologías generadas abarcan los procedimientos necesarios que van desde la captura de los datos para la generación de las nubes de puntos hasta su procesamiento y análisis de la información. En general estos procedimientos han sido un tema desarrollado ampliamente por la literatura en donde algunos autores como Wang et al., (2020) los han ordenado y sintetizado en un flujo de trabajo compuesto por 6 fases principales:

1. Adquisición / captura de datos

2. Limpieza de la información
3. Registro de la información
4. Segmentación de la información
5. Reconocimiento de objetos
6. Obtención de resultado deseado

La importancia de los procesos descritos por Wang et al., (2020) es que no sólo permiten entender la forma y lógica con la que funciona esta tecnología, sino que también permiten vislumbrar las limitantes con las que esta cuenta y las problemáticas con las que los profesionistas se podrían encontrar al momento de implementarlas en situaciones reales. En otras palabras, al ser una tecnología relativamente reciente existen en ella limitantes que solamente han sido abordadas por el estado del arte de la percepción remota y que por ende no se han concretado en herramientas terminadas orientadas a la industria de la construcción. Entender cada uno de los pasos será esencial para poder implementar la tecnología de forma exitosa en los escenarios específicos planteados por el campo de trabajo.

Cabe agregar que en el flujo trabajo descrito, las fases de segmentación de la información y reconocimiento de objetos tienen una mayor variabilidad en los métodos de procesamiento. Esto es debido a que en estas fases las técnicas de procesamiento tienen como principal objetivo la obtención de información específica, relativa a las actividades que se busca realizar. En la industria de la construcción estas actividades pueden abarcar una amplia gama de objetivos, como la documentación geométrica de un edificio, el análisis estructural de una fachada o un análisis energético.

Si bien todos pueden utilizar las nubes de puntos como herramienta para la obtención de información existente, el procesamiento de los datos variará de acuerdo al objetivo concreto de su implementación. Este punto tiene su relevancia cuando se entiende que al implementar esta tecnología en un análisis tan específico como lo es el propuesto por la NOM-008-ENER-2001, se requerirá el procesamiento de la información de acuerdo a las necesidades de la norma.

Mas adelante se abordarán los métodos de la segmentación de la información y reconocimiento de objetos en investigaciones análogas a la documentación geométrica de las fachadas y al análisis energético de las envolventes (temas cercanos a la NOM-008-ENER-2001), en donde el procesamiento de datos estará estructurado por algoritmos con objetivos y funciones específicas.

Flujo de trabajo para el procesamiento de las nubes de puntos

Adquisición

El primer paso del flujo de trabajo descrito es la adquisición de datos, el cual de forma general consiste en obtener la información necesaria del objeto o sitio para la creación de la nubes de puntos; en la actualidad existen varios métodos que permiten obtener dicha información contemplando diferentes instrumentos y flujos de trabajo. Hasta el momento los métodos documentados que se han utilizado son: Escaneo 3D láser, fotogrametría, videogrametría, RGB-D cámara y estéreo cámara. (Wang et al., 2020). Cabe destacar que, aunque cada método es capaz de generar las nubes de puntos éstos tendrán aplicaciones específicas dependiendo de variables como la escala del objeto, la exactitud requerida, los tiempos de trabajo, costo, etc. Debido a estas diferencias en la actualidad la industria de la construcción ha recurrido principalmente al escaneo 3D láser y la fotogrametría para la obtención de la nubes en proyectos relacionados a la arquitectura, ingeniería y geomática; estos métodos se han desarrollado ampliamente en la última década y se ha generado un mercado que contempla la comercialización especifica de la instrumentación, softwares, sensores y accesorios. Dicho lo anterior se buscará en el presente documento explicar en términos generales el funcionamiento de los escáneres 3D láser, así como también de la fotogrametría.

Escáneres 3D láser- LIDAR

Respecto a los escáneres 3D láser, éstos se definen como dispositivos láser terrestres o aéreos con la capacidad de capturar las coordenadas 3D de un objeto o superficie de manera automática y sistematizada a una taza muy elevada, obteniendo resultados prácticamente en tiempo real (Barber & Mills, 2011). Estos dispositivos funcionan a través de la toma de miles de mediciones generadas por el láser de un sensor en las cuales se estima la distancia existente entre el objeto a escanear y el sensor del dispositivo, el ángulo azimutal de la medición y el ángulo de elevación respecto al propio dispositivo. La combinación de distancia, ángulo azimutal y ángulo de elevación de cada medición le permiten al dispositivo generar un conjunto de puntos referenciados a coordenadas (X, Y, Z) los cuales al ser integrados en el mismo sistema local generan la nube de puntos (Wang & Kim, 2019). Cabe agregar que este tipo de tecnología se le denomina con el acrónimo LiDAR por sus siglas en inglés “*Light Detection and Ranging*” lo cual se podría traducir como “sistema de medición y detección de objetos mediante laser”. (¿Qué

son los datos LIDAR?-ArcMap | Documentación, s. f.). Este proceso para la generación de las nubes de puntos tiene como variable principal el dispositivo o sensor de medición con el cual se hace (ver Figura 8).

Existen en la actualidad 2 principales métodos que les permiten a los escáneres LIDAR estimar la distancia entre el sensor y la superficie a escanear:

- Método del tiempo de vuelo
- Método de cambio de fase

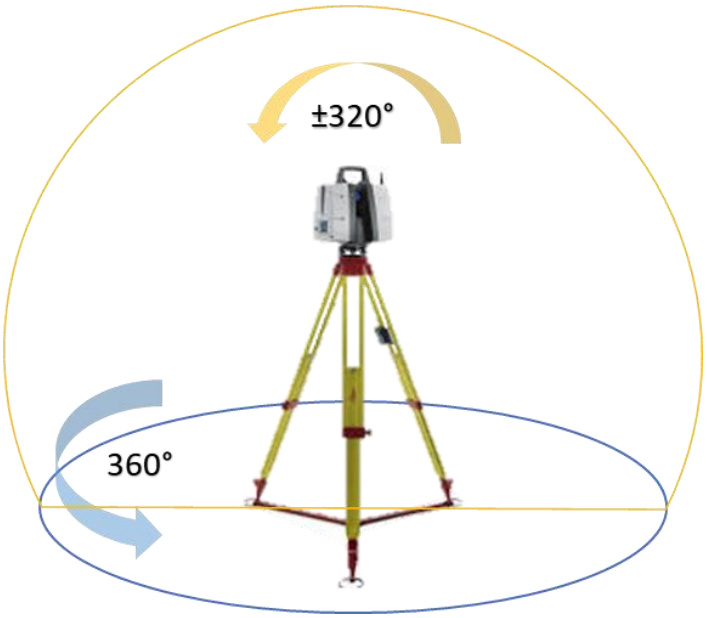


Figura 8 Principio operativo de un escáner terrestre láser. La base del escáner genera un movimiento azimutal de 360° mientras el haz de luz laser cubre aproximadamente 320° de ángulo vertical Elaboración propia.

El método de tiempo de vuelo como su nombre lo indica, estima el tiempo que tarda un haz de luz emitido por el dispositivo en tocar una superficie escaneada y en regresar al sensor, conociendo la velocidad del haz de luz esta metodología le permite al dispositivo calcular la distancia que existe entre el mismo y el objeto escaneado. Por otra parte, los escáneres que utilizan el método de cambio de fase envían desde el dispositivo de escaneo una señal de luz con una longitud de onda determinada, la onda al tocar el objeto o superficie escaneada regresa al dispositivo con una diferencia de fase respecto a la onda inicial, al conocer la longitud de onda y la diferencia de fase el dispositivo calcula la distancia a la cual se encuentra el objeto escaneado. (Wang et al., 2020). Los dispositivos LIDAR más modernos funcionan primordialmente con la metodología de cambio de fase debido a su mayor exactitud respecto a la de tiempo de vuelo (ver Figura 9).

Por otra parte, otro de los factores principales que diferencian a los productos comerciales de escaneo 3D en la actualidad es su respectiva plataforma de trabajo, la cuál puede ser terrestre fija (parecida a las bases de las estaciones totales utilizadas en trabajos de topografía), aérea (drones o helicópteros) o móvil terrestre (autos, trenes, entre otros). La diferencia en la plataforma utilizada en el proceso de

escaneo puede generar usos específicos debido a su capacidad para impactar considerablemente la escala del proceso de medición; un ejemplo de esto es que los dispositivos aéreos son utilizados primordialmente en levantamientos topográficos caracterizados por la medición de superficies cuyas magnitudes abarcan varias hectáreas de dimensión, que en comparación a los dispositivos fijos terrestres se utilizan en trabajos de arquitectura o ingeniería en donde los principales objetos escaneados son edificios comerciales o industriales cuyas superficies se encuentran normalmente por debajo de los 100 metros. Algunos parámetros secundarios encontrados en la literatura que influyen en el proceso de la toma de datos a partir de tecnología LIDAR son: el rango de distancia neta que tienen los dispositivos, rango de exactitud, tiempo de escaneo, patrón o tipo de escaneado, etc. Cabe destacar que todas las variables descritas incluyendo el método de medición de tiempo están dadas por el dispositivo de medición, por lo que el dispositivo LIDAR con el que se realiza la medición será la variable principal que determinará las características de las nubes de puntos obtenidas.

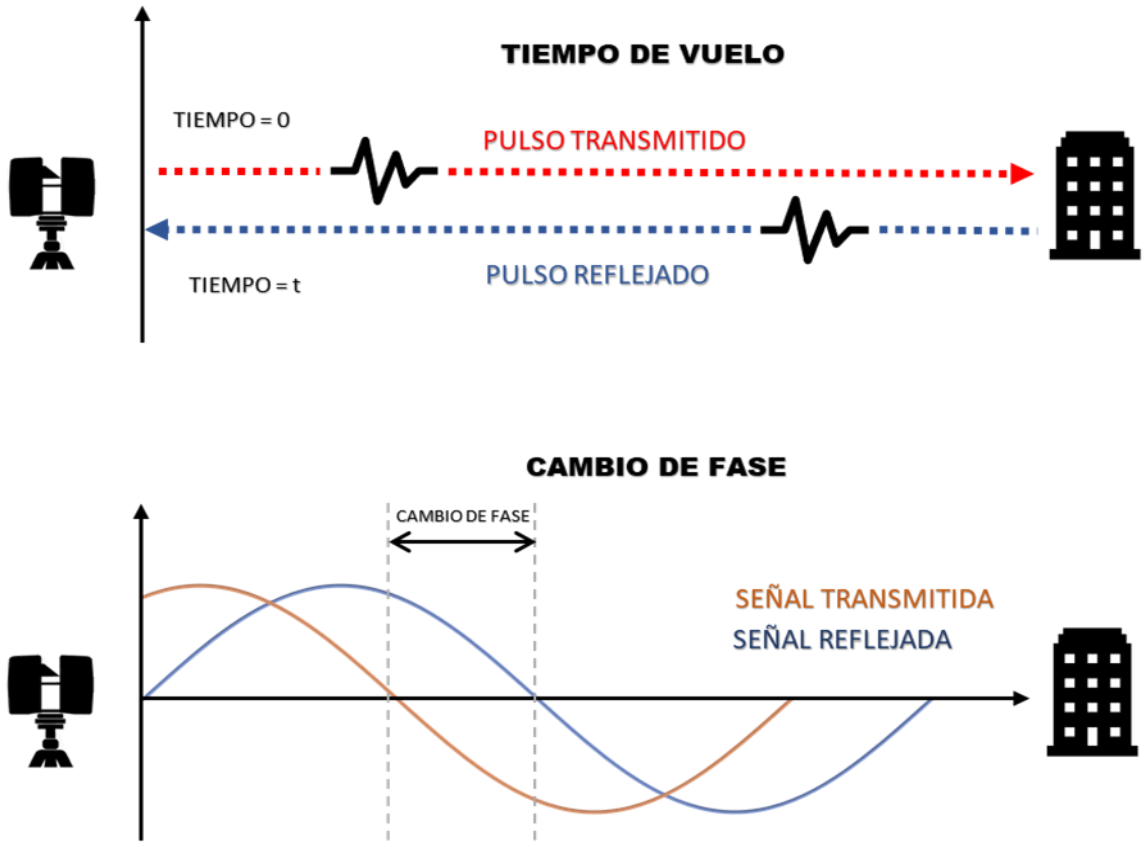


Figura 9 Comparación esquemática entre la medición por el método de tiempo de vuelo y el cambio de fase. Elaboración propia.

Fotogrametría

Respecto a la fotogrametría, la Sociedad Americana de Fotogrametría y Sensibilidad Remota la ASPRS por sus siglas en inglés, la define como “El arte, ciencia y tecnología para obtener información confiable de objetos físicos y sus ambientes a través de los procesos de captura, medición e interpretación de imágenes fotográficas y patrones de fenómenos electromagnéticos capturados” (*ISPRS - Historical Background*, s. f.). La definición anterior en términos simplificados la podríamos resumir en la medición de objetos a través de imágenes; si bien este proceso tiene la capacidad de generar nubes de puntos también es conocido por producir otro tipo de entregables como mallas 3D, modelos digitales de terreno, ortoimágenes, etc. (Firzal, 2021).

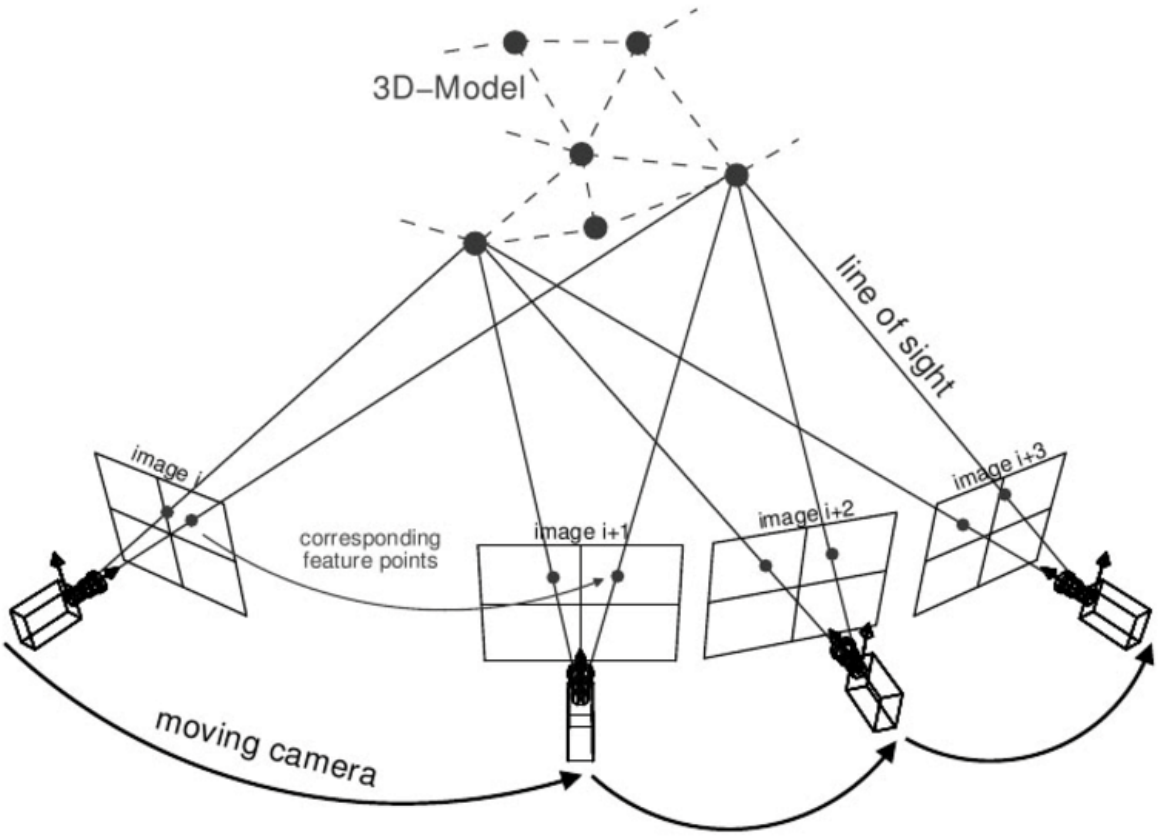


Figura 10 Imagen descriptiva del proceso de generación de una nube de puntos a través del proceso de fotogrametría. Recuperado de (Sweeney et al., 2015)

En esencia este proceso funciona a través de la proyección tridimensional en el espacio de un conjunto clave de puntos contenidos en un juego de fotografías. A través de la comparación de los mismos puntos entre diversas fotos se calibra la posición de éstos en el espacio. Para el cálculo de la proyección de los puntos se

utilizan los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara, los cuales describen tanto las características físicas de la fotografía, como las características de la cámara (ver Figura10).

La principal diferencia que existe entre la fotogrametría respecto a los escáneres LIDAR es que, en la primera las nubes de puntos son generadas a partir de un proceso de interpretación de imágenes y no un proceso de medición en sitio como tal. Es decir, mientras que un sensor LIDAR utiliza tecnología láser para hacer múltiples mediciones de un objeto para posteriormente representarlas de manera cartesiana en una nube de puntos, el método de la fotogrametría obtiene la nube de puntos de una superficie u objeto a través del procesamiento de un conjunto de fotos. Aunque ambos procesos difieren del método de generación y procesamiento, el producto resultante es similar. Cabe destacar que la medición LIDAR depende completamente del dispositivo utilizado mientras que la fotogrametría depende en su mayor parte de las imágenes y el procesamiento de las mismas.

Puesto que las imágenes son la información base para la generación de las nubes de puntos a través del proceso de la fotogrametría, las características de las mismas influirán directamente en el resultado obtenido. A diferencia de los dispositivos LIDAR en donde las características técnicas del escáner determinan primordialmente las características de la nube, en la fotogrametría las imágenes y el programa de procesamiento serán las principales variables principales a considerar.

Puesto que la fotogrametría recurre a la fotografía para la obtención de las imágenes del objeto o superficie a reproducir, las características de las fotos se comportan a su vez como variables independientes que influyen en la nube generada. En el dominio de la fotografía el tamaño del sensor, la resolución, la distancia focal, la velocidad de obturador, la sensibilidad de luz de la película (ISO), así como el dispositivo de captura son factores que determinan las cualidades de una foto. Algunos programas con la capacidad de generar las nubes de puntos a partir de la fotogrametría (como es el caso de Agisoft Metashape) incluyen en sus manuales de implementación las características físicas y requerimientos que deben de tener las fotos para obtener un resultado adecuado. (Agisoft LLC, 2023).

Respecto al procesamiento de las fotos, la mayoría de los programas comerciales utilizados en la actualidad requiere de 2 subprocesos o pasos principales. El primero de estos es el proceso de alineación en el cual se importan las imágenes obtenidas y a través de la comparación de las mismas determina la posición relativa de cada una de ellas respecto a las demás, este paso es importante

ya que en él se agrega información específica tomada en sitio (obtenida a través de procesos convencionales de medición) para controlar el grado de exactitud o posición de la nube, normalmente en este paso se genera una nube de puntos preliminar que reflejará toda la información introducida y que servirá como estructura para generación del producto final. Algunos datos que son introducidos en esta fase son:

- Posicionamiento de puntos de control estratégicos del modelo. A los cuales se les agrega información que servirá como control del modelo de nube de puntos; un ejemplo de esta información es la localización geográfica de los puntos en el caso de un modelo de una superficie terrestre o la localización de puntos en común entre las fotos importadas en el caso de modelos con morfologías complejas o repetitivas.
- Parámetros de alineación como la cantidad de puntos clave utilizados en cada imagen para su alineación, la exactitud del modelo, las variables físicas de la foto, el método de selección y ordenamiento de imágenes, etc. (Agisoft LLC, 2023).

Terminado el proceso de alineación los programas tienen la capacidad de reportar el grado de exactitud/error del modelo y permiten la modificación de los parámetros para su posible realineación. Una vez que el modelo preliminar cumple con los criterios de exactitud se procede a la generación de nube de puntos densa en donde se “rellenan” los espacios de la nube preliminar con puntos adicionales dando como resultado la nube de puntos final (ver Figura11).

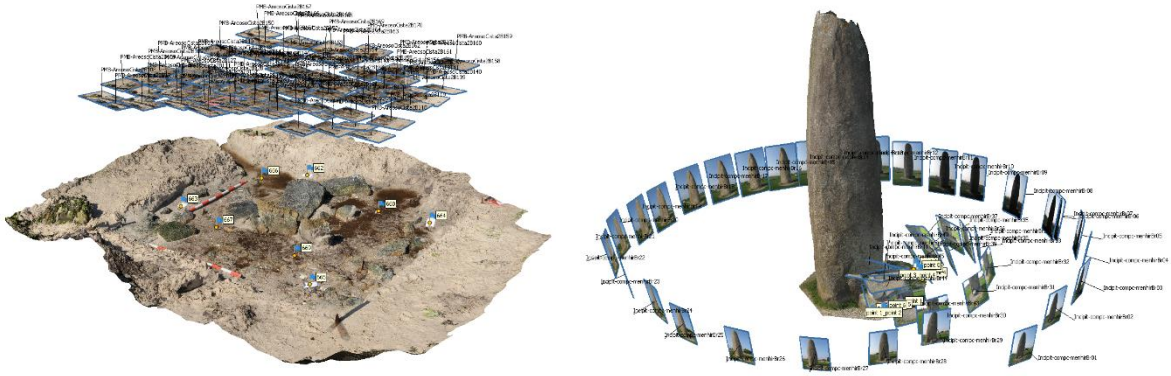


Figura 11 Ejemplo de un modelo de una superficie y un monumento generados a través de la fotogrametría. Elaboración propia.

Parecido a la metodología que utiliza dispositivos LIDAR, en la fotogrametría se pueden utilizar distintos tipos de bases de trabajo, sean estas aéreas (a partir de la utilización de drones) o terrestres cada una con aplicaciones específicas.

Comparación

Si bien ambas técnicas coinciden en diversos campos de aplicación como la geociencia, la ingeniería estructural, la arqueología, la documentación histórica, inspección de edificios y representación arquitectónica (Firzal, 2021); en la práctica son las características específicas de cada situación las que determinan cual tecnología es la más apta a implementarse. Algunos trabajos han analizado las ventajas y desventajas de la implementación de estas tecnologías considerando aspectos de costo, tiempo de procesamiento, exactitud, complejidad de proyecto, portabilidad, nivel de detalle, etc. (Aerial, 2022; Baltsavias, 1999; *Photogrammetry vs. LIDAR: What Sensor to Choose for a given Application*, 2023; Segarra, 2023; Skarlatos & Kiparissi, 2012).

En términos particulares tenemos que:

- Ambas tecnologías mantienen unos niveles parecidos de exactitud, sin embargo, la metodología de la fotogrametría a comparación de los dispositivos LIDAR requiere de niveles óptimos de iluminación para obtener resultados correctos, así como de un correcto manejo del software de procesamiento de imágenes. Por otra parte, la tecnología LIDAR está condicionada por la densidad de la nube generada por lo que también influye mucho las capacidades propias del dispositivo o sensor utilizado.
- En la realización de levantamientos a través de plataformas aéreas ambas tecnologías comparten la misma capacidad de alcance sin embargo la fotogrametría está limitada en que solo podrá capturar aquellas superficies visibles mientras que los haces de luz de la tecnología LIDAR tienen la capacidad de traspasar objetos de baja densidad capturando una mayor cantidad de información. El follaje vegetal es uno de los objetos que la tecnología LIDAR tiene la capacidad de penetrar en comparación a la fotogrametría.
- Los dispositivos LIDAR terrestres requieren en sitio de flujos de trabajo de mayor duración; comparado con la fotogrametría cuyo trabajo en sitio consiste primordialmente de la captura de imágenes del objeto a reproducir.
- Los dispositivos LIDAR tienen la capacidad de generar nubes de puntos de manera automatizada sin la necesidad de mano de obra altamente especializada en contraste para el procesamiento de imágenes en la

fotogrametría se requieren conocimientos de los programas específicos de esta rama aunque cabe recalcar que en los últimos años las compañías encargadas de generar los programas de procesamiento de imágenes han reducido y simplificado a tal grado el flujo de trabajo que no se requiere de tanta especialización por parte del usuario al mismo tiempo que existe una mejor asistencia técnica en el tema.

- La fotogrametría en comparación a los dispositivos LIDAR requiere de amplios tiempos de procesamiento para la generación de las nubes de puntos, lo cual alarga sus flujos de trabajo. Al requerir los procesos extras de alineación, generación de nube preliminar, recalibración y generación de nube densa, el tiempo de procesamiento computacional es mayor en la fotogrametría en comparación al LIDAR que al terminar sus mediciones exporta la nube de puntos sin necesidad de procesos adicionales.
- La fotogrametría tiene la capacidad de capturar un mayor número de detalles de los modelos existentes, reproduciendo los colores e incluso las texturas de los mismos, información que puede ser extremadamente relevante al momento de generar gemelos digitales; si bien los dispositivos LIDAR tienen la capacidad de agregar información RGB a sus modelos se requieren de procesos adicionales que no llegan a cubrir el alcance de la fotogrametría.
- Los costos de la utilización de dispositivos LIDAR son mucho mayores a los de la fotogrametría los cuales llegan a ser el doble o el triple de esta última. Esto es debido a que los sensores son muchos más cotosos que las cámaras fotográficas necesarias para obtener las imágenes.
- La fotogrametría no está pensada para generar levantamientos de interiores arquitectónicos, por lo cual se busca que esta siempre tenga una perspectiva “externa” del objeto a reproducir. Debido a esto existe predominancia en la industria de la construcción por utilizar dispositivos LIDAR en los levantamientos de índole arquitectónica e ingenieril.
- Una de las mayores ventajas de la fotogrametría es su adaptabilidad a proyectos multiescalares lo cual en comparación es difícil para la tecnología LIDAR la cual requiere de escáneres 3D específicos para diferentes rangos de escala.

Limpieza de la información

Debido a la existencia de múltiples variables en los procesos de captura de datos (como los dispositivos usados para la captura de la información, la cantidad de luz existente en el sitio o la reflectividad de los materiales) es muy común que la

información sin procesar de las nubes de puntos contengan grandes cantidades de datos corruptos o también conocidos como datos de ruido; éstos se caracterizan por ser datos distorsionados o con carencia de sentido que dificultan o impiden el procesamiento correcto de la información disminuyendo la eficiencia o la exactitud de los algoritmos. La eliminación o separación de los datos ruido en una nube de puntos es un proceso conveniente debido a su capacidad de facilitar el manejo de la información digital, evitar errores de procesamiento e inexactitudes y adicionalmente de disminuir la cantidad de información contenida en un mismo archivo, cabe recalcar que las nubes de puntos se han caracterizado por requerir grandes cantidades de almacenamiento digital y por ende grandes cantidades de procesamiento computacional, esto debido a que un solo escaneo 3D puede llegar a contener alrededor de 40,000,000 de puntos de los cuales un cierto porcentaje corresponderá a ruido (ver Figura 12).

El filtrado y eliminación de los datos ruido se logra a través de procedimientos algorítmicos iterativos los cuales utilizan una serie de parámetros preestablecidos para su identificación y eliminación. Si bien la investigación de los procesos de eliminación de ruido es un campo con décadas de desarrollo, en la actualidad no existe un método único para la limpieza de la información y los procesos existentes están enfocados en el filtrado tomando en cuenta objetivos específicos

Figura 12 Ejemplo de ruido en una nube de puntos generada por fotogrametría. Elaboración propia

Es posible clasificar a los algoritmos de filtrado a partir del tipo de ruido que se quiere eliminar como el ruido de generado por la mezcla accidental de pixeles (lo cual ocurre cuando un haz de luz del escáner 3D se divide y produce lecturas falsas), el ruido existente del recubrimiento de superficies, el ruido de “sal y pimienta” (generado por la dispersión de pixeles blancos y negros en la imagen), el ruido generado por inconsistencias de los escaneos, etc. (Wang et al., 2020). El estado del arte nos ha mostrado diferentes aproximaciones utilizando diferentes métodos y estrategias de entre las cuales destacan aquellas basadas en procedimientos estadísticos, procedimientos basados en métodos de Kernel, métodos de reconstrucción geométrica, aprendizaje automático, inteligencia artificial, etc., (Gao et al., 2022; Rakotosaona et al., 2019). Si bien la generación de procesos que permitan el filtrado

del ruido es un campo competente a las ciencias de la computación, podemos encontrar algunas metodologías implementadas en herramientas comerciales orientadas a la gestión de las nubes de puntos como Autodesk Recap, Leica CYCLONE, Metsahpe, etc.

Cabe destacar que algunas de las características en común que se buscan de estos algoritmos son: la capacidad de obtener un balance adecuado entre la eliminación de la información corrupta y la conservación de la información útil (esto debido a que es normal que dentro de los procesos de eliminación el algoritmo reconozca como información corrupta a datos útiles no corruptos), la capacidad de los algoritmos para operar de manera autónoma es decir que no requieran información adicional o específica de las características de las superficies o de los objetos escaneados, la capacidad de actuar independientemente de las cualidades propias de la nubes de puntos y finalmente la capacidad de identificar y conservar la información útil incluso en situaciones en donde no exista datos ruido (Rakotosaona et al., 2019).

Registro de la información

Puesto que la captura de una geometría existente puede llegar a requerir la unión de múltiples nubes de puntos especialmente cuando la morfología corresponde a un edificio o a alguna construcción de escala similar, existe la necesidad de alinear o referenciar la información de las diferentes nubes a un único y mismo sistema de coordenadas con la finalidad de obtener un conjunto total de datos que contenga toda la información del modelo; este proceso de alineación y referencia se le conoce como registro de la información (Barber & Mills, 2011).

El proceso de registro de la información se realiza a través de la referenciación de los puntos en común que tienen 2 o más nubes diferentes. Uno de los métodos más destacados consiste en la referenciación de puntos clave o de control; estos puntos dada su localización permiten estructurar al conjunto de datos total y tienen la capacidad de dotarle a la nube una ubicación, escala y orientación determinadas. Dada la importancia que tienen los puntos de control en el proceso de registro, en la actualidad es común la utilización de blancos especializados los cuales permiten a los programas de procesado de datos su reconocimiento y alineación automática. La utilización metodologías y herramientas complementarias es necesaria dependiendo de los requerimientos propios de cada estudio; por ejemplo, para la

medición y ubicación de los puntos de control se pueden utilizar estaciones totales y para su geolocalización tecnología GPS o GNSS.

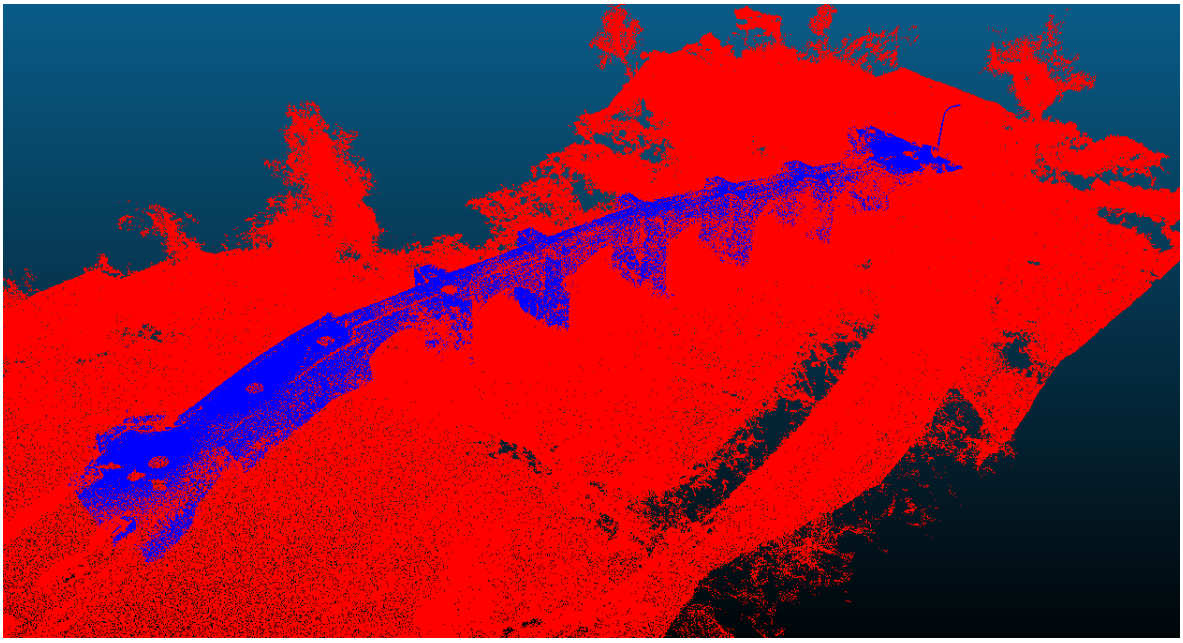


Figura 13 Ejemplo de 2 nubes de puntos registradas. La nube de puntos general (roja) fue generada con fotogrametría aérea mientras que la nube más pequeña (azul) fue generada con un escáner terrestre láser. Elaboración propia

Si bien los puntos de control pueden servir para generar un registro manual de la información este método puede ser susceptible a fallas y por ende se recomienda que sea complementado por procesos de alineación más finos (Wang et al., 2020). En la actualidad la mayoría de los programas orientados al procesado de este tipo de datos contemplan herramientas que permiten al usuario registrar de manera automática o semiautomática la información utilizando distintos algoritmos los cuales en comparación logran resultados mucho más finos. Estos procesos funcionan a partir del cálculo de la posición relativa que tienen las nubes de puntos entre sí permitiendo que entre ellas exista la mayor coincidencia posible de puntos, a diferencia del registro a partir de puntos clave, este proceso utiliza toda la información contenida en las nubes para determinar la mejor posición (trabajo imposible de realizar de manera manual). Uno de los algoritmos más conocidos para el registro fino de la información es el ICP por sus siglas en inglés “Iterative Closest Point” (Biham, 2022) (ver Figura 13).

Segmentación de la información

Para este punto del flujo de trabajo se tiene una nube de puntos que describe la geometría total del objeto y filtrada en su mayor parte del ruido o información

corrupta contenida en los datos originales. El siguiente paso es la segmentación de la información la cual es descrita como “Un proceso en el cual los puntos que tienen características similares son clasificados como pertenecientes a un segmento homogéneo” (Martínez et al., 2012). De acuerdo con diversos autores los segmentos obtenidos de este proceso son homogéneos debido a que la información (puntos) contenida en ellos satisface criterios predefinidos como su pertenencia a un mismo plano o geometría, densidad, orientación, reflectancia, intensidad, propiedades espectrales, etc., (Zhao et al., 2018; Zolanvari et al., 2018) (ver Figura 14).

En la literatura un gran número de investigaciones se han centrado en la generación de procesos algorítmicos que permitan la segmentación de las nubes de puntos a partir de criterios preestablecidos, la importancia de esto yace en que la clasificación de los puntos a través de procedimientos manuales requiere una inversión considerable de tiempo y no garantiza una precisión adecuada. No obstante, los avances que se han hecho en la materia, existen hoy día múltiples técnicas de segmentación las cuales en la literatura se han adaptado para responder a aplicaciones específicas.

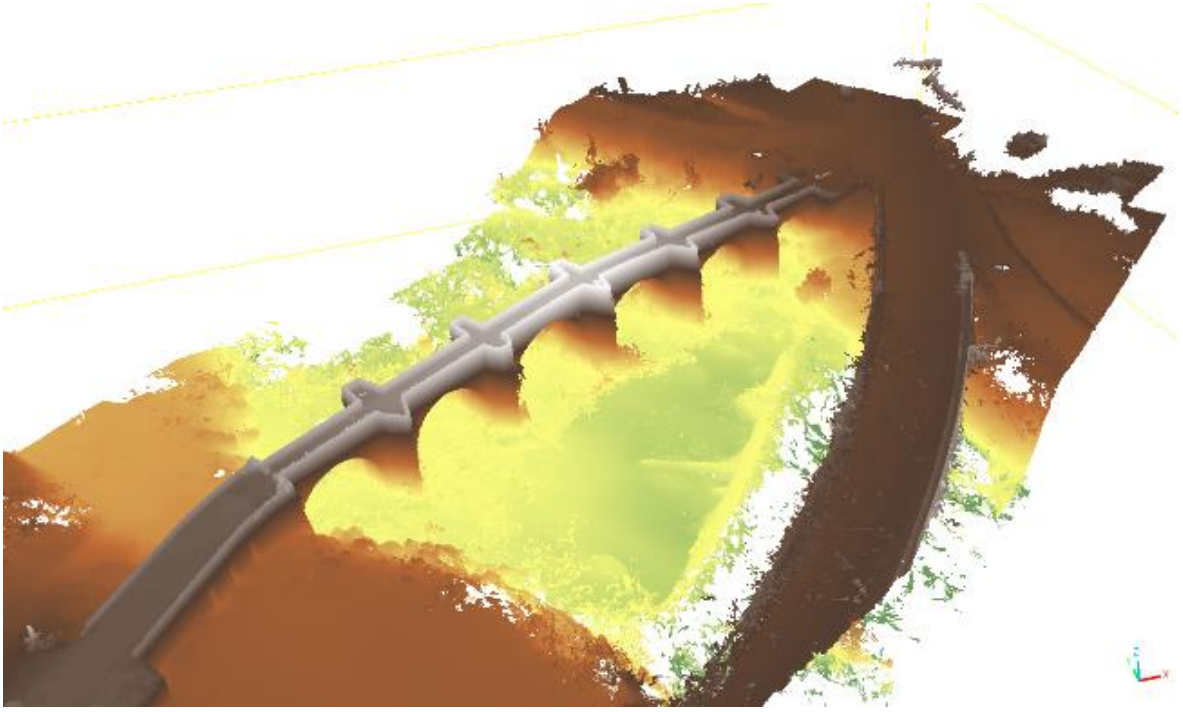


Figura 14 Ejemplo de un proceso simple de segmentación y clasificación de los puntos a partir de su altura. Elaboración propia

Si bien es cierto que la generación de algoritmos relacionados a la segmentación de nubes de puntos corresponde al campo de visión por computadora

(Gonzalez & Woods, 2018), la mayoría de los programas de gestión de nubes orientados a los profesionistas de la construcción contemplan el uso de herramientas que les permiten segmentar las nubes de acuerdo a ciertos parámetros y objetivos determinados. Aunque en la literatura ha existido diferentes aproximaciones para la segmentación automática de los datos, existen 3 métodos en común de los cuales parten las propuestas de investigación, estos métodos son:

- Método de ajuste de modelo
- Método de crecimiento regional
- Método basado en agrupamiento

(Klimkowska et al., 2022; Martínez et al., 2012; Vosselman et al., 2003; Zhao et al., 2018; Zolanvari et al., 2018).

Respecto al método de ajuste de modelo, es un método que busca la clasificación de los puntos utilizando formas o geometrías primitivas como base de la segmentación (planos, cubos, cilindros, etc.); los algoritmos pertenecientes a este grupo calculan las normales de los puntos que conforman la nube y determinan el plano que mejor considerando un rango de aceptación; los planos determinados les permiten detectar geometrías sencillas mismas que servirán como criterio para la clasificación. El algoritmo más utilizado de esta clasificación es el RANSAC por sus siglas en inglés “Random Sample Consensus”, y ha sido el algoritmo base para la generación de investigación en materia de clasificación. Si bien esta aproximación ha demostrado ser valiosa por su capacidad de procesar grandes cantidades de datos se encuentra ampliamente limitada debido a su incapacidad de clasificar de manera correcta superficies de morfología compleja, de igual modo esta metodología se ve afectada proporcionalmente por la densidad de los puntos, la exactitud y la cantidad de ruido contenido en la nube, su aplicación ideal es ante la existencia de objetos de morfología “simple”. (Martínez et al., 2012)

El método de crecimiento regional se define como aquel proceso que clasifica a las unidades o grupos de estas en regiones de mayor tamaño a partir de un criterio predefinido para su expansión. Al principio el algoritmo selecciona un dato base o “semilla” cuyos parámetros le permitirán establecer su semejanza con aquellos puntos colindantes, el crecimiento iterativo de la selección es lo que le da el nombre a esta metodología. (Zolanvari et al., 2018). Algunos autores que han utilizado esta aproximación son Pu & Vosselman (2006, 2009) en sus trabajos de segmentación de nubes a partir de la generación de superficies base o “seed surfaces” y la clasificación de los puntos a través de criterios de proximidad, planaridad y desviación angular de normales. Otro ejemplo es el generado por Belton & Lichti

(2006), el cual utiliza la varianza de la curvatura de las superficies para clasificar los puntos y segmentar los componentes de la nube.

Respecto a la segmentación por agrupamiento tenemos que ésta se define como la agrupación basada en las características directas de los puntos, como su posición en el espacio tridimensional, la normal estimada de acuerdo a un número determinado de puntos vecinos, color, reflectancia, etc.; la diferencia primordial de esta metodología respecto a la de crecimiento regional es que no se necesita la selección de puntos base para iniciar la clasificación; sin embargo, dependiendo del tamaño de la nube analizada puede llegar a ser costosa en términos computacionales (Zolanvari et al., 2018). Una de las investigaciones que utiliza esta metodología es la de Filin & Pfeifer, (2006), la cual busca clasificar diferentes tipos de superficies (boscosas, vegetación baja y superficies planas) a través de parámetros como la posición de los puntos, la diferencia relativa de altura entre los mismos y los parámetros obtenidos de un plano tangente.

Reconocimiento de objetos

Florent Poux (2019) en la introducción de su tesis doctoral de ciencias de la Universidad de Liege “The Smart point cloud” explica cómo la representación semántica es uno de los principales desafíos contemporáneos a los cuales se enfrentan los sistemas de representación tridimensional destacando entre ellos a las nubes de puntos.

Si bien la tecnología Lidar en la actualidad tiene la capacidad de representar a detalle milimétrico las morfologías de nuestro alrededor, en su mayoría el proceso de interpretar y extraer la información relevante contenida en las nubes es aún realizado de forma manual por las personas; esto es un inconveniente debido a la gran cantidad de tiempo y mano de obra especializada necesaria para la realización de dicha tarea. En este proceso manual la nube de puntos es utilizada solo como una referencia tridimensional de la cual se extraen los elementos de interés, como es el caso de muros puertas y ventanas en un levantamiento arquitectónico, vigas o columnas en un levantamiento estructural o tuberías en un proyecto relativo a las instalaciones de un edificio (ver Figura 15.)

Figura 15 Clasificación semántica de una nube de puntos perteneciente a un salón de clases. Recuperado de (Charles et al., 2017).

Para clasificar a los puntos dentro del concepto “muro”, “puerta” o “ventana” se requiere de un procesamiento computacional complejo con la capacidad de emular la manera en la cual nuestro cerebro clasifica y ordena el mundo que nos rodea, de ahí que la semántica en las nubes de puntos (entendiéndola como el campo de conocimiento que dota de significado a las cosas) sea uno de los objetivos principales del estado del arte contemporáneo. De modo parecido a la segmentación de la información, existen diversos procesos algoritmos descritos en la literatura (Wang et al., 2020) que permiten el reconocimiento semántico de objetos dentro de las nubes de puntos, de entre los cuales podemos destacar:

- Descriptores geométricos
- Conocimiento codificado
- Aprendizaje supervisado
- Comparación BIM contra escaneo

Respecto a los algoritmos de descripción geométrica, éstos están diseñados para reconocer estructuras u objetos a partir de su similitud con formas geométricas determinadas, para su funcionamiento se requieren bases de datos que contengan descriptores de forma de los elementos que funcionaran como base para el reconocimiento de los objetos; cabe agregar que los descriptores de forma tienen la función de describir de forma matemática las características específicas geométricas de un objeto. La comparación entre las nubes de puntos y los descriptores de forma permiten el reconocimiento de los elementos.

En el conocimiento codificado los algoritmos utilizan parámetros específicos para determinar si un conjunto de puntos corresponde a un elemento específico; en otras palabras, los parámetros se comportan como reglas que deben de ser cumplidas para que los objetos puedan ser algún elemento especifico, por ejemplo:

- Las paredes de un edificio estarán determinadas por un conjunto de puntos cuyas normales pertenezcan a un plano vertical
- Una ventana debe estar ubicada en un muro, pertenecer un plano vertical y delimitar el interior y exterior del edificio
- Una losa solo puede ser a partir de un plano horizontal o un plano con una pendiente determinada, etc.

Por otra parte, el aprendizaje supervisado utiliza inteligencia artificial para “entrenar” a los algoritmos al reconocimiento de objetos de acuerdo a relaciones topológicas, colores, materiales, etc.

Finalmente, en la comparación BIM contra escaneo; se utilizan las librerías y modelos BIM como referencia y criterio base para la clasificación de los elementos; en este proceso la comparación los parámetros de un determinado conjunto de puntos contra aquellos pertenecientes a un elemento de contenido en la librería BIM determina si éste corresponde al mismo tipo de elemento. Este tipo de clasificación existe en algunos programas de la industria de la construcción y esta normalmente integrado como una herramienta complementaria, un ejemplo de esto son los complementos desarrollados por FARO Technologies Inc. para programas de diseño arquitectónico BIM como Autodesk Revit.

Puesto que todos los escenarios en donde se aplican las nubes de puntos requieren del reconocimiento semántico de objetos, los procesos dedicados a esta área son un componente fundamental para la evolución de la metodología y la generación de resultados más precisos con una menor cantidad de tiempo y mano especializada.

De igual modo que otros algoritmos descritos a lo largo del flujo de trabajo, la generación de este tipo de procesos corresponde a áreas de conocimiento relacionadas a la visión por computadora; sin embargo, en la actualidad se han podido integrar con éxito en aplicaciones orientadas a la industria de la construcción.

Un ejemplo de esto es la aplicación Polycam, la cual esta optimizada para escáneres Lidar integrados a dispositivos móviles; esta aplicación utiliza el sensor Lidar para el escaneo de espacios interiores genera modelos 3D cuyos elementos están clasificados de acuerdo a conceptos básicos de la arquitectura (piso, muro, ventana, puerta, silla etc.) (ver Figura 16).

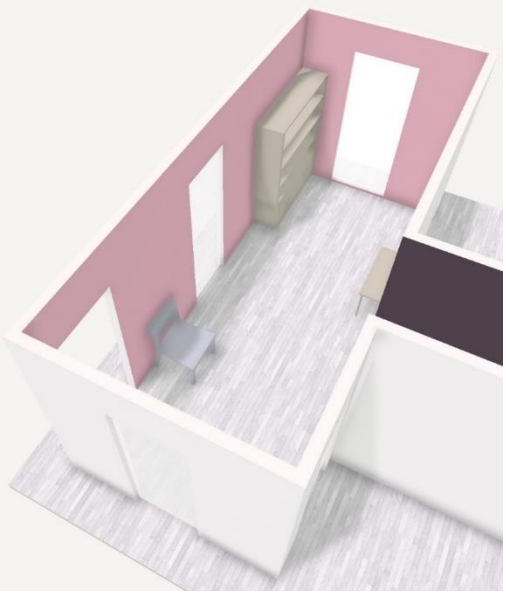


Figura 16 Modelo 3D generado a partir de escaneo 3D Lidar y dispositivo móvil. El modelo fue generado a partir de la aplicación Polycam, se pueden ver claramente diferenciados los elementos como muros, puertas y muebles. Elaboración propia

Algoritmos de implementación específica

Aunque se ha delineado un flujo de trabajo general para el procesamiento de nubes de puntos, es esencial tener en cuenta que existen en la actualidad investigaciones con variaciones del mismo flujo en función a los objetivos particulares de la implementación de dicha tecnología, estas adaptaciones se encuentran particularmente en los procesos de segmentación de la información, así como en los algoritmos de reconocimiento de objetos. Ejemplo de esto son las investigaciones generadas para el procesamiento de nubes enfocadas en tareas relativas al análisis estructural, análisis energético, reconstrucción geométrica, generación de modelos BIM, etc.

La extracción u obtención de información proveniente de los componentes que conforman la envolvente de los edificios (como muros, puertas y ventanas) ha sido una de las áreas de investigación más relevantes en los últimos años. De acuerdo con Klimkowska et al. (2022) esta área de estudio ha experimentado una creciente tendencia en los últimos años, comenzando en el 2007 con algunas cuantas primeras publicaciones abordando el tema, hasta el 2018 con una cantidad de 30 investigaciones acumuladas en el mismo año dedicadas a la misma tarea.

Una de las primeras aproximaciones a la obtención automática de elementos provenientes de las fachadas fue desarrollada por Pu & Vosselman (2006) los cuales propusieron un algoritmo basado en crecimiento regional y conocimiento codificado para la identificación de objetos pertenecientes a la envolvente. En este estudio los autores utilizaron como base la información generada a partir de escáneres terrestres Lidar y sus respectivas nubes de puntos. Los resultados del mismo permitieron clasificar de manera general y sin mucha precisión elementos básicos de la envolvente como el piso, el muro, la ventana y las puertas; cabe destacar que el ejercicio funcionaba solamente sobre fachadas planares y ortogonales en donde los elementos contenidos podían ser descritos con geometrías sencillas como rectángulos o triángulos.

Con un objetivo similar Boulaassal et al. (2009) propuso una metodología que utilizaba una variante refinada del algoritmo RANSAC para la segmentación de los puntos provenientes de un escáner terrestre, a diferencia de la metodología anterior este trabajo buscaba obtener únicamente los bordes de la fachada y sus respectivos elementos. En esta investigación se propuso un algoritmo con la capacidad de generar mallas trianguladas a partir de los puntos segmentados y reconocer de ellas las líneas correspondientes a los bordes de la envolvente, si bien este método permitía establecer las dimensiones de los vanos carecía de la

capacidad de distinguir aquellos correspondientes a las puertas y ventanas de la fachada en cuestión.

Wang & Cho, (2012) por su parte generaron un algoritmo con la capacidad de obtener las poligonales de las ventanas y puertas de las envolventes. Para esto se utilizó un método de segmentación basado en agrupamiento que distinguía a los componentes tomando en cuenta la diferencia de plano o paño que tenían estos respecto al plano de la fachada que los contenía, esta diferencia de plano o paño combinado con los valores de reflexión de los puntos correspondientes a las ventanas permitió clasificar de manera correcta los puntos correspondientes a las puertas y ventanas, finalmente se utilizaron los puntos clasificados para la generación automática de las poligonales. Este trabajo tenía como finalidad integrar a modelos de simulación energética o modelos BEM ("Buiding Energy modeling") la información obtenida del procesamiento de las nubes de puntos.

Una metodología parecida es la propuesta por Gao et al. (2017) la cual tenía la capacidad de detectar los bordes de los componentes de las fachadas a través de la proyección de los puntos capturados a un plano de referencia y la generación de mallas analíticas que permitían establecer relaciones entre la cercanía de los puntos con sus vecinos colindantes; la utilización de las mallas permitió establecer la ubicación de los huecos o vanos correspondientes a las ventanas o puertas de la envolvente. Para dicho proceso se utilizó un algoritmo de crecimiento regional para la segmentación de los puntos de acuerdo a su plano de pertenencia.

Otro método relevante fue propuesto por Zhang et al. (2018) el cual demostró la capacidad de reconocer los componentes de una fachada a partir de la pertenencia de los puntos (de una nube de puntos obtenida con tecnología Lidar) a un plano de referencia particular. Este método utilizó los datos de la normales angulares de los puntos en combinación con la distancia Euclidiana existente entre los mismos para la segmentación de parches de información, mismos que posteriormente serían procesados utilizando el algoritmo de transformación de Hough y un proceso de reajuste coplanar. Los resultados de esta investigación mostraron que el algoritmo propuesto lograba los resultados deseados dentro del margen establecido de precisión mientras que mejoraba la velocidad de procesamiento de otros algoritmos con funcionamientos similares.

Entre algunas de las aproximaciones recientes podemos destacar la de Xu & Stilla, (2019) la cual utilizó voxelización como base para la segmentación, la detección de segmentos planares y la caracterización de los componentes. En contraste Zolanvari et al., (2018) propone un método para detectar los vanos de las

fachadas utilizando un proceso de seccionado de los datos de la fachada (vertical y horizontal) y la reconstrucción geométrica de los elementos a partir de la unión de diferentes perfiles bidimensionales.

Si bien se han mencionado algunas de las aproximaciones más relevantes en la extracción automatizada de datos de las envolventes y reconstrucción 3D a partir de las nubes de puntos, algunas otras investigaciones imbuidas en el tema de eficiencia energética también han abordado el tema de manera secundaria. La relevancia de estos trabajos se encuentra en que se entienden a las nubes de puntos como una herramienta que permite mejorar los resultados de análisis energético propuestos y por ende se adecuan sus métodos y procedimientos a los objetivos particulares de cada trabajo, condición similar al presente estudio en donde se busca la aplicación tecnológica en la NOM-008-ENER-2001.

Un ejemplo de esto es el trabajo de Jochem et al., (2011) en el cual se utilizaron las nubes de puntos para determinar en un conjunto de fachadas las áreas de mejor calidad para la instalación de paneles solares, para esta investigación se utilizó tecnología Lidar móvil terrestre. Uno de los principales retos de esta investigación, fue la clasificación y reconocimiento de las fachadas. Puesto que en ningún momento se planteó poner paneles solares en los huecos de los vanos, el algoritmo creado por este equipo tuvo que ser capaz de reconocer los puntos pertenecientes a una misma fachada y filtrar de esos puntos aquellos pertenecientes a sus vanos. Para esto de utilizó un método de crecimiento regional y un algoritmo de transformación de Hough que permitió la segmentación de los puntos pertenecientes a un mismo plano, una vez clasificados los puntos se obtuvieron las áreas de las fachadas. El análisis de la cualidad de las fachadas para la instalación de paneles solares fue hecho calculando la energía solar obtenida en cada punto de la fachada considerando el promedio anual de la energía obtenida a lo largo del día (kWh/m^2/año); adicional a esto se consideraron las sombras proyectadas por los elementos circundantes. El resultado de esta investigación fue un mapa de energía aplicado a las fachadas en donde el degradado equivalía a la energía anual obtenida en los puntos específicos de la fachada.

Una aproximación particular fue la propuesta por Previtali et al. (2014) el cual propuso un método que utilizaba una versión modificada del algoritmo RANSAC para la segmentación y detección de superficies planares en los edificios. Debido a la imposibilidad del algoritmo RANSAC de clasificar y reconocer los elementos que componen a las fachadas, este trabajo utilizó reglas topológicas que le permitieron clasificar muros, puertas, ventanas, entre otros. Para la validación de la información se generó por métodos convencionales el levantamiento y trazo en CAD de la

geometría de las fachadas y se compararon con las geometrías obtenidas por el método propuesto. Un aspecto importante de esta investigación fue que el método incluía el uso de dispositivos infrarrojos para enriquecer la información dada por las nubes de puntos obtenidas con dispositivos Lidar; esta información aplicada a la nube permitía vislumbrar el comportamiento energético de las fachadas.

Otras investigaciones como las de Garwood et al., (2018), O Donnell et al. (2019) y Wang & Cho (2012) generaron metodologías cuyos algoritmos estuvieron enfocados en la obtención y clasificación de elementos geométricos de las fachadas y su respectiva conversión a archivos legibles para programas de análisis y simulación energética, todo esto a partir de información generada por instrumentos Lidar. En el caso de Garwood et al., (2018) el método generaba de forma automatizada un modelo energético (modelos conocidos como BEM por su siglas en inglés Building Energy Modeling) el cual fue exportado en un formato gbXML debido a la capacidad del formato a importarse en diversas plataformas BIM y programas de análisis energético.

La metodología propuesta por O Donnell et al. (2019) clasifica los puntos pertenecientes a un mismo plano a partir de un algoritmo de crecimiento regional basado en voxeles, luego clasifica los puntos que se encuentran en el perímetro de la fachada y sus vanos para utilizarlos como base para el trazado de las poligonales que dibujen la fachada. Estas líneas trazadas de forma automática le permiten al algoritmo conocer el número de componentes de la fachada, así como sus dimensiones lineales y de área. Finalmente, estos datos se exportan a programas de análisis energético y se estudia el grado de error producido en el análisis energético derivado de la reconstrucción geométrica del algoritmo propuesto.

Por su parte Otero et al. (2020) propuso una metodología de reconstrucción 3D a partir de nubes de puntos con la capacidad de exportar lo modelos generados en formato gbXML, esto con la finalidad de que éstos fueran utilizados para la aplicación de análisis energéticos. Para la comprobación de la información se utilizaron 3 casos estudios en donde se compararon los análisis energéticos generados a partir de las geometrías obtenidas de la metodología de reconstrucción propuesta contra aquellos análisis generados a partir de mediciones manuales tomadas en sitio; para el desarrollo de la simulación energética se utilizó el motor EnergyPlus con la plataforma OpenStudio. De acuerdo a los resultados documentados los análisis energéticos obtenidos por métodos manuales y por tecnología de nubes de puntos fueron prácticamente iguales teniendo errores por debajo del 2%.

Por otra parte, existe un nicho de investigaciones que, si bien comparten el objetivo de proponer metodologías de procesamiento de datos de nubes de puntos con fines de reconstrucción automática de geometrías 3D, lo han hecho considerando un enfoque y aproximación diferente. Debido a que la ingeniería computacional a través de la visión por computadora es la principal involucrada en la generación de metodologías para el procesamiento de las nubes de puntos, las áreas de estudio pertenecientes a la industria de la construcción como la arquitectura o la ingeniería civil sólo se involucran de manera secundaria a través de criterios generales del uso de la tecnología o la especificación de necesidades. Sin embargo, la creciente expansión del perfil profesional de los actores de dicha industria ha permitido el traslape superficial de estas áreas en el proceso de generación de metodologías de procesamiento de nubes de puntos. La capacidad de algunos programas de diseño en la actualidad de interactuar con código ha permitido expandir sus funciones y aplicaciones. Del mismo modo, algunos trabajos de investigación han contemplado como parte de sus objetivos no solo el procesamiento de datos de nubes de puntos con objetivos particulares como la extracción de geometría, sino también la generación de dichas metodologías de procesamiento a través de programas compatibles con aquellos del diseño.

Ejemplo de esto es el trabajo de Zwierzycki et al. (2016), el cual creó una herramienta (llamada Volvox) con la capacidad de gestionar información de nubes de puntos embebida en el programa de diseño Rhinoceros; dicho programa usado normalmente por diseñadores para la creación de geometría 3D, contiene una herramienta secundaria (de nombre Grasshopper) con la capacidad de recibir código en formato de programación visual. De acuerdo con el autor el motivo de la utilización de Grasshopper fue que el uso de programas externos a aquellos utilizados en el ámbito del diseño impone la fragmentación del flujo de trabajo incluso para la realización de tareas de relativa sencillez, como lo es la selección de conjuntos de puntos determinados en una nube; la consecuencia de esto es la ralentización del flujo de trabajo al necesitar una continua importación y exportación de datos hacia los programas de diseño, los cuales no tienen la capacidad de interactuar efectivamente con la información contenida en las nubes de puntos (Zwierzycki et al.,2016). Dicho lo anterior el objetivo principal de la herramienta fue la vinculación directa entre los datos de las nubes y los programas de diseño sin la necesidad de programas externos que dificultaran el flujo de trabajo.

Continuando con esta tendencia algunas otras investigaciones han propuesto metodologías para el procesamiento de datos provenientes de escaneos Lidar y fotogrametría utilizando programación visual en Grasshopper. Tal es el caso de

Peteinarelis (2018), el cual propuso una herramienta con la capacidad de generar a partir de una nube de puntos un mapa de desviación de plano. Este tipo de mapas se utilizan para detectar las zonas que debido a imperfecciones o daños se salen del plano de una superficie determinada, en el caso de esta investigación se utilizó un caso estudio de una nube de puntos de una fachada capturada con fotogrametría. El algoritmo propuesto permitió detectar de dicha fachada las zonas que se desviaban de la vertical del muro, adicionalmente el algoritmo calculaba el grado de desviación de la vertical y asignaba un mapa de colores de acuerdo a su valor. Aparte de utilizar la herramienta Volvox para la gestión de las nubes de puntos, la utilización de programación visual en combinación con otras herramientas le permitió configurar una interfaz que permitió el uso de la herramienta a usuarios sin conocimientos de programación visual.

Los trabajos de Bohórquez et al. (2021) y Wahbeh (2021) tienen como objetivo generar metodologías de reconstrucción 3D a partir de nubes de puntos, destacando la utilización de programación visual en Grasshopper como base para la creación de algoritmos. Bohórquez et al. (2021) propusieron una herramienta topológica para obtener los contornos 3D de las envolventes; para lograrlo, utilizaron un método que deconstruía y reducía geométricamente la información de las nubes mediante la segmentación de datos por secciones y procesos de voxelización de los puntos. Este método permitió reducir las nubes de puntos a líneas bidimensionales que servían como base para generar las superficies planas correspondientes a las fachadas. Aunque el proceso propuesto no es completamente autónomo y requiere entrada manual de información, demostró su eficacia en la reconstrucción de edificios de geometría simple y la representación de componentes de la envolvente, como ventanas y puertas.

Por su parte, Wahbeh (2021) emplea una metodología que obtiene las líneas bidimensionales de los ejes de los muros a través de la deconstrucción de la información proporcionada por las nubes de puntos. De manera similar al método anterior, se segmenta la información de la nube en secciones o porciones, las cuales se voxelizan y proyectan en una superficie 2D. Aunque este trabajo, combinado con herramientas de modelado paramétrico, aceleró la automatización del reconocimiento topológico de muros, se encontró que es más lento que los generados en otros lenguajes de programación. Sin embargo, mostró ventajas al permitir la supervisión del proceso por parte del usuario en distintas etapas de la reconstrucción geométrica, así como en la modificación de variables y tolerancias en tiempo real. Otra ventaja del algoritmo fue su capacidad para exportar sus geometrías en formato IFC, utilizado en la metodología BIM.

En la búsqueda de un panorama general del estado del arte, se han mencionado investigaciones relevantes relacionadas con la reconstrucción 3D de envolventes de edificios a partir de datos provenientes de nubes de puntos. Es crucial considerar no solo los resultados finales obtenidos mediante las metodologías y algoritmos propuestos, sino también las distintas aproximaciones, enfoques y objetivos específicos de estos trabajos. Mientras algunas aproximaciones se centraron únicamente en la obtención de datos 3D, otras abordaron el tema de manera secundaria al requerir la misma información para generar análisis energéticos específicos. Por otro lado, se mencionaron trabajos que optaron por herramientas y programas considerando a los usuarios finales, como diseñadores o actores de la industria de la construcción. Esta diversidad de procesos resalta la importancia del enfoque de cada investigación en las metodologías propuestas para alcanzar sus objetivos específicos.

Las nubes de puntos frente a metodologías de medición convencionales

En la actualidad las nubes de puntos en la arquitectura, ingeniería y geomática se han presentado como una herramienta con la capacidad de reproducir con gran precisión grandes superficies de terrenos y edificios. Sus grandes capacidades las ha llevado a sustituir de forma parcial o complementaria a algunas de las técnicas de medición convencionales más fundamentales de la industria.

Dada su importancia y potencial, existen diversas investigaciones destinadas al análisis de su precisión y velocidad en comparación a otros métodos de medición más convencionales. Las estaciones totales por su parte han servido como uno de los principales referentes al momento de comparar las capacidades técnicas de las nubes de puntos.

Eyoh et al. (2019) compara la metodología de medición de una estación total contra la medición a través de la fotogrametría aérea; para esto se realizó un experimento en donde cada uno de los métodos tuvo que hacer el levantamiento de un terreno. Para comparar las metodologías se utilizaron las variables de exactitud y tiempo.

La exactitud de los métodos se determinó a través de la comparación de un conjunto de coordenadas colocadas en sitio y obtenidas con un receptor terrestre GNSS, contra las coordenadas obtenidas por la estación total y la fotogrametría respectivamente. A través del cálculo de error absoluto se estimó la diferencia entre ambos métodos.

Se encontró que la diferencia obtenida entre las coordenadas del receptor GNSS terrestre y las coordenadas de ambos métodos fue menor al 1%, un porcentaje parecido se observó al comparar directamente los valores de coordenadas de ambos métodos, demostrando así las grandes capacidades de exactitud logradas por la fotogrametría.

Respecto a los tiempos de trabajo medidos, se estimó que el levantamiento en sitio con la estación total requirió más de 12 horas de trabajo, mientras que el levantamiento hecho con fotogrametría aérea fue de 30 minutos. En este trabajo se demostró ampliamente la superioridad del método de generación de nubes de puntos con fotogrametría sobre el método de medición a través de la estación total.

Por su parte, Pflipsen, (2007) realizó una comparación exhaustiva entre las capacidades de una estación total y un escáner Lidar. Para esto se utilizaron

distintas pilas de material acumulado de las cuales se calcularon los volúmenes a partir de cada método; las variables de costo, tiempo y exactitud fueron los ejes principales utilizados para la comparación.

Se observó en términos generales que el tiempo necesario para la medición en sitio con el escáner Lidar fue menor en un 20% que el tiempo de medición realizado con la estación total. Sin embargo, dicha reducción del trabajo en sitio estuvo acompañada por un aumento en los tiempos de procesamiento generados en oficina, llevando a la investigación a concluir que en términos generales el aspecto de tiempo en ambas metodologías era igual.

Respecto a la exactitud de la medición de volúmenes se encontró una diferencia menor al 3% entre los resultados obtenidos por ambas metodologías siendo más exactos los resultados obtenidos a partir del escáner láser. Dadas las observaciones de exactitud se establece que “No existe una gran diferencia entre los datos obtenidos por el escáner láser y la estación total, por lo que la selección del método debe decidirse por otros factores adicionales a la exactitud.” (Pflipsen, 2007).

Respecto a la comparación del costo se estipulo que los precios para la obtención del escáner Lidar fueron entre 6 y 8 veces más costosos que las estaciones totales, los cuales requerían adicionalmente de capacitación Concluyendo que existía una enorme desventaja en este aspecto en la implementación de escáneres láser.

Finalmente, esta investigación concluye que el uso de los escáneres Lidar se ve maximizado cuando se requiere representar superficies que por su complejidad no sean fáciles de representar con una estación total, por otro lado, utilización de los escáneres no se recomienda para la realización de tareas simples en donde el uso de la estación total puede ser maximizado.

Si bien las investigaciones mencionadas permiten visualizar de forma general las ventajas y desventajas de las nubes de puntos respecto a otros métodos de medición, en la realidad es común la combinación de diferentes técnicas y dispositivos para la obtención de los mejores resultados.

De igual modo, cabe destacar que en los últimos años el acelerado avance tecnológico ha permitido la generación de dispositivos más equipados que permiten prescindir de dispositivos adicionales para la realización de las tareas. Tal es el caso de los drones equipados con receptores GNSS/RTK que no requieren indispensablemente del uso de receptores terrestres GNSS o estaciones totales

para la creación de puntos de control terrestres; la exactitud de estos equipos les permite generar nubes de puntos de largas superficies de terreno con una precisión centimétrica.

Otro ejemplo del avance tecnológico acelerado son los dispositivos con sensores Lidar integrados en equipos móviles como celulares o tabletas. Estos dispositivos si bien no tienen la capacidad y potencia de un equipo profesional de escaneo 3D, tienen la capacidad de ser utilizados como herramienta complementaria en los procesos de medición de espacios y objetos. Una de las herramientas más sobresalientes en la actualidad

Dicho lo anterior será importante analizar en mediano y largo plazo la evolución de la aplicación de las técnicas de medición convencionales.

3.0 NUBES DE PUNTOS EN LA INSPECCIÓN Y ANÁLISIS DE LAS ENVOLVENTES DE LOS EDIFICIOS

Descripción de propuesta metodológica

A modo general se ha argumentado que de acuerdo a la Ley de Infraestructura de la Calidad (2020) las normas energéticas de sistema requieren un proceso de inspección, que se lleva a cabo con la finalidad de comprobar la correspondencia entre la información documentada de los sistemas evaluados por la norma con la realidad. En el caso de la NOM-008-ENER-2001, esto implica la revisión de las áreas de las envolventes documentadas con las áreas construidas, proceso que requiere de métodos de medición convencionales. Si bien el uso de distanciómetros, flexómetros o herramientas de mayor precisión como las estaciones totales han permitido la inspección de las envolventes, el surgimiento en la última década de nuevo métodos y tecnologías han permitido disminuir los tiempos de trabajo necesarios y obtener modelos de mejor precisión a partir de un mayor número de mediciones.

Las metodologías de medición a través de dispositivos Lidar y las metodologías de reconstrucción geométrica a través de imágenes como la fotogrametría tienen la capacidad de reproducir con gran eficiencia geometrías reales con una exactitud centimétrica, las cuales son representadas en modelos de nubes de puntos. Dadas sus características estas metodologías se presentan como una alternativa para la inspección de las envolventes, sin embargo, la utilización de nubes de puntos implica flujos de trabajo específicos para su procesamiento, así como la creación de algoritmos para la segmentación y reconocimiento de la información.

La generación algoritmos se ve abordada por las investigaciones actuales que buscan generar metodologías de procesamiento automatizado; dada la gran aplicabilidad de las nubes de puntos en diferentes industrias y áreas de conocimiento, se ha generado una gran gama de métodos particulares, los cuales por su especificidad pueden o no abordar las variables requeridas por la norma. Dado que los métodos propuestos en las recientes investigaciones no han alcanzado una fase de madurez que les permita integrarse a programas computacionales de uso comercial, existe aún una brecha entre las herramientas de extracción de la información y los usuarios pertenecientes a la industria de la construcción. En consecuencia, es necesaria la realización de una metodología con la capacidad de obtener de las nubes de puntos las variables relevantes para la

NOM-008-ENER-2001 cuyo enfoque permita su manipulación por los profesionistas encargados de la inspección de la norma. Es en este último punto en donde se enmarca la presente investigación.

Dicho lo anterior, el objetivo principal de la investigación es proponer una metodología para la integración de la tecnología de nube de puntos en los procedimientos de inspección y cálculo conforme a la normativa mexicana de eficiencia energética NOM-008-ENER-2001.

Esta propuesta busca abordar desde una perspectiva técnica la problemática del bajo número de aplicación que ha tenido la norma a nivel nacional según las cifras dadas por la SENER (2020, 2021, 2022) en su reporte anual, en donde la NOM-008-ENER-2001 ocupa menos del 1% de las inspecciones en comparación a otras normas de eficiencia energética. El objetivo general de este trabajo se alinea con el trabajo de investigación de Santiago Cruz (2004), en donde la “adopción de tecnología que coadyuve a la evolución de la norma” es una de las principales estrategias de desarrollo establecidas para el aumento y la aplicación exitosa de la norma.

De igual modo este documento se encuentra en concordancia con los objetivos de la Ley de la Infraestructura de la Calidad (2020), la cual en su artículo primero establece que se debe “Impulsar la creación de infraestructura física y digital para el adecuado desarrollo de las actividades de evaluación de conformidad”. Adicionalmente la misma ley en su artículo 69 establece que “Los procedimientos para la evaluación de la conformidad deberán contemplar el uso de tecnologías de la información […] las autoridades Normalizadoras procurarán siempre incorporar los últimos avances tecnológicos disponibles considerado en base a un análisis costo beneficio, la opción menos costosa para el particular.”

Considerando el flujo de trabajo para la verificación de las normas de sistemas estipulado por la CONUUE, la metodología propuesta se enfocará en asistir en el proceso de inspección, el cual tiene como principal objetivo la comprobación y concordancia entre la información documental del proyecto y el edificio construido garantizando que los dictámenes respecto al cumplimiento de la norma energética estén basados en la realidad. Dicho lo anterior los principales sujetos a los cuales está dirigida la metodología propuesta son por ende las Unidades Inspección.

Implementación especifica de nubes de puntos

Las nubes de puntos se utilizarán para la medición de las áreas correspondientes a las partes opacas y transparentes de las fachadas. Se requiere

específicamente estos datos de las envolventes debido a que son los requeridos por la NOM-008-ENER-2001 para el cálculo de las ganancias de calor y la estimación de la eficiencia energética.

Para evitar el procesamiento “manual” de las nubes de puntos se generó un algoritmo en programación visual con la capacidad de extraer de una nube las áreas de las superficies opacas y trasparentes de las fachadas. Utilizando la nube de puntos y el algoritmo propuesto es posible disminuir los tiempos de medición en sitio y los tiempos de procesamiento, obteniendo de manera más eficiente los datos requeridos por la norma.

Dado que la nube de puntos y el algoritmo de extracción de la información ocupan un papel central en la investigación, la evaluación de éstos es crucial para determinar la factibilidad de la metodología propuesta. La precisión de la nube de puntos, así como la exactitud de los datos obtenidos por el algoritmo (de las áreas opacas y transparentes de las envolventes) deben mantener un rango de error congruente al de las metodologías de medición convencionales de modo que la implementación de esta tecnología este justificada.

Si bien la precisión de las nubes de puntos es un tema que ha sido abordado ampliamente en la literatura, es importante tener en cuenta que dicha precisión no es constante y está en función de variables como el método de generación, los dispositivos de captura, las características físicas del objeto a reproducir, entre otros. De aquí la importancia de analizar la precisión de las nubes de puntos de utilizarse variables específicas para su generación.

Por otra parte, es fundamental analizar la exactitud de las áreas obtenidas por el algoritmo de extracción de la información, dado que las mismas serán utilizadas posteriormente para el cálculo de la ganancia energética de la envolvente. Para esto se requiere una metodología de referencia convencional la cual permita validar los datos obtenidos por la metodología propuesta al mismo tiempo que se estima su grado de error. Dicha metodología convencional debe ser representativa del modo en el que se obtendrían las superficies opacas y transparentes de no utilizarse tecnología de nubes de puntos. Los valores de error calculados por este método se considerarán igual a cero y serán la base de comparación para el cálculo de los valores absolutos de error y exactitud del método propuesto.

Finalmente será importante analizar el impacto inherente del uso de las nubes de puntos y el algoritmo de extracción en los resultados de ganancia energética calculados según la norma. Dado que la precisión de las nubes de puntos impacta en los valores de las superficies extraídos por el algoritmo propuesto y éstas a su

vez impactan en los valores de ganancia energética calculados, podemos afirmar que existe una relación de dependencia importante entre las 3 variables mencionadas y por ende una acumulación de error que será necesaria de estudiar.

Para el estudio del impacto se utilizarán los datos de las superficies obtenidas con la metodología convencional y se calcularán con ellos las ganancias energéticas de la misma fachada; a través de la comparación entre las ganancias energéticas calculadas por la metodología convencional y la propuesta se estimará el grado de error e impacto que tiene la metodología propuesta en los resultados de la NOM-008-ENER-2001

En resumen, se busca estudiar de la metodología propuesta las siguientes variables:

1. La exactitud de las nubes de puntos la cual se puede determinar a través de escalas de referencia que nos permiten conocer la precisión entre la medida real estipulada de un elemento de la fachada (obtenida con la metodología de referencia) y la medida determinada por la nube de puntos. Esta variable se mide en cm.
2. La exactitud de las áreas de superficies opacas y transparentes obtenidos a través del algoritmo de extracción de la información en comparación con las áreas obtenidas con una metodología de medición convencional. Las unidades de esta variable son en metros cuadrados.
3. El impacto del error de las áreas obtenidas por la metodología propuesta en los cálculos de la eficiencia energética de la fachada en cuestión en comparación a los valores de eficiencia obtenidos con la información de la metodología de medición convencional. Las unidades de esta variable son en Watts.
4. El tiempo estimado requerido para la implementación de la tecnología desde la captura de los datos en sitio hasta la obtención de los resultados relativos a la evaluación de la envolvente por la norma mexicana.

Adicionalmente a las variables mencionadas, también deberán tomarse en cuenta variables relacionadas al proceso de obtención de las nubes de puntos.

La metodología propuesta contempla el procesamiento de las nubes de puntos desde la captura de información en sitio hasta la utilización de estos datos en el cálculo de ganancia energética establecido por la NOM-008-ENER-2001. Este flujo de trabajo se basó en su estructura general en las fases de procesamiento de las nubes de puntos descritos en la literatura y se conforma de los siguientes pasos los cuales serán desarrollados a fondo en el siguiente apartado:

a) Adquisición de datos
b) Procesamiento fotogramétrico de nube de puntos
c) Extracción de superficies opacas y transparentes
d) Implementación de superficies en la NOM-008-ENER-2001

El flujo de trabajo propuesto se puede visualizar en el siguiente gráfico:

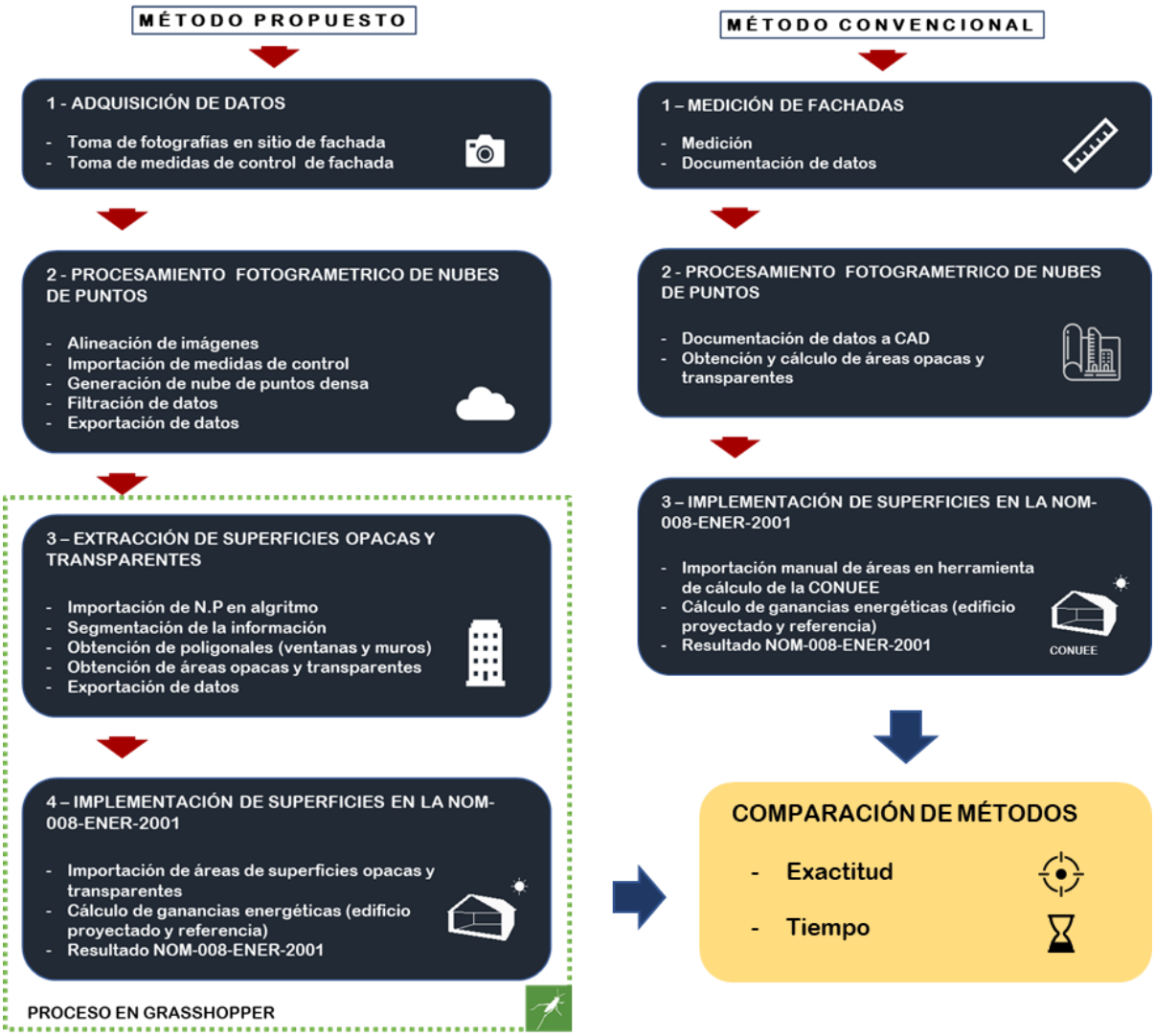


Gráfico 1 Metodología de trabajo propuesta. Elaboración propia.

Finalmente es necesario contemplar que la implementación de ambos métodos (con o sin nubes de puntos) para el estudio de las variables de precisión y exactitud se harán en diversos casos de estudio cuyas características permitan determinar las limitaciones del método propuesto, así como sus ventajas y desventajas frente a las metodologías convencionales. En el caso de la presente investigación se consideran 3 casos de estudio.

a) Adquisición de datos

Metodología de adquisición de datos

Existen en la actualidad diversos métodos para la generación de nubes de puntos, de entre los cuales destacan la fotogrametría y la medición láser a través de dispositivos Lidar como los métodos más utilizados actualmente en la industria de la construcción.

Si bien ambos métodos permiten la generación de nubes con la suficiente resolución para su aplicación en el reconocimiento de envolventes, existen aspectos de ambos a considerar que influyen de manera positiva o negativa en el flujo de trabajo. En el capítulo de la descripción de procesos de captura de datos, se explicó las características de cada método y la comparación de ambos respecto a sus resultados y procesos.

Respecto al método seleccionado para la captura de datos de la información de las envolventes se determinó que la fotogrametría cumplía de una manera más satisfactoria los requerimientos necesarios. Para la fundamentación de la selección del método se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

- Precisión
- Detalle
- Procesamiento y Especialización de mano de obra
- Costo / Versatilidad

Precisión

La precisión de la medición de la envolvente de un edificio requiere de un rango promedio entre 1 cm a 2 cm, si bien esta precisión es relativamente baja respecto a las capacidades de medición de algunas herramientas especializadas como las estaciones totales (con rangos de precisión submilimétrico), es adecuada para la captura general de la geometría de la envolvente y la obtención de áreas de las superficies. De aquí que algunas otras herramientas más convencionales como los flexómetros o distanciómetros tengan la posibilidad de utilizarse en este tipo de levantamientos. Los dispositivos Lidar dependiendo de sus características técnicas tienen rangos de precisión más pequeños que los mencionados, por ejemplo el escáner BLK360 de Leica el cual es uno de los escáneres de entrada más económicos del mercado tiene una precisión que ronda los 6mm a una distancia promedio de 10m, por otra parte el dispositivo Faro Focus Premium 350 el cual es uno de los dispositivos más avanzados del mercado alcanza precisiones de 2 mm

a 10 metros y un error de alcance promedio de 1 mm. Con esto queda más que claro que este tipo de tecnología cumplen e incluso rebasan los requerimientos de precisión solicitados para la medición de las envolventes.

Por otra parte, la fotogrametría tiene múltiples variables que dificultan la medición de la precisión de las nubes de puntos generadas. Las condiciones ambientales al momento de la captura, el tipo de dispositivo de captura de las imágenes, el ángulo o posición de las fotografías, el traslape entre imágenes, entre otros. Sin embargo, existen parámetros estandarizados que permiten la generación de resultados dentro de un rango de precisión predeterminado.

Algunos trabajos como el de Souto-Vidal et al. (2015) utilizan la fotogrametría para la captura y medición de elementos en fachadas y proponen una comparación entre algunas medidas prestablecidas con aquellas obtenidas a partir de una estación total. De acuerdo con el trabajo mencionado las nubes de puntos generadas con fotogrametría tienen un error medio cuadrático de 1.7cm a una distancia promedio de 10m. Otro trabajo que estima la precisión de la fotogrametría es el de Siewczynska & Zioło (2022) el cual compara las medidas obtenidas de la nube de puntos con medidas obtenidas con distanciómetro y flexómetro. Este trabajo concluye que la precisión de los modelos fotogramétricos ronda alrededor de 1.8cm ±0.4cm, esto tomando en cuenta el promedio de medidas obtenidos en sus casos de estudio.

Si bien las investigaciones y portales comerciales concuerdan en que los modelos obtenidos con tecnología Lidar superan la precisión de aquellos generados con fotogrametría (Aerial, 2022; Baltsavias, 1999; Segarra, 2023), también es importante considerar que de acuerdo a diversos estudios y ejercicios la fotogrametría cumple con la precisión necesaria para la obtención de dimensiones válidas dentro del rango de error establecido en los levantamientos de cubiertas y fachadas.

Resolución

Para la captura de detalle y texturas los estudios arqueológicos recurren primordialmente a la fotogrametría, la cual a diferencia de la tecnología Lidar tiene la capacidad de generar mapas de texturas difusas, texturas de oclusión y mapas de normales que pueden representar a gran detalle las características físicas de los materiales de los objetos de interés. Si bien los sensores Lidar tienen la capacidad de obtener información R, G, B, a través de las cámaras integradas en los dispositivos, la baja resolución de las mismas no permite la captura y generación de texturas de alta calidad y la misma reproducción de detalles.

Sin embargo, considerando la tipología principal de las envolventes de los edificios evaluados por la NOM-008-ENER-2001 (tipología comercial), no se requiere un nivel de detalle alto respecto a las texturas o materiales reflejados en las nubes de puntos, por lo que ambas tecnologías son aptas para el objetivo propuesto.

Procesamiento y especialización de mano de obra

Una de las diferencias de la fotogrametría respecto a la tecnología Lidar, es la necesidad de requerir software especializado para la alineación de imágenes, la búsqueda de puntos en común y la generación de nubes densas. Si bien este aspecto representa una desventaja para la fotogrametría frente a la tecnología Lidar algunos autores (Skarlatos & Kiparissi, 2012) han señalado la constante mejora de los softwares comerciales que permiten la generación de las nubes de una forma más intuitiva, eficiente y con mejores resultados. Adicionalmente, es importante señalar que si bien la mayoría de dispositivos Lidar tienen la capacidad de exportar directamente la nube escaneada en los formatos convencionales, la mayoría de las marcas comerciales requiere de software especializado para el registro de las mismas, situación que obliga al usuario la capacitación de mano de obra para la correcta utilización de los instrumentos.

Llegados a este punto podemos afirmar que ambas metodologías requieren la capacitación y el conocimiento de los respectivos programas, lo cual las coloca en condiciones similares de especialización. Como ultima observación hay que recalcar que los programas dedicados al procesamiento de la información proveniente de los dispositivos Lidar, están diseñados principalmente para los dispositivos de la respectiva marca comercial, limitando la interoperabilidad entre los mismos; caso contrario a los programas de fotogrametría los cuales tienen la capacidad de importar información de diferentes dispositivos de captura de imágenes.

Versatilidad

Entendiendo la versatilidad como la capacidad de la metodología para adaptarse a diferentes escenarios, este aspecto es relevante debido a las diferentes problemáticas que se pueden presentar al momento de la captura de los datos de la envolvente de los edificios.

La altura de los edificios es una de las principales variables a considerar. Puesto que la fotogrametría recurre a imágenes para la construcción de las nubes de puntos, éstas al capturar la totalidad de la envolvente podrían en teoría

solucionar el problema de la altura, sin embrago hay que considerar que mientras se esté más alejado del objeto se tendrá menos precisión en la nube generada. Algunos trabajos han evaluado el deterioro de la precisión de las nubes de puntos generadas con fotogrametría al aumentar la distancia entre la cámara y el objeto de interés. Sin embrago también se ha estudiado la viabilidad de esta estrategia aplicada a edificios de baja altura generando modelos de nubes de puntos con una precisión mínima pero útil en la toma de distancias y medición de áreas. (Souto-Vidal et al., 2015). Otra manera de anular este problema sería a través de la angulación de las fotos tomadas desde nivel de suelo para la captura de la altura total de los edificios, sin embargo, se ha demostrado que esta estrategia repercute de igual manera en la precisión de los modelos.

Por su parte los dispositivos de tecnología Lidar tienen la capacidad de registrar medidas a alturas considerables de las fachadas con instrumentos de alto alcance manteniendo los rangos de precisión establecidos en su documentación técnica. De igual modo que la fotogrametría, superados los rangos de alcance las nubes generadas tienen una menor precisión debido a la baja densidad de puntos registrada.

Para la solución a este inconveniente la utilización de drones o vehículos aéreos es una alternativa viable para la captura de información a diferentes alturas, no obstante, la diferencia de costo entre ambos métodos para la implementación es relevante. Lo anterior debido a la dificultad técnica que requiere la utilización de drones o vehículos aéreos con tecnología Lidar frente a los drones comerciales con cámaras de fotografía integradas.

Otras variables que dificultan la toma de datos son las condiciones de luz en el sitio, el tipo de materiales capturados y el contexto del edificio. Respecto a la cantidad de luz, si bien ambas metodologías son afectadas por la iluminación de la escena, es la fotogrametría la que depende principalmente de este factor, de ahí que la toma de fotografías a contraluz solar sea una aspecto que disminuya en alto grado la precisión del modelo.

Respecto a los materiales, ambas metodologías generan error al capturar o medir materiales de naturaleza translucida, tales como ventanas o fachadas de cristal por lo que en ambos casos se requiere evaluar la viabilidad de la utilización de estos métodos en casos donde este tipo de materiales componga la gran mayoría de la superficie a capturar.

Debido al emplazamiento urbano de los edificios, en la gran mayoría de los casos existen elementos como colindancias, árboles, postes, cables entre otros,

que no permiten la visualización completa de las envolventes lo cual dificulta o imposibilita la correcta captura de la totalidad de la información. La división de la captura de datos por partes puede en cierto grado apoyar a la obtención de la información de la envolvente faltante por la interferencia de objetos existentes, esta división puede darse en la fotogrametría al capturar imágenes con una angulación o proximidad diferente al resto que permita la visualización de las secciones faltantes. De igual manera la toma de varios escaneos Lidar tiene la capacidad de solucionar este problema. Dicho lo anterior, no se puede descartar casos en donde la cercanía de los objetos con la envolvente imposibilite la captura de la información aún con la toma de diferentes imágenes o varios escaneos. Como final consideración, una ventaja del uso de dispositivos Lidar frente a la fotogrametría es la capacidad de los pulsos láser de atravesar objetos de muy baja densidad como el follaje de los árboles.

Costo

El costo es una de las variables más importantes para la elección de la metodología; en la Ley de la Infraestructura de la Calidad (2020) esta variable considera la cantidad de recursos necesarios para la implementación tecnológica en relación a los beneficios obtenidos.

De acuerdo con análisis comparativos entre ambos métodos, la implementación de tecnología Lidar implica un mayor costo respecto a la fotogrametría. Esto debido a que la medición Lidar requiere dispositivos altamente especializados en comparación con la fotogrametría cuya base de datos son las imágenes, mismas que pueden ser capturadas con cualquier dispositivo de fotografía.

Comparando el precio de los equipos y programas necesarios para cada método, se tiene que el equipo de medición Lidar de entrada más básico del mercado para el año 2024 en México se ubica en un rango de $450,000 a $500,000, considerando el precio de los programas más los accesorios necesarios para su utilización se llega a un rango de entre $550,000 a $600,000. En el caso de equipos de mayor rango y precisión los precios mencionados se duplican en la gama media y triplican en la gama más alta del mercado.

Respecto a la fotogrametría considerando la captura de fotos a partir de una cámara profesional con sensor Aps-c o sensor de 35 mm, se tiene a la misma fecha y lugar un rango amplio de precio el cual parte de $25,000 hasta $100,000 en el caso de las cámaras con mayor tamaño de sensor y resolución. Otra opción popular para la toma de fotografías es el uso de equipos aéreos; respecto a los precios de

los drones con cámaras, existen equipos diseñados para tareas de fotogrametría los cuales están equipados con tecnología con la capacidad de georreferenciar las imágenes con una precisión de ±1cm, estos drones destacan por ser más costosos que los drones de gama comercial y su costo tiene un rango de $90,000 en la gama media hasta los $450,000 en la gama profesional.

Comparando la gama media de los equipos mencionados, se tiene que mientras un equipo Lidar comprende un rango entre $800,000 a $1,000,000 un dron con tecnología de georreferenciación para uso profesional se ubica entre $90,000 hasta los $150,000. Casi 7 veces el costo total de los equipos para fotogrametría profesional, considerando que los equipos Lidar no cuentan con la capacidad de georreferenciar sus modelos con la misma precisión que los modelos generados con drones RTK (tecnología llamada así por sus siglas en inglés “real time kinematic”).

Por otra parte, aunque el uso de cámaras profesionales es una práctica común que garantiza la obtención de resultados con una calidad mínima, la constante actualización de los algoritmos de reconstrucción de imágenes sumado al avance tecnológico de los dispositivos móviles ha permitido que estos dispositivos se conviertan en una alternativa de bajo costo para la generación de nubes de puntos.

Adquisición de datos para procesamiento fotogramétrico

Estrategia de adquisición de la información

En fotogrametría la captura de imágenes desde diferentes perspectivas es indispensable ya que permite la reconstrucción geométrica completa del objeto de interés. En el caso de la captura de imágenes relacionadas a las envolventes de los edificios, es recomendable el uso de estrategias de acuerdo al tamaño de la construcción, estilo, emplazamiento y nivel de detalle requerido en el estudio (Klimkowska et al., 2022). Si bien la reconstrucción 3D total de la envolvente es una práctica común en la generación de las nubes de puntos a través de la fotogrametría, no es indispensable para la presente metodología propuesta.

Lo anterior es debido a que el análisis de las envolventes estipulado por la NOM-008-ENER-2001 fragmenta el cálculo de las ganancias energéticas de acuerdo a cada una de las orientaciones de las fachadas. En otras palabras, analiza por separado las fachadas de cada orientación y al final del proceso suma la ganancia energética de todas las orientaciones para obtener la ganancia total de la envolvente del edificio.

Dado que la utilización de las nubes de puntos en la metodología propuesta está en función del análisis de las envolventes estipulado por la norma, es posible extender el criterio de fragmentación de análisis a los procesos de la generación de nubes de puntos, por lo que en lugar de obtener una nube de puntos completa de una envolvente determinada se podrían generar varias nubes específicas de cada orientación o fachada.

Dicho lo anterior la toma de fotografías estaría orientada simplemente a la captura de cada una de las fachadas sin la necesidad de generar un traslape entre imágenes de fachadas con diferente orientación. Esta estrategia de captura no solo facilita la toma de imágenes de las edificaciones si no que hace más eficiente su procesamiento al utilizar un menor número de fotos.

Puesto que las diferentes fachadas de un edificio tienden a compartir características como sus ventanas, materialidad o dimensiones, se redujo cada caso estudio de edificio a una sola fachada, la cual sería analizada de forma individual aprovechando la capacidad de la metodología de fragmentar la información tanto en la generación de las nubes de puntos como en el análisis energético de las fachadas.

Dispositivos y parámetros utilizados

Respecto a la toma de imágenes (fotos) para la generación de las nubes de puntos, se utilizaron 2 dispositivos con diferentes gamas de precisión y calidad. El primero, una cámara fotográfica profesional con un sensor APS-C y el segundo un teléfono móvil.

Si bien, la utilización de cámaras profesionales de alta resolución para la captura de imágenes es uno de los factores que minimiza el error en los modelos de nubes de puntos, el análisis de los modelos generados por imágenes obtenidas de cámaras de dispositivos móviles es un aspecto que en la actualidad vale la pena considerar.

Dado que la industria de telecomunicaciones ha protagonizado a lo largo de los años un constante avance tecnológico en el ámbito de los dispositivos móviles, la tecnología de captura de imágenes ampliamente integrada en los celulares contemporáneos se ha beneficiado de la misma manera. El uso de sensores de alta resolución en combinación con el mejoramiento de algoritmos de procesamiento de imágenes (en los últimos años incorporados con inteligencia artificial) han sido factores decisivos para la integración de las imágenes provenientes de los teléfonos inteligentes en los procesos propios de la fotogrametría.

La utilización de dispositivos móviles en metodologías de fotogrametría y reconstrucción 3D, ha sido un área de creciente interés debido a la practicidad y bajos costos que conlleva su implementación. Algunos estudios han evaluado la capacidad de estos dispositivos de reconstruir con precisión las fachadas de los edificios (Jeong & Kim, 2016), así como su capacidad de integrarse a metodologías con dispositivos de mayor precisión como aquellos que incorporan sensores Lidar (Zhang et al., 2016).

Finalmente, el mejoramiento de los algoritmos de reconstrucción geométrica utilizados en los procesos de fotogrametría e incorporados en los programas de uso comercial (Skarlatos & Kiparissi, 2012), es otro factor que juega a favor en el uso de dispositivos móviles para la generación de nubes de puntos en periodo de mediano y largo plazo. Es en estos aspectos donde radica la importancia de utilizar diferentes dispositivos para la generación de nubes de puntos, cuya finalidad es analizar la factibilidad de su uso en los procesos particulares de la presente investigación.

Respecto a las cámaras utilizadas (ver Figura 17):

- Cámara Reflex Nikon D3500 de 24.2 Megapixeles. Sensor APS-C (23.5mm x15.6mm). Sensibilidad de ISO de 100-25,600. Equipada con lente de distancia focal variable de 18-55mm. Con un filtro de rayos UV de 52mm. Relación de aspecto 3:2.
- Cámara integrada en teléfono Samsung Galaxy A12 (Gama de entrada) de 12 Megapixeles. Sensibilidad ISO de 1600-3200. Distancias focales de 13mm y 25mm. Relación de aspecto 3:4, 9:16 y 1:1.

Figura 17 Cámaras utilizadas en investigación.

Dada la diferencia técnica entre ambos dispositivos, será indispensable evaluar las implicaciones del uso de fotografías provenientes de un móvil en la precisión y calidad de las nubes de puntos, así como su impacto en la exactitud de las áreas opacas y transparentes obtenidas a partir de la metodología de extracción de datos. En última instancia se evaluará el impacto del uso de este dispositivo (y la metodología para extraer las áreas) en los resultados del cálculo de la ganancia energética estipulado por la NOM-008-ENER-2001.

Otro aspecto a considerar son los parámetros utilizados en la toma de las fotos, los cuales afectan los aspectos físicos de las imágenes. En el caso de la toma de fotografías con dispositivos móviles estos parámetros tienen valores prestablecidos dependiendo del dispositivo, por lo que la

adaptación de éstos a las condiciones de la escena tendrá una limitante considerable en comparación a los de las imágenes capturadas con la cámara réflex. Estos parámetros considerados son:

- Apertura
- Velocidad de obturación
- ISO
- Balance de blancos
- Enfoque

Cabe destacar que los dispositivos móviles cuentan normalmente con 2 o 3 cámaras integradas, las cuales tienen los valores de la distancia focal y apertura de forma predeterminada, esto con la finalidad de poder capturar fotografías con diferentes enfoques sin la necesidad de utilizar lentes de distancia focal variable. En el caso del dispositivo móvil utilizado el valor de la apertura de sus lentes es F2.0 para el lente con distancia focal de 25 mm y F2.2 para la cámara con distancia focal de 13 mm.

A diferencia de la fotografía convencional la cual puede utilizar las variables mencionadas para la generación de efectos estéticos en las imágenes, la fotogrametría requiere imágenes que sigan los siguientes criterios (Agisoft LLC, 2023):

- Se requieren fotografías con una distancia que vaya entre 20 mm – 80 mm (distancia focal equivalente a un sensor de formato completo de 35mm). 50 mm es la distancia ideal.
- Evitar tomas con lentes gran angulares debido a la distorsión provocada en las proporciones de la imagen.
- En caso de utilizar lentes de zoom variable, no utilizar fotos de diferentes distancias focales y en caso de requerirse procesarlas como un conjunto aparte.
- El valor de la sensibilidad ISO debe ser el más bajo posible para evitar ruido en la imagen.
- El valor de la apertura de la cámara debe ser lo suficientemente alto para que los objetos que se busquen capturar se encuentren visualizados correctamente en el campo de profundidad de la foto. Deben evitarse fotos con partes desenfocadas por lo que es recomendable mantener los valores de apertura en un punto medio cercanos a F8.0
- Evitar velocidades de obturador demasiado lentas que provoquen áreas desenfocadas de las fotos

- El formato ideal de exportación es en formato TIFF
- Los días nublados son los mejores para la captura de fotos, evitar fotos con incidencia solar directa.
- Evitar capturar superficies de naturaleza translucida
- Evitar tomar objetos en movimiento dentro de las fotos que no pertenezcan al objeto de interés.

Dadas las observaciones anteriores es evidente que el uso de la cámara del móvil se encuentra en un punto de desventaja respecto a la cámara Réflex. Esto debido a los valores de apertura (F2.0 / F2.2) que limitan el campo de profundidad de las fotos; en este aspecto será vital la toma de fachadas mayormente planares, es decir con elementos poco sobresalientes o profundos. Otra limitante es la utilización de formatos comprimidos JPEG los cuales aumentan la cantidad de ruido en la fotografía y disminuyen su calidad. Una consideración positiva es que la distancia focal equivalente de este dispositivo se encuentra correctamente dentro del rango establecido en los requerimientos de la fotografía. Por otra parte, el diseño primordial del móvil limita el mínimo de velocidad de obturador para la toma de fotografías sin trípode, criterio que se alinea correctamente a los criterios anteriormente mencionados. De igual manera, la cámara móvil en su modo “Pro” permite establecer el rango de ISO del sensor ayudando a ajustarlo en sus valores mínimos de acuerdo con la escena.

Respecto a las fotos tomadas con el móvil se utilizó la cámara con distancia focal equivalente a 25mm y apretura de F2.0. Las fotografías se obtuvieron utilizando el modo “Pro” limitando el ISO a un valor entre 100 - 400, así como una relación de aspecto de 3:4. La velocidad de obturador fue calculada de forma automática en cada foto de acuerdo a la escena. Las fotografías se exportaron en formato JPEG.

Respecto a las fotografías tomadas con cámara réflex, se tomaron las fotos con una distancia focal de 35 mm. Si bien Metashape recomienda la utilización de una distancia focal de 50 mm o una distancia focal entre 20 mm-80 mm, es necesario tomar en cuenta que estas distancias son equivalentes a un sensor de 35mm de formato completo. Puesto que el sensor de la cámara utilizada es APS-C (el cual es más pequeño que el de formato completo) existe un factor de recorte en las fotografías equivalente a 1.5. Multiplicando el factor de recorte por los 35mm utilizados en la cámara, se obtiene una distancia focal equivalente a 52mm en una cámara de formato completo.

Se utilizó el modo apertura para la captura de las fotografías, modo que permite al operador controlar los valores de apertura y modifica los valores de la velocidad de obturador de acuerdo a la exposición determinada. Se utilizó para las fotos una apertura entre F8 y F11 para mantener una nitidez y profundidad de campo adecuada. Para determinar el valor mínimo de la velocidad de obturador cuando no se utiliza un trípode de apoyo, se calcula a partir de la distancia focal utilizada.

Puesto que no se utilizó un trípode para la estabilización de la cámara, los valores mínimos de la velocidad de obturador se calcularon a partir de la fórmula 1/distancia focal. La cual nos da como resultado un valor de 1/35 segundos de velocidad de obturador, sin embrago considerando que se utilizó una cámara APSC- se considera de igual modo un factor de ajuste de 1.5. Dando como resultado una velocidad mínima de obturador utilizada de 1/50 s. Finalmente los valores de ISO se mantuvieron dentro de un rango de 100 – 400 dependiendo de las condiciones de la escena y los parámetros mencionados.

Recorrido y traslape utilizado

Para la toma de las fotografías es necesario seguir un recorrido acorde con la geometría del objeto de interés. El objetivo del recorrido es asegurar que las fotografías capturen toda la superficie y detalles, de modo que la nube resultante contenga suficiente información para reproducir correctamente su geometría. Si bien la mayoría de objetos requiere un recorrido circular alrededor de los mismos, para el caso de las superficies “planas” como es el caso de los terrenos o las fachadas se requiere un recorrido lineal (Agisoft LLC, 2023).

Como se aprecia en la Figura 18 el recorrido lineal debe mantener idealmente una distancia constante de la superficie plana, este patrón se debe mantener a lo largo y alto de las superficies para una captura homogénea de la información. En fachadas de gran altura la utilización de drones es una estrategia común para la captura completa de los datos necesarios.

Respecto al traslape de imágenes, la mayoría de las guías de aplicación fotogramétrica recomiendan para la captura de superficies lineales (como es el caso de la fachada) un traslape de área equivalente a 60% - 70% entre cada foto (Bedford & England, 2017; Walker, 2023). Este dato es relevante ya que determina el número de capturas necesarias a lo largo del recorrido lineal.

Para calcular el traslape preciso de las fotografías se requiere de 2 datos principales, el ángulo de visión y el campo de visión de la cámara. Si bien ambos

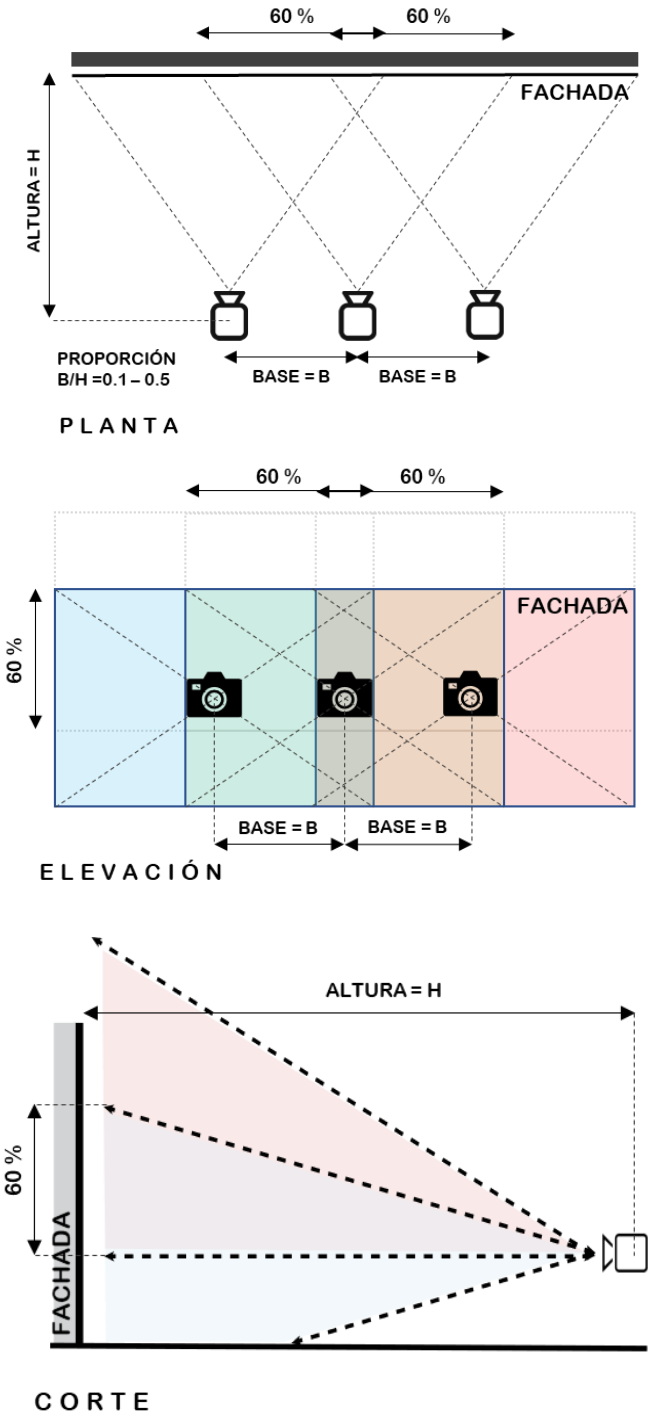


Figura 18 Diagramas en planta, elevación y corte de los criterios y proporciones de distancia para la toma de fotografías de la fachada. La altura en estos casos se considera como la distancia entre el objeto y la cámara. Elaboración propia.

conceptos tienden a usarse de forma similar, en la fotográfica representan dimensiones diferentes.

El ángulo de visión se define como el ángulo en el cual la cámara dadas sus características percibe los objetos que se observan y está determinado por el tamaño del sensor del dispositivos utilizado, así como de la distancia focal.

El campo de visión por su parte se define como el área capturada dado el ángulo de visión de la cámara y la distancia al objeto. A partir del campo de visión podemos determinar en metros o centímetros la cantidad de desplazamiento lateral que se necesita entre cada foto para lograr un traslape equivalente al 60% recomendado.

Cabe agregar que a partir del campo de visión y la resolución del sensor de la cámara se pueden obtener un parámetro llamado Distancia de muestra de suelo o “Ground Sampling distance”, el cual nos permite conocer el valor métrico de cada uno de los pixeles de las fotos. Este valor es especialmente importante ya que determina la precisión de cada fotografía.

Si bien existen sitios web que permiten el cálculo automático de los parámetros mencionados los cuales son útiles para determinar el traslape,

también existe una regla alternativa que funciona en relación a la proporción de la distancia de desplazamiento horizontal (base) que tienen las fotos y la distancia al objeto de captura (altura). Esta regla propone que para obtener fotografías con el mínimo de traslape requerido para fotogrametría la proporción de la base/altura se debe encontrar entre los valores 0.1 – 0.5. (Hasegawa et al., 2000; Photo Modeler Technologies, 2015).

Si bien la utilización de equipos voladores como drones es recomendable para la captura de imágenes en altura de las fachadas, en el presente estudio no se consideraron como parte de la metodología propuesta. Lo anterior debido a los costos adicionales de equipo y programas que conllevaría su utilización. Dicho lo anterior se recurrió simplemente a la anulación de las fotos a pie de calle para la captura de datos en altura de las fachadas de los diferentes casos de estudio. De esta estrategia se espera el aumento de ruido en las nubes de puntos correspondiente a los datos más alejados del lugar de captura.

Exportación de datos

Existen diferentes tipos de formatos de imagen. Tanto para la fotografía convencional, así como para la toma de imágenes para la fotogrametría se recomienda la exportación de imágenes en formato RAW (Bedford & England, 2017). Este formato es la simple conversión de la información capturada por el sensor de la cámara en un formato digital y es el equivalente al negativo fotográfico de una fotografía analógica; una de las características del formato RAW es la poca o casi nula pérdida de información frente a procesos de alteración de la imagen, caso contrario a los formatos TIFF y JPEG. Por otra parte, una de las principales desventajas del mismo es el peso de los archivos resultantes.

El formato TIFF es un archivo procesado a partir de los archivos RAW. Si bien el procesamiento de este formato contiene pérdidas de información, mantiene las pérdidas en un rango mínimo, al ser un formato universal es ampliamente utilizado para el archivo de fotografías RAW.

El archivo JPEG representa el formato con mayor número de compresión. La diferencia principal radica en el rango dinámico de iluminación preservado; mientras que los archivos en formato RAW permiten reproducir un rango de iluminación de 12 a 14 bits por canal, los archivos con formato JPEG solo permiten la reproducción de 8 bits, esto si bien permite la reducción del peso de los archivos disminuye la cantidad de información almacenada en cada imagen. De aquí que este formato no es el más óptimo para la generación de fotogrametría teniendo en cuenta los formatos anteriores.

Dadas las características de la cámara réflex las fotografías tomadas para el estudio se exportaron utilizando el formato RAW. Por otra parte, las fotografías utilizadas con la cámara del móvil se exportaron utilizando la resolución más alta del formato JPEG, si bien ya se ha mencionado las desventajas propias de este formato las limitantes tecnológicas del móvil requieren la utilización del mismo.

Obtención de medidas de control

La toma de medidas de control y coordenadas en sitio son parte indispensable del proceso de adquisición de datos para la fotogrametría, esta información permite tanto el escalado de las nubes de puntos como su georreferenciación. Puesto que la georreferenciación centimétrica del modelo no es necesaria para la aplicación deseada sólo se requiere el uso de medidas de control que permitan su escalado.

La importación de medidas reales al modelo de nubes de puntos adicionalmente permite estimar la precisión a través de la comparación de las medidas reales con aquellas determinadas por el modelo, para esto se utilizan dimensiones de elementos secundarios o elementos artificiales como dianas colocadas de forma estratégica en la realidad.

Para el análisis de las nubes de puntos de los casos de estudio se utilizaron las medidas generales de las fachadas (ancho y alto) para el escalado de las nubes de puntos y las medidas de los elementos secundarios como las ventanas para la estimación de la precisión.

b) Procesamiento fotogramétrico de nubes de puntos

Para el procesamiento de las imágenes y la generación de las nubes de puntos se utilizó Agisoft Metashape. Este programa es uno de los más utilizados en la industria de la construcción para el procesamiento de grandes conjuntos de datos. Su utilización esta principalmente enfocada a la generación de nubes de puntos densas, modelos texturizados, ortomosaicos, modelos digitales de terreno, entre otros productos. Sus herramientas de medición y análisis lo hacen especialmente útil para determinar los coeficientes de error e incertidumbre de la nubes de puntos generadas.

Por otra parte, la flexibilidad del programa para soportar diferentes tipos de cámaras a partir de la interpretación de los metadatos lo hace ideal para integrar imágenes provenientes de dispositivos móviles. Las herramientas integradas del programa que permiten la filtración de ruido y remoción de información no útil son otro factor crucial que lo hacen apto para la metodología propuesta.

Este programa permite la generación de nubes de puntos a partir de diferentes etapas de procesamiento. El flujo de trabajo que contempla es el siguiente:

1. Importación
2. Alineación
3. Generación de nube densa

Importación

El primer paso es la importación de las imágenes que se utilizarán en el procesamiento. Es importante destacar que Metashape tiene la capacidad de leer información en formato JPEG, PNG y TIFF, sin embargo, no permite la importación de imágenes en formato RAW. Esto ocurre debido a la falta de estandarización de este formato entre cada una de las marcas comerciales fabricantes de cámaras, el gran peso de las imágenes producidas por el formato RAW y la falta de algoritmos especializados dentro del programa para revelado digital de este tipo de archivos.

Lo anterior es relevante debido a que la máxima resolución de imagen obtenida por las cámaras profesionales se da utilizando el formato RAW, como es el caso de la cámara utilizada en la metodología propuesta. En este caso la utilización de programas de revelado digital es necesaria para la conversión de datos a formatos legibles por el programa de procesamiento de imágenes.

Para el revelado de las imágenes se utilizó Rawtherapee un programa de código abierto que permitió la conversión de los datos NEF (formato RAW nativo de la marca NIKON) de la cámara utilizada a formato TIFF.

Si bien la importación de las imágenes en Metashape es un proceso sencillo, el programa tiene adicionalmente la capacidad de hacer una evaluación de las calidades de las imágenes utilizadas; a partir de la evaluación, Metashape asigna un valor de calidad a cada fotografía. Para el presente método y de acuerdo a los parámetros establecidos en su manual, se eliminaron aquellas fotos obtenidas con una calidad por debajo de 0.5. (Agisoft LLC, 2023)

Los metadatos son otro aspecto importante a considerar en el proceso de importación, esto debido a que contienen los parámetros físicos de las fotografías los cuales son indispensables para los algoritmos que permiten la generación de nubes de puntos con fotogrametría. Normalmente estos datos se encuentran adjuntos en formato EXIF a los archivos propios de las imágenes y son recolectados por los dispositivos de captura fotográfica. El programa importa los metadatos y los agrupa de acuerdo al tipo de sensor, distancia focal y tamaño de las fotos en pixeles.

Tanto la cámara profesional utilizada como el dispositivo móvil tuvieron la capacidad de generar fotografías con la información de los metadatos que se utilizaría posteriormente para el alineamiento de las imágenes.

Alineación

La alineación de la información es probablemente el paso más importante de la metodología en la fotogrametría. En esta etapa los algoritmos detectan puntos clave distintivos entre las fotografías los cuales se utilizan como referencia para el cálculo de la posición individual de cada una de las imágenes respecto a un sistema tridimensional. El posicionamiento de las imágenes es importante debido a que permite la proyección de los puntos en el sistema tridimensional dando como resultado una nube de puntos. En este proceso de alineación los parámetros intrínsecos y extrínsecos de las cámaras juegan un papel fundamental.

Los parámetros intrínsecos describen matemáticamente las propiedades internas del sistema de la cámara y están compuestos por las variables de distancia focal, centro óptico, factor de escala y coeficientes de distorsión. Por otra parte, los parámetros extrínsecos describen la posición y orientación de la cámara en el espacio 3D y son calculados a partir de la matriz de rotación y el vector de translación.

Metashape permite el cálculo de ambos parámetros de forma automática durante el procesamiento de los datos, sin embargo, también es posible determinarlos de forma preliminar a través de un proceso de calibración. Aunque este proceso en la actualidad no es imperativo para la obtención de resultados de precisión optima, se ha comprobado que existe una mejora en la precisión de los modelos 3D generados al utilizar cámaras precalibradas, en donde los factores de distorsión provocados por los lentes son considerados previo al proceso de alineación. (Bedford & England, 2017).

En esta etapa del procesamiento, la ubicación y posición de la nube de puntos pueden ser adicionalmente determinadas. Los metadatos obtenidos a través de dispositivos de captura de imágenes con geoposicionamiento de alta precisión, permiten definir las coordenadas del modelo y sus dimensiones con una exactitud centimétrica. La utilización de puntos de control con distancias conocidas es otra alternativa para la obtención de modelos métricos utilizados en actividades de medición arquitectónica, geomática e ingenieril; estos puntos actúan como referencias que permiten calibrar y ajustar la nube de puntos, dotándolas de una escala real.

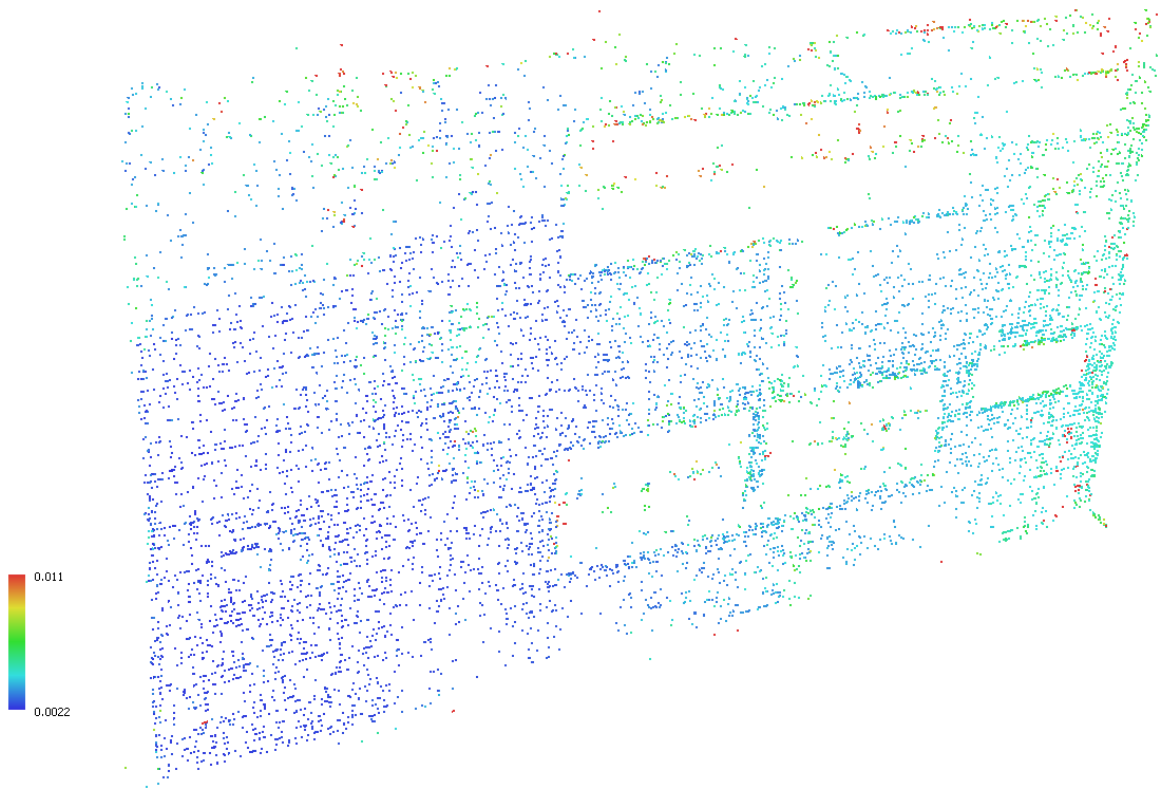


Figura 19 Nube de puntos preliminar obtenida a partir del alineamiento de las imágenes, coloreada de acuerdo al error de reproyección. Elaboración propia.

El resultado del proceso de alineación en Metashape es una nube “ligera” preliminar conformada principalmente por los puntos clave detectados en la geometría (conocidos como “*key points*”) y los puntos de correspondencia (conocidos como “*tie points*”); los puntos clave actúan como representaciones visuales de las características distintivas de la escena, mientras que los de correspondencia establecen relaciones entre las diferentes imágenes. La nube de puntos preliminar es esencial para la generación posterior de una nube densa con la capacidad de reproducir a detalle la geometría del modelo (ver Figura 19).

Si bien la alineación de la información es un proceso complejo Metashape reduce esta tarea a variables especificas a definir, las cuales son:

- La calidad del alineamiento, en donde se determina el tamaño de la resolución de cada foto utilizada (se puede aumentar o reducir la resolución utilizada)
- El número de puntos clave utilizados en cada imagen (denominados “Key points”)
- El número de puntos de enlace que tienen en común todas las imágenes para el proceso de alineación (denominados “tie points”)
- El ajuste dinámico de los parámetros de la cámara

A partir del proceso de alineación Metashape permite optimizar las nubes preliminares agregando información adicional como puntos georreferenciados, medidas de control o referencias escalares. En esta etapa la eliminación de ruido es también otra opción para la generación de modelos con mayor exactitud.

Respecto a la exactitud de las nubes de puntos una de las principales métricas para su evaluación es el error de reproyección (ver Figura 20). Este error se mide en pixeles y se define como la distancia entre un punto observado en una imagen y su reproyección obtenida a partir del cálculo de su posición 3D (Nguyen et al., 2015). A través de este valor se puede tener una idea general de la calidad de la reconstrucción geométrica de la nubes de puntos, la precisión de los parámetros de la cámara utilizados para la alineación de imágenes y la calidad propia de las fotos. Cabe destacar que una nube de puntos se considera óptima cuando el valor general de reproyección se encuentra por debajo de 1 pixel. (Pix4D, s. f.).

Metashape a través del proceso de alineación permite estimar la raíz media cuadrática de los errores de reproyección de todos los puntos de la nube preliminar y a través de las herramientas de filtrado eliminar aquellos cuyo valor está por encima de un rango determinado. La importancia del filtrado de los puntos con alto error de reproyección se encuentra en que estos mismos son los utilizados por el

programa para la generación de nubes densas, por lo que al filtrar datos con altos valores de error se evita la generación de nubes de puntos con rangos equivalentes de error e incertidumbre.

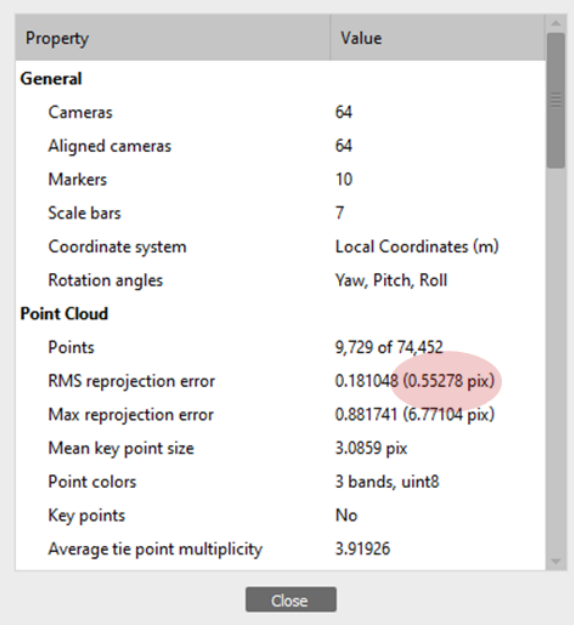


Figura 20 Reporte de error de reproyección en Metashape. En la elipse roja el programa reporta el error en Pixeles.

Adicional a la estimación del error de reproyección, el proceso de alineación es indispensable para la metodología propuesta debido a que permite introducir referencias lineales que dotan a la nube de puntos de una escala real, para esto se introducen de forma manual las referencias escalares dentro del modelo y su respectiva medida real.

Una característica particular de Metashape es que permite distinguir a las referencias lineales entre aquellas utilizadas directamente para el escalado del modelo y aquellas utilizadas para el chequeo del modelo. Las referencias utilizadas para el chequeo del modelo no participan en su escalado, pero permiten determinar la precisión de la referencia comparando la medida real con la medida estimada dentro de la nube de puntos. Este tipo de referencias permite agregar un parámetro adicional para la evaluación de la precisión de las nubes de puntos.

Dicho lo anterior se generó en Metashape la alineación de las imágenes de los casos de estudio tomando en cuenta los siguientes parámetros:

- Se procesaron las imágenes utilizando el total de su resolución (Selección de calidad “alta” en el alineamiento)
- Se utilizó un límite de 60,000 puntos clave y 4,000 puntos de enlace para el alineamiento. Estos valores de acuerdo a las recomendaciones dadas por el propio manual del programa.
- Se utilizó el ajuste adaptativo del modelo de cámara para la mejora de la alineación

Para la optimización de la alineación y la nube preliminar se utilizaron los siguientes parámetros:

- La precisión de las medidas de referencia tomadas en sitio, así como la precisión de las fotografías se estableció en 1cm.
- Se filtraron los puntos de la nube preliminar cuyo límite superior del error de reproyección fuera mayor a 0.6. pixeles.
- Se filtraron los puntos de la nube preliminar cuyo valor de incertidumbre fuera mayor a 50.0
- Se filtraron los puntos de la nube preliminar cuya proyección de precisión fuera mayor a 10.0
- El límite de la raíz cuadrática media del error de reproyección del modelo fue se estableció en 1 pixel.
- Se utilizaron medidas tomadas en sitio como referencia para el escalado del modelo. Las medidas fueron de dimensiones generales de la fachada como su alto o ancho y no de elementos de menor tamaño como las puertas o ventanas.
- Se utilizaron medidas auxiliares de los componentes de la envolvente (puertas, ventanas, etc) como referencia para el chequeo y evaluación de la precisión general del modelo de nubes de puntos.

Los criterios anteriores se utilizaron como base para todos los casos de estudio y fueron obtenidos a partir de las recomendaciones del manual del programa Metashape (Agisoft LLC, 2023), de foros de consulta del programa ([engelbeck], 2017) y a partir de la experiencia de profesionales del uso de la fotogrametría compartida a partir de cursos de especialización organizados por el Instituto de Ciencias del Patrimonio y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España (Mañana Borrazás & Parcero Oubiña, 2024).

Generación de nube densa

Terminada la alineación se puede proceder a la generación de las nubes densas, éstas tienen la finalidad de reproducir a detalle las características geométricas del objeto capturado. En el caso de las fachadas se busca primordialmente que reproduzcan con exactitud la ubicación y dimensiones de los elementos que las componen (puertas ventanas, voladizos, etc.) (ver Figura 21).

Metashape permite la generación de las nubes densas a partir de los siguientes parámetros:

- Calidad, que al igual que la fase de alineación determina la cantidad de resolución utilizada de las fotos para la generación de las nubes densas
- Filtrado de profundidad en donde se establece un rango de filtrado de puntos de acuerdo a su error

- Cálculo de color en los puntos
- Cálculo de la confianza de los puntos en donde se le otorga un rango de confiabilidad a cada punto de acuerdo al número de mapas de profundidad utilizados para su reconstrucción.

Para la generación de las nubes densas se utilizaron los siguientes criterios:

- Se utilizó una calidad alta para el procesamiento.
- Se utilizó un filtro de profundidad “Suave”, para remover manualmente los puntos con error o a partir de su confiabilidad
- Se activó el cálculo de los colores de los puntos
- Se activó el cálculo de la confiabilidad de los puntos, este criterio sirvió posteriormente para el filtrado de los datos con error

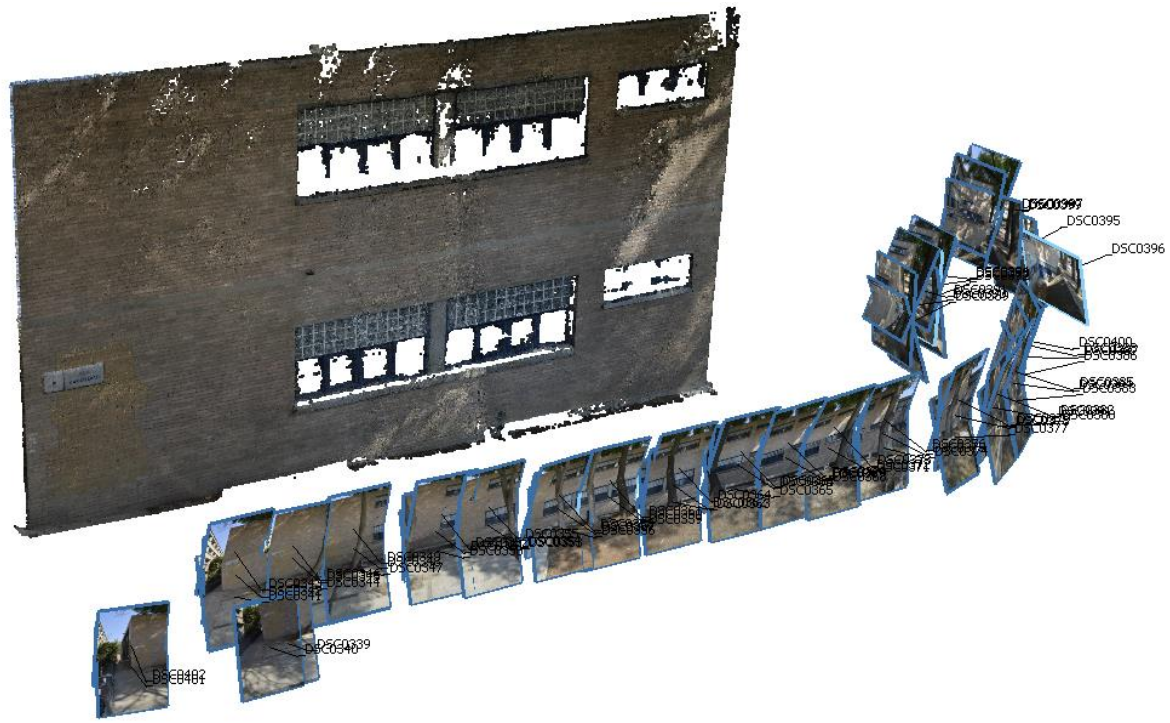


Figura 21 Nube densa generada con fotogrametría. Elaboración propia.

Filtrado y exportación

Este proceso requiere eliminar los puntos de los elementos que no interesan en el modelo, así como los puntos que contienen grandes cantidades de error en su reconstrucción.

Utilizando las herramientas de selección manual de Metashape se borraron todos los puntos que no correspondían a la fachada capturada, como los puntos de árboles, suelos, mobiliario urbano, autos, etc.

Adicionalmente se utilizó la confiabilidad de los puntos calculada en la fase de la generación de la nube densa para el filtrado de los datos con rangos superiores de error. El rango utilizado por el programa para su clasificación va de 0 – 100; el rango utilizado para la eliminación de datos fue de 0 – 5 tomando como criterio principal la conservación de los puntos necesarios para la correcta reproducción de los vanos y macizos de las fachadas (ver Figura 22).

Finalmente se exportaron las nubes resultantes en formato E57, se utilizó este formato debido a sus capacidades de compresión de la información y la interoperabilidad que permite importarlo a programas CAD orientados a la industria de la construcción.

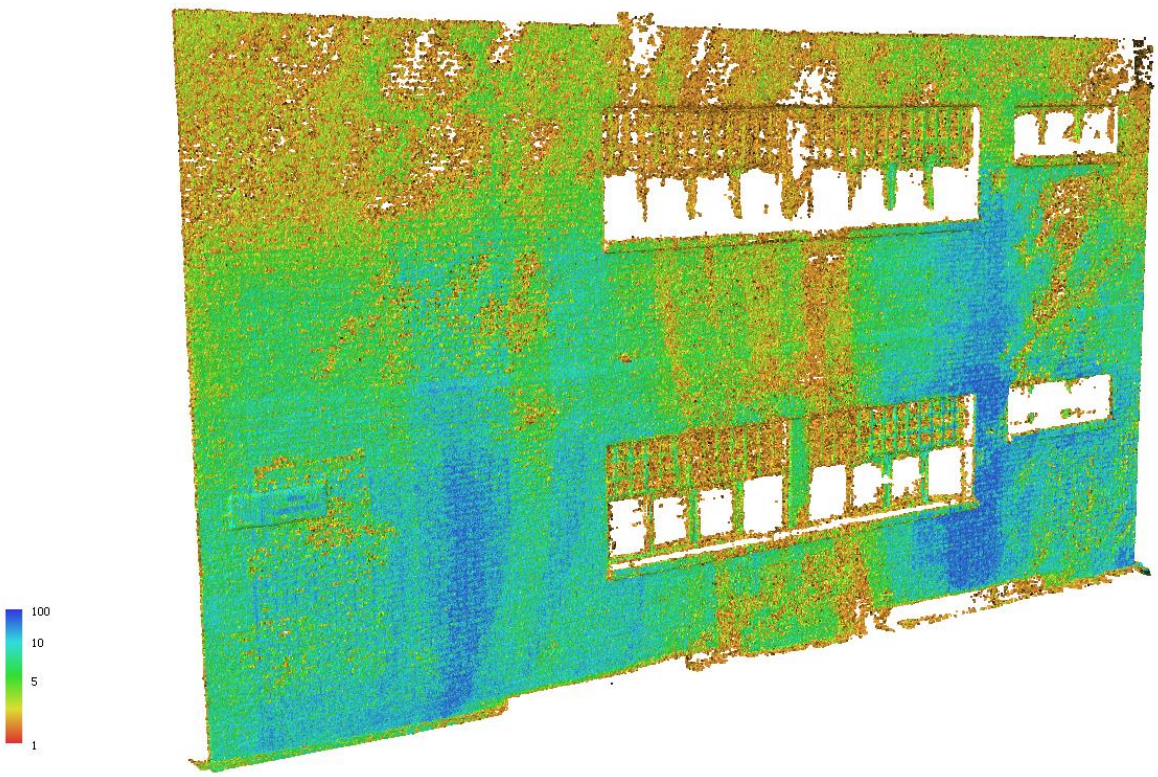


Figura 22 Nube de puntos densa clasificada de acuerdo a los valores de incertidumbre. Elaboración propia

c) Extracción de superficies opacas y transparentes

Terminado el procesamiento de las imágenes se obtiene una nube de puntos de cada fachada específica en formato E57 la cual se necesitará procesar para obtener de la misma las variables relevantes para la NOM-008-ENER-2001, las cuales son las áreas de las componentes opacas de la envolvente, así como las transparentes.

Dado que las nubes de puntos carecen de información semántica que permita clasificar o reconocer objetos reales dentro de los modelos 3D (como muros, puertas o ventanas), se requieren de técnicas de post-procesamiento y análisis de mayor complejidad que permitan extraer información útil de los conjuntos de datos sin procesar.

En los últimos años, el creciente interés en los algoritmos de procesamiento de nubes de puntos ha dado lugar a diversas metodologías para obtener datos métricos de las envolventes. No obstante, el enfoque de las distintas aproximaciones no ha logrado resultar en procesos orientados a obtener y distinguir las superficies opacas y transparentes de las envolventes, así como la obtención de sus respectivas áreas, variables requeridas por la NOM-008-ENER-2001 para la evaluación de la eficiencia energética. Además, la falta de estandarización y continuidad de los procesos propuestos ha limitado su integración en software comercial dirigido a profesionistas pertenecientes a la industria de la construcción. De aquí la importancia de requerir una vía para el procesamiento de las nubes orientado a las necesidades de la norma y útil para los profesionistas encargados de la inspección de las envolventes.

Grasshopper y programación visual

El lenguaje de programación visual es una técnica orientada al usuario final para el desarrollo de programas a través de la representación gráfica de la lógica computacional en componentes visuales, en este lenguaje el ensamblaje de los elementos permite sustituir el código textual común de la programación tradicional. (Kuhail et al., 2021; *Visual Programming. Advantages, Shortcomings and the Scope of the Use*, s. f.). Dado que en este lenguaje cada uno de los componentes gráficos contiene porciones de código predeterminado, la complejidad de la elaboración de los programas es menor facilitando su acceso a usuarios principiantes no dedicados al área de programación computacional.

La programación visual se concibió inicialmente como una herramienta de aprendizaje orientado a los profesionistas de la computación, sin embargo, sus características le han permitido destacar en la última década en la realización de aplicaciones orientadas a usuarios finales. Si bien la utilización de este tipo de lenguaje conlleva limitantes en aspectos relativos a la escalabilidad y rendimiento en comparación a la programación tradicional, sus ventajas lo hacen una herramienta viable para la generación de algoritmos orientados a usuarios no pertenecientes a las ciencias de la computación. Algunas de sus ventajas frente a la programación normal son su facilidad de uso, rapidez de desarrollo y prototipado de algoritmos, la reducción de errores de codificación, su integración con otras herramientas o plataformas, la modularidad de algoritmos que permiten su fácil reutilización, entre otros.

En la actualidad existe un conjunto de programas orientados a la industria de la construcción con la capacidad de utilizar lenguaje de programación visual. Algunos programas de diseño con estas herramientas han destacado por su capacidad de integrar las disciplinas de diseño paramétrico y diseño generativo.

Particularmente Grasshopper es una herramienta de programación visual integrada al programa de modelado 3D Rhinoceros que destaca por su versatilidad y adaptabilidad a las tareas propias de las disciplinas de la arquitectura y la ingeniería. Su integración con Rhinoceros le permite contar con un amplio catálogo de herramientas orientadas a la transformación de modelos tridimensionales; adicionalmente la gran gama de herramientas de código abierto desarrolladas por la comunidad del programa le permiten expandir el repertorio de códigos disponibles para diferentes tareas y disciplinas que contemplan desde la fabricación digital, la generación de algoritmos de diseño evolutivo, el análisis estructural, el análisis acústico hasta la integración y el uso de nubes de puntos. (Wang et al., 2021)

En diversas investigaciones este programa se ha utilizado como base para la generación de algoritmos de procesamiento automatizados los cuales abarcan temas especializados como la evaluación de fachadas de edificios patrimoniales capturadas con fotogrametría (Peteinarelis, 2018), la reconstrucción de modelos estructurales a partir de datos Lidar (Massafra et al., 2020), la parametrízación BIM de modelos tridimensionales basados en nubes de puntos (Costantino et al., 2022), la reconstrucción geométrica de los componentes de una edificación a partir de escaneos interiores Lidar (Wahbeh, 2021), la reconstrucción automatizada de fachadas a partir de datos Lidar (Bohórquez et al., 2021), entre otros.

Dada su gran aplicabilidad, en la última década se han explorado la generación de herramientas en Grasshopper especializadas para la importación, gestión y transformación de las nubes de puntos, así como la integración de algoritmos básicos de procesamiento (Settimi et al., 2022; Zwierzycki et al., 2016).

Como parte del método propuesto de procesamiento de las nubes de puntos, se utilizó programación visual integrado en Grasshopper para la generación del algoritmo de la extracción de la información en conjunto con diversos paquetes de herramientas especializadas como son Volvox y Cockroach.

Estructura de algoritmo

Los algoritmos en Grasshopper o también conocidos como “definiciones” están estructurados visualmente a partir de nodos con funciones específicas; la agrupación de un conjunto de nodos permite la realización de tareas de mayor complejidad. En este caso, se generó una definición con el objetivo de distinguir y diferenciar los muros de los respectivos elementos que se encuentran embutidos en ella como pueden ser puertas o ventanas y a partir de esta distinción calcular las áreas de todos los componentes.

Para la realización de este objetivo se creó una definición compuesta por subconjuntos de nodos dedicados a la realización de tareas específicas como son:

- Importación de nube de puntos
- Clasificación y separación de puntos
- Voxelización
- Extracción de segmentos perimetrales
- Filtración cálculo de áreas
- Exportación de áreas de opacas de fachada y áreas transparentes de vanos

El flujo del algoritmo propuesto se puede visualizar en el siguiente diagrama:

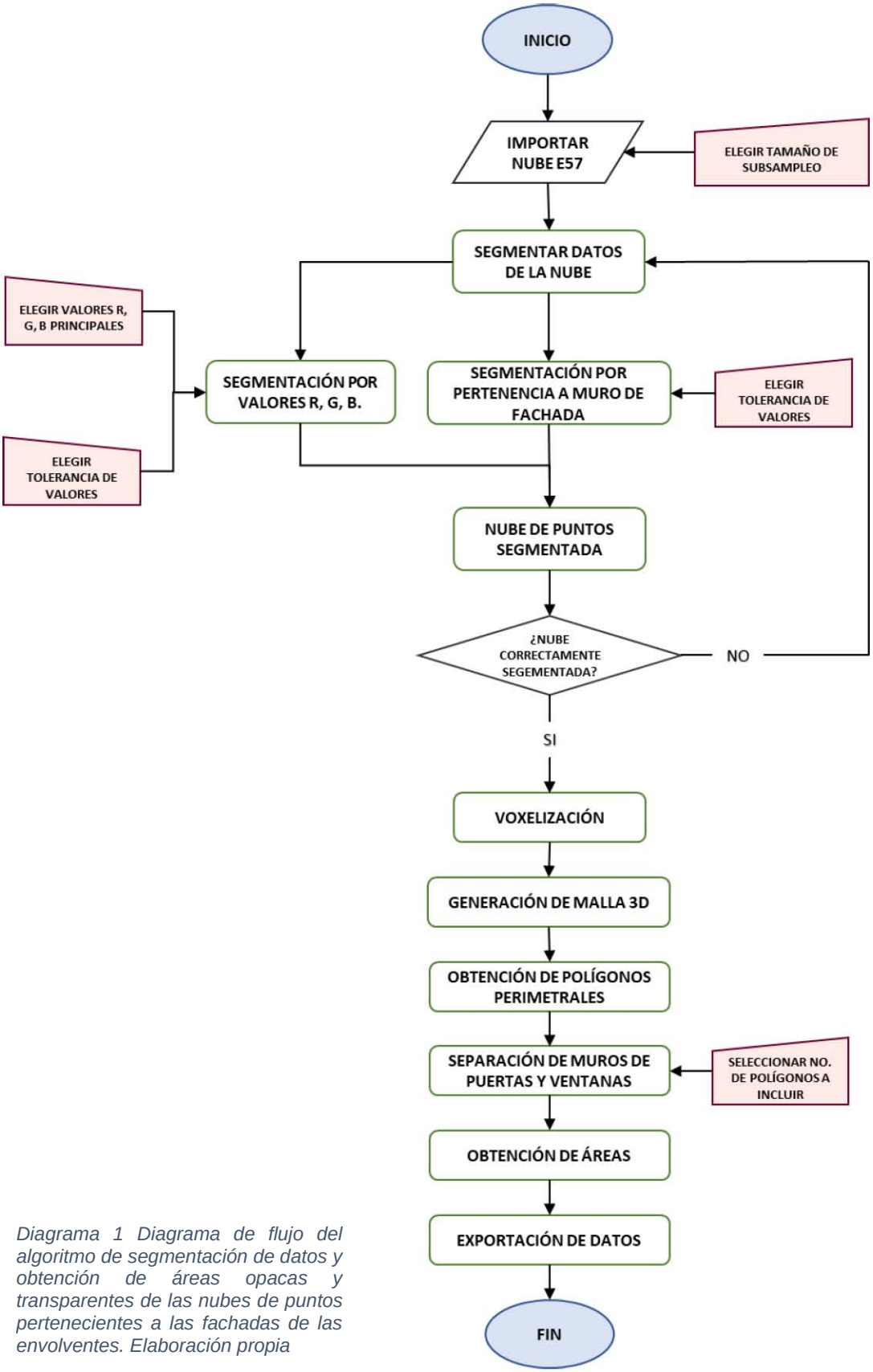


Diagrama 1 Diagrama de flujo del algoritmo de segmentación de datos y obtención de áreas opacas y transparentes de las nubes de puntos pertenecientes a las fachadas de las envolventes. Elaboración propia

Importación de nube de puntos

El primer subconjunto de nodos comienza con la importación de la nube de puntos en formato E57. Esto se hizo utilizando componentes de la herramienta Volvox. Se importó la nube con un subsampleo (distancia entre punto y punto mínima) de 0.5 cm. Adicionalmente la herramienta de importación permite al usuario determinar el porcentaje de la nube que se desea cargar, en este caso se utilizó el 100% de la misma (ver Figura 23).

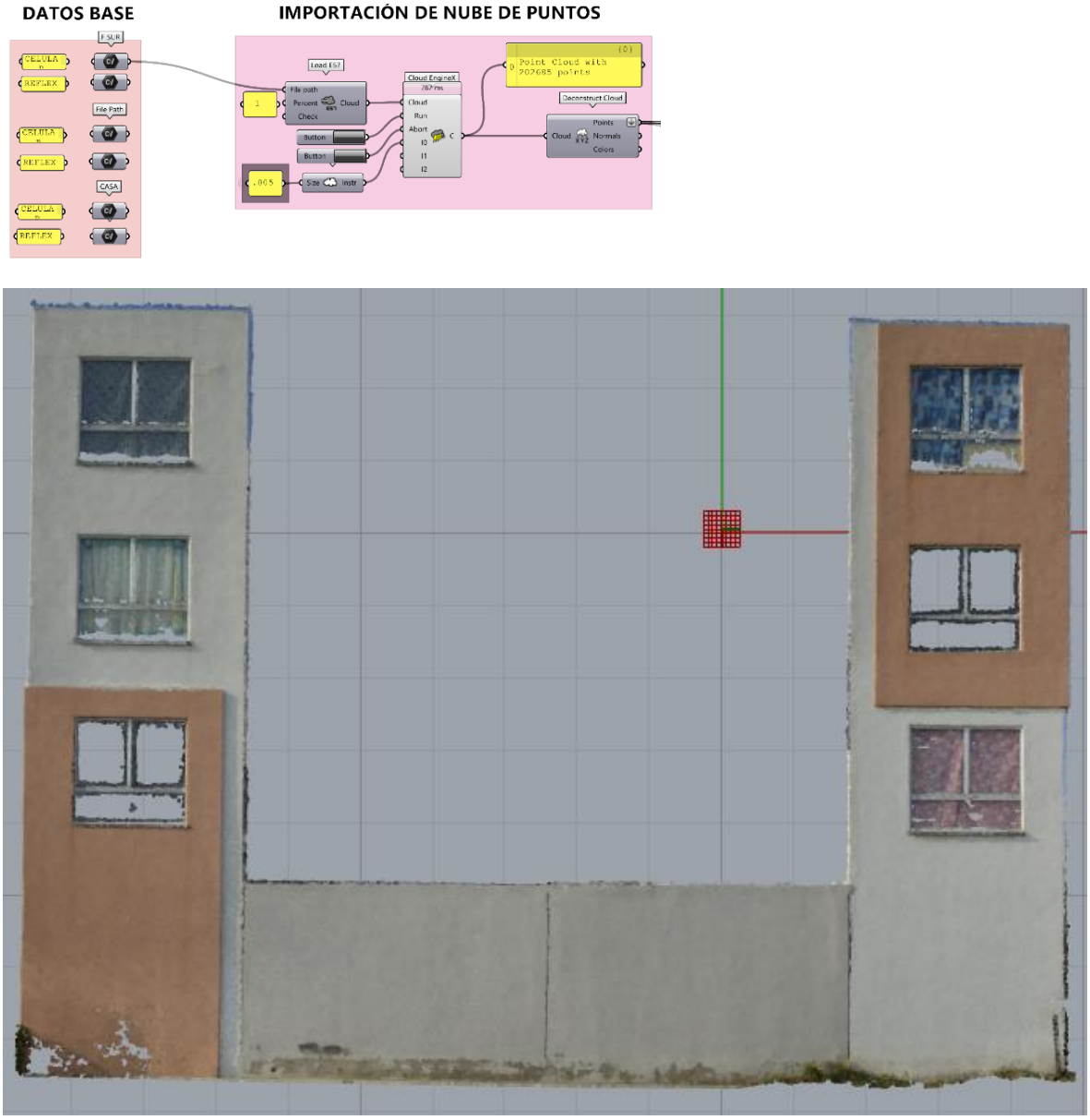


Figura 23 (Arriba) Definición utilizada para importación de las nubes en formato E57. (Abajo) Visualización de nubes de puntos en Rhinoceros. Elaboración propia.

Clasificación y separación de puntos

Para la segmentación y diferenciación de los puntos de los componentes de la fachada se utilizaron 2 principales criterios:

- Diferenciación por pertenencia a plano
- Diferenciación por gama de colores

El primero está basado en la idea de que, en gran parte de los edificios, los marcos de madera o aluminio pertenecientes a las puertas y ventanas tienden a estar embutidos en el muro de la fachada generando un escalonado o cambio de plano que ronda entre los 5 hasta los 20 cm. Si bien existen excepciones a esta situación, normalmente una fachada tiene estas cualidades debido a los sistemas y procesos constructivos propios de la industria de la construcción. Este criterio ya ha sido utilizado por Wang & Cho, (2012) para la diferenciación de muros contra puertas y ha demostrado ser eficaz en conjunción con otros criterios de segmentación.

Aunque este criterio es útil para la separación de la información, está orientado principalmente a las fachadas con un diseño y sistema constructivo simple; esto debido a que la metodología asume que todos los puntos de la fachada son coplanares y que las ventanas siempre se encuentran en un paño diferente. Dicho lo anterior la metodología de separación no podría utilizarse correctamente cuando:

- Los muros que conforman la fachada son curvos
- Las ventanas se encuentran a paño del muro de la fachada o con una distancia mínima de este (menor a 1cm)
- En una misma fachada se encuentran salientes que generen diferencias de paño en el muro principal. En este caso cada saliente se tendría que analizar por separado.

Respecto a los procesos del algoritmo, para diferenciar los puntos correspondientes a muro o ventana/puerta, primerio se generó un plano de referencia paralelo a la fachada, mismo que fue creado en Grasshopper utilizando la herramienta “Fit Plane”. Dicha herramienta permite crear un plano con el mejor ajuste respecto a un conjunto de puntos determinado, éste se calcula a partir de la distancia entre todos los puntos y el plano en cuestión. Dado que esta herramienta utiliza todos los datos de la nube para el cálculo de la posición y orientación del plano, es importante haber removido previamente los puntos no pertenecientes a la fachada tales como puntos del contexto urbano, otras fachadas, ruido, etc.

Una vez generado el plano paralelo a la fachada, los puntos de la nube se proyectaron en él y se midió la distancia de su recorrido desde su posición inicial hasta el plano de referencia. Los puntos se clasificaron a partir de la distancia recorrida tomando en cuenta un umbral de tolerancia. Como producto de este proceso se obtiene una clasificación de puntos pertenecientes al muro de la fachada y no pertenecientes al mismo (correspondientes a las ventanas/puertas).

El segundo criterio de segmentación fue generado a partir de los valores RGB de las nubes puntos. Este criterio básico de clasificación se basa en la uniformidad relativa de los tonos de las envolventes. En el algoritmo permite al usuario seleccionar de manera manual un conjunto de puntos cuyos colores sean representativos de la fachada y a partir de esos valores se filtran todos aquellos que no son similares utilizando un umbral de error. (ver Figura 24)

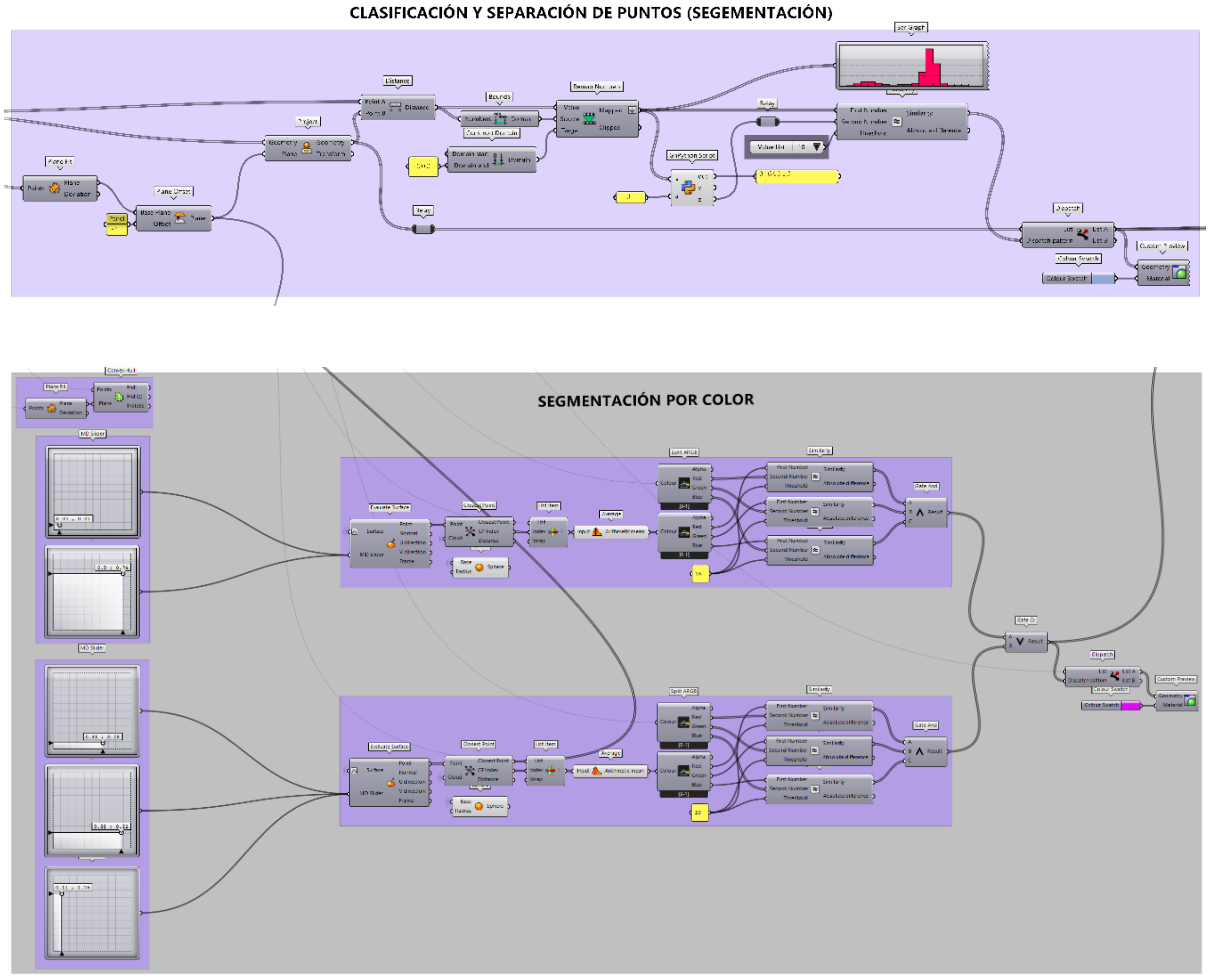


Figura 24 (Arriba) Definición utilizada para segmentación de datos a partir de su pertenencia al muro de la fachada. (Abajo) Definición utilizada para segmentar datos a partir de los valores R, G, B de los puntos Elaboración propia.

La segmentación final del algoritmo contempla todos los puntos que cumplan satisfactoriamente los dos criterios mencionados, a lo cuales se les aplica un filtro de ruido para la eliminación de datos aislados del conjunto (ver Figura 25).

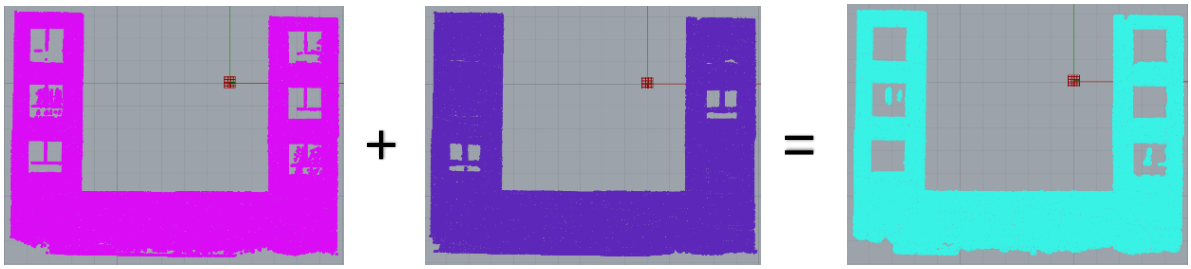


Figura 25 Ejemplo del proceso de segmentación de datos. (Izquierda) Nube de puntos filtrada únicamente con la definición de la pertenencia al muro. (Centro) Nube de puntos filtrada con la definición de clasificación por valores R, G, B. (Derecha) Nube de puntos clasificada a partir de la implementación de los 2 criterios anteriores.

Voxelización

Si bien ya se tienen en esta fase los puntos segmentados, aún no es posible obtener de forma automática dimensiones superficiales o lineales de la fachada, para esto la generación de superficies o polígonos a partir de los puntos es necesaria (ver Figura 26).

Los procesos de voxelización permiten solucionar esta problemática al tener la capacidad de generar mallas tridimensionales a partir de un conjunto de puntos determinados. Se le llama a este proceso de esta manera debido a que cada punto se convierte en un vóxel; los vóxeles son definidos como píxeles tridimensionales normalmente en forma de cubo del mismo tamaño localizados en una malla 3D, éstos pueden contener valor de color y en conjunto tienen la capacidad de reproducir modelos 3D voxelizados. (*Definición de Vóxel | Diccionario SIG*, s. f.) A partir de este proceso se obtiene una malla voxelizada de los puntos clasificados (ver Figura 27).

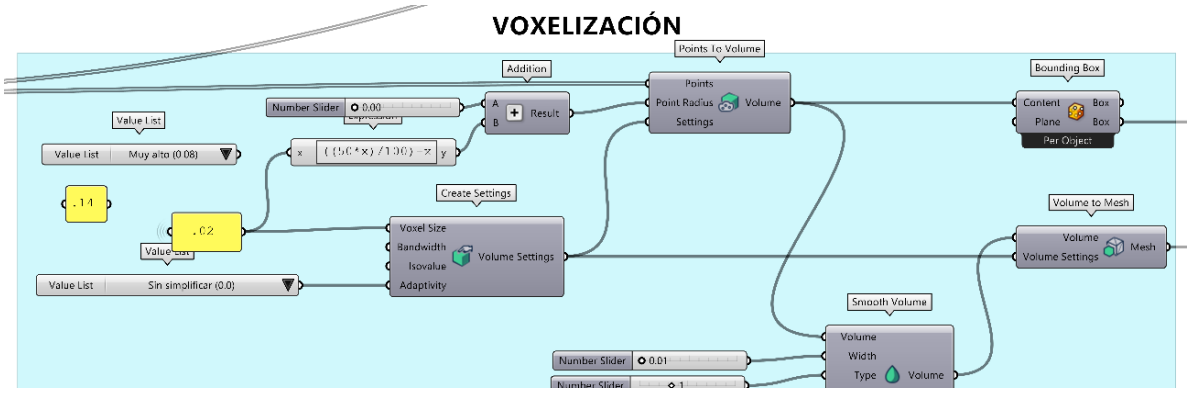


Figura 26 Definición generada para el proceso de voxelización de las nubes de puntos segmentadas.

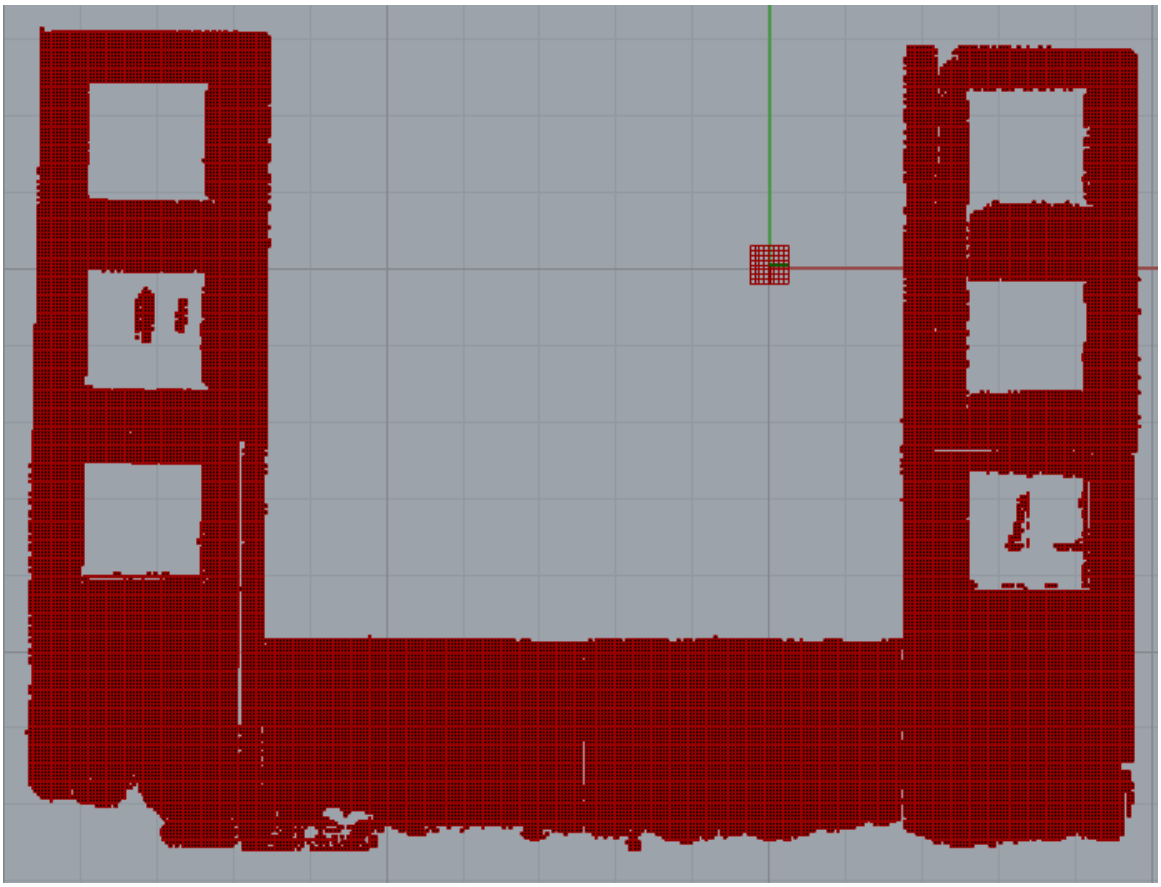


Figura 27 Nube de puntos voxelizada a partir de datos segmentados.

Extracción de segmentos perimetrales

La intersección entre la malla voxelizada y el plano de referencia calculado en el proceso de segmentación permite obtener los polígonos perimetrales correspondientes a los límites de la fachada y los límites de los vanos de las ventanas (ver Figura 28).

Cabe destacar que se filtraron todos los polígonos con una longitud menor a 2 metros lineales equivalentes a una ventana cuadrada de 0.5 m de largo en cada lado; superada esa longitud se clasifica a los polígonos como “ventana”.

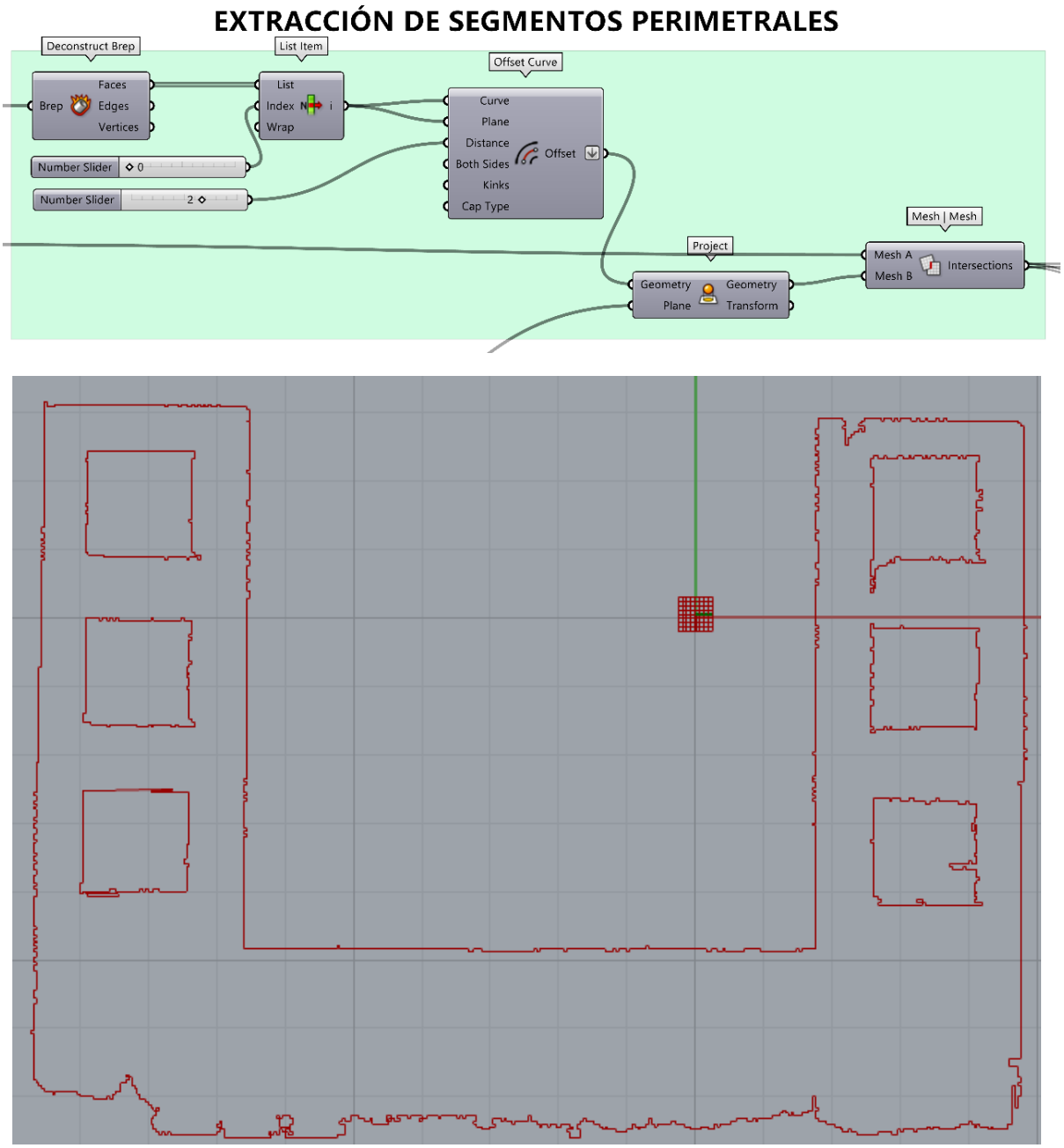


Figura 28 Definición utilizada para la extracción de segmentos perimetrales. (Abajo) Visualización de segmentos perimetrales en Rhinoceros. Elaboración propia.

Obtención y exportación de áreas

Obtenidos los polígonos el cálculo de su área es sencillo utilizando las herramientas de Grasshopper. Para el cálculo de las superficies opacas y transparentes se utilizan operaciones simples de sustracción en donde el polígono mayor equivale al área total de la fachada a la cual se le sustrae la suma de las

áreas de las ventanas (componente transparente) para obtener el área de la componente opaca de la fachada. Al final cada dato se exporta en un archivo con formato .ghdata el cual será utilizado posteriormente para el cálculo de la ganancia energética de la fachada en cuestión (ver Figura 29).

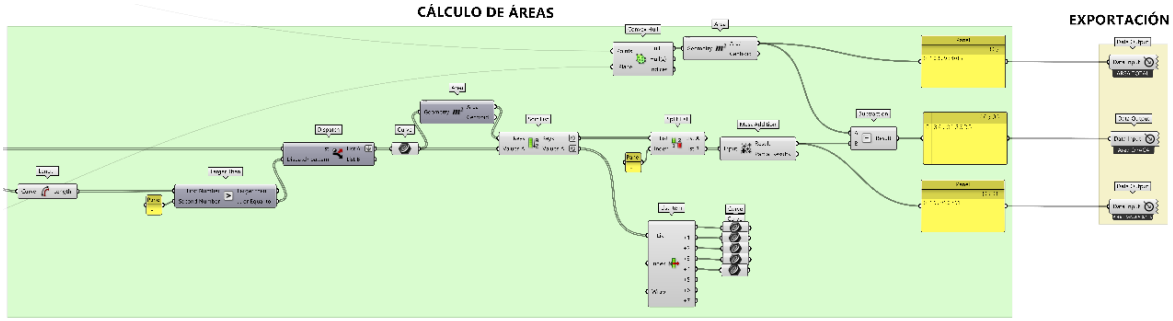


Figura 29 Definición para el cálculo de áreas a partir de los perímetros segmentados y la obtención de los m2 de superficie opaca y transparente.

Parámetros para operación de algoritmo

Si bien la mayoría de los procesos del algoritmo propuesto se encuentran automatizados, existen parámetros que deben modularse manualmente para la correcta obtención de las áreas de los muros y ventanas. Estos parámetros son:

- Porcentaje y subsampleado de la nube de puntos al importarse en Grasshopper. La herramienta Volvox permite modificar dichos parámetros de importación los cuales deben ir acorde a las capacidades computacionales del equipo deseado. No se recomienda la utilización de subsampleados mayores a1.5cm debido a la pérdida de información y exactitud de la nube.
- Los puntos base para la segmentación por colores. Estos puntos son seleccionados manualmente procurando que representen el color o colores base del muro de la fachada.
- La tolerancia para la selección de colores; puesto que el algoritmo busca similitudes en los valores RGB de los puntos del resto de la nube se establece un rango de tolerancia para su funcionamiento, el cual es modulado manualmente dependiendo de cada caso.
- El valor de tolerancia para la selección de puntos por diferencia de plano.
- Tamaño de voxel utilizado para el proceso de voxelización de los puntos segmentados y la generación de una malla, no se recomienda utilizar voxéles de mayor tamaño que el subsampleado de la nube de puntos.

d) Aplicación de datos en el cálculo de la eficiencia energética de acuerdo con la NOM-008-ENER-2001

Proceso actual para el cálculo de la NOM

La Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) en el año 2017 liberó una herramienta en el portal del gobierno de México para facilitar el cálculo de la eficiencia energética de las envolventes de acuerdo a los lineamientos estipulados por la NOM-008-ENER-2001.

Dicha herramienta basada en una matriz de cálculo en Excel permite capturar de manera manual la eficiencia energética de las envolventes de las edificaciones. La información requerida por parte del usuario es:

- Nombre del propietario
- Nombre del edificio
- Nombre de calle
- Estado de la Republica en donde se localiza el proyecto
- Ciudad

Posteriormente se debe especificar de cada muro, techo y ventana:

- Nombre
- Área
- Orientación
- Sistema constructivo

Con la introducción manual de los datos mencionados la herramienta calcula las ganancias energéticas de la envolvente, genera un reporte en donde se desglosa la ganancia energética por muro, techo, puerta o ventana y finalmente emite un dictamen preliminar acerca del cumplimiento de la norma.

Dado que los datos de las superficies opacas y transparentes son requeridos para iniciar el proceso de cálculo, en un método de medición convencional esto implica el procesamiento manual o digital de las medidas obtenidas de la envolvente en cuestión.

Para la obtención de las superficies a partir de levantamientos realizados con estaciones totales primero se requiere vaciar los datos obtenidos en sitio (almacenados en la memoria de la estación) a un programa de diseño CAD. Los datos en forma de coordenadas se utilizan para el trazo de los perfiles de los muros

y ventanas de la fachada en cuestión; a partir de los perímetros se puede obtener con facilidad el área de los elementos. Al final se suman de manera manual o computarizada las áreas transparentes y opacas que comparten similitud.

Otro caso similar es la obtención de superficies a partir de las medidas tomadas con herramientas de tecnología simple, como lo son los flexómetros o distanciómetros. En este caso el registro de la información se hace en papel y el cálculo de las áreas totales de superficies opacas y transparentes se realiza de forma manual o a través de herramientas CAD.

El mismo proceso aplica para la medición de superficies en fachadas o cubiertas que contemplan cambios en su materialidad, las cuales modifican sus propiedades constructivas y por ende sus propiedades térmicas.

Internalización del cálculo en programación visual

Como parte de la metodología propuesta, se incorporó a Grasshopper una estructura de datos con la capacidad de reproducir el cálculo de eficiencia energética de las envolventes estipulado por la NOM, utilizando como base las superficies opacas y trasparentes obtenidas en el algoritmo dedicado a la extracción de la información.

El objetivo de esta definición es la disminución de la fragmentación del proceso general incorporando el algoritmo de segmentación y el cálculo de la eficiencia energética en la misma plataforma de programación visual. De manera parecida a la herramienta actual de cálculo de la CONUEE, esta definición permite generar un dictamen preliminar del cumplimiento de la NOM-008-ENER-2001 de la fachada en cuestión.

Cabe destacar que al igual que la herramienta de cálculo de la CONUEE, la definición propuesta contiene la información contenida en el Apéndice A del documento de la norma permitiendo el cálculo de los valores de transferencia energética del edificio de referencia y el cálculo de los coeficientes globales de transferencia de calor de algunos sistemas constructivos utilizados en las fachadas.

La integración del cálculo de la norma a programación visual no sólo tuvo como objetivo principal importarlo al mismo ecosistema del proceso de segmentación de datos, adicionalmente se buscó facilitar la lectura de información resultante de las ganancias energéticas de la envolvente. Si bien la herramienta de la norma mexicana permite desglosar cada una de las ganancias energéticas de conducción

y radiación por fachada, no existe ningún apartado que permita visualizar de manera global las ganancias de calor con el objetivo de compararlas entre sí.

La herramienta propuesta permite esta visualización global de datos y el cálculo de porcentaje correspondiente de cada porción respecto al total de la ganancia, de tal modo que se facilita la toma de decisiones y generación de estrategias para mejorar el modelo energético cuando no se haya aprobado la norma o en su respectivo caso que se busque aumentar la eficiencia energética del edificio en cuestión.

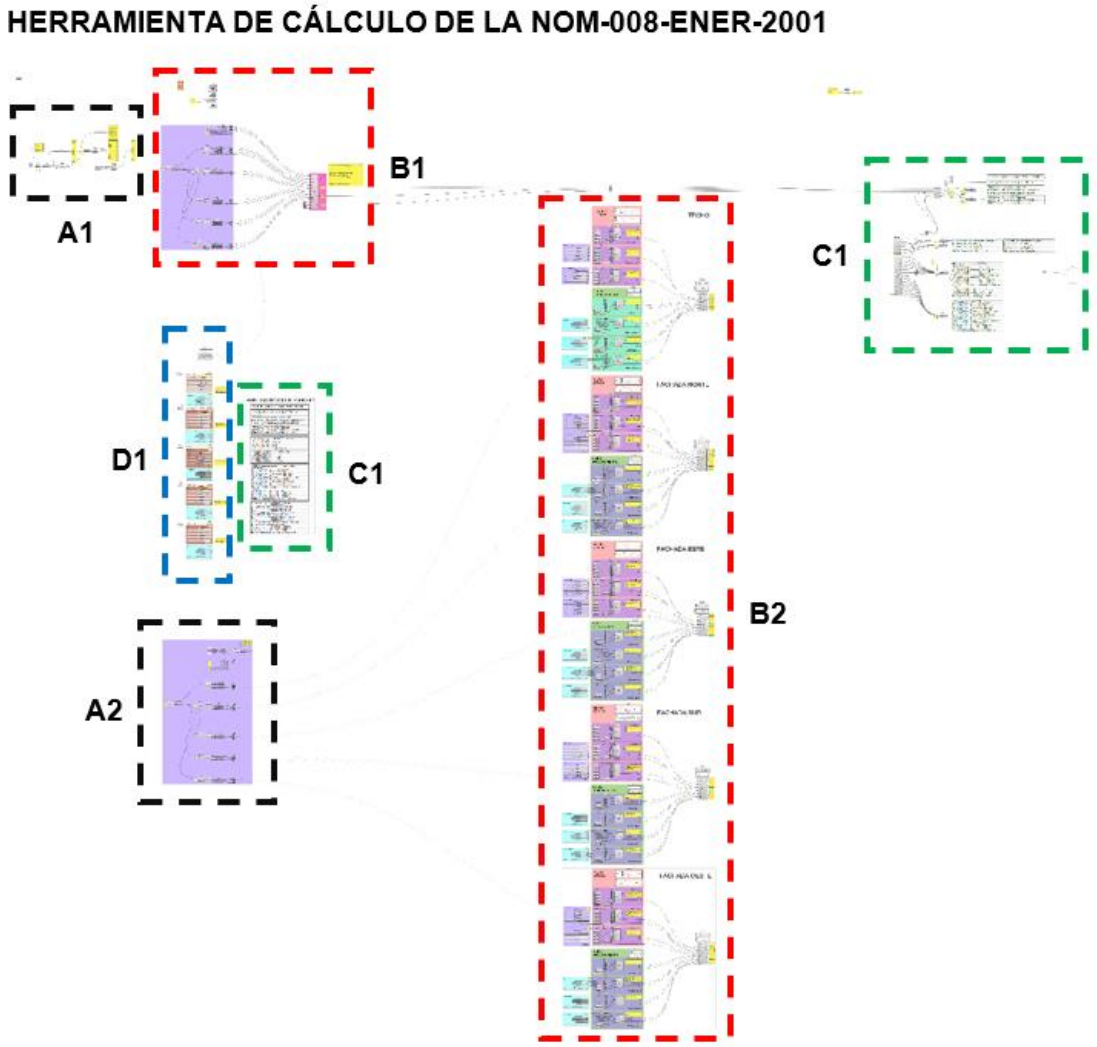


Figura 30 Definición generada para emular el cálculo de las ganancias energéticas de los edificios de acuerdo con la NOM-008-ENER-2001. Las secciones A1 y A2 comprenden las bases de datos de las características físicas de los materiales, así como los valores de ganancias y temperaturas estipulados en el anexo A del documento oficial. El cálculo de las ganancias energéticas de acuerdo con las ecuaciones estipuladas por la norma se encuentra en las secciones B1 para el edificio de referencia y B2 para el edificio proyectado. La sección C1 reporta los resultados de las ganancias del edificio de referencia, proyectado y el resultado del cumplimiento de la NOM-008-ENER-2001. En la sección D1 se importan las áreas opacas y transparentes de las envolventes, así como los sistemas constructivos.

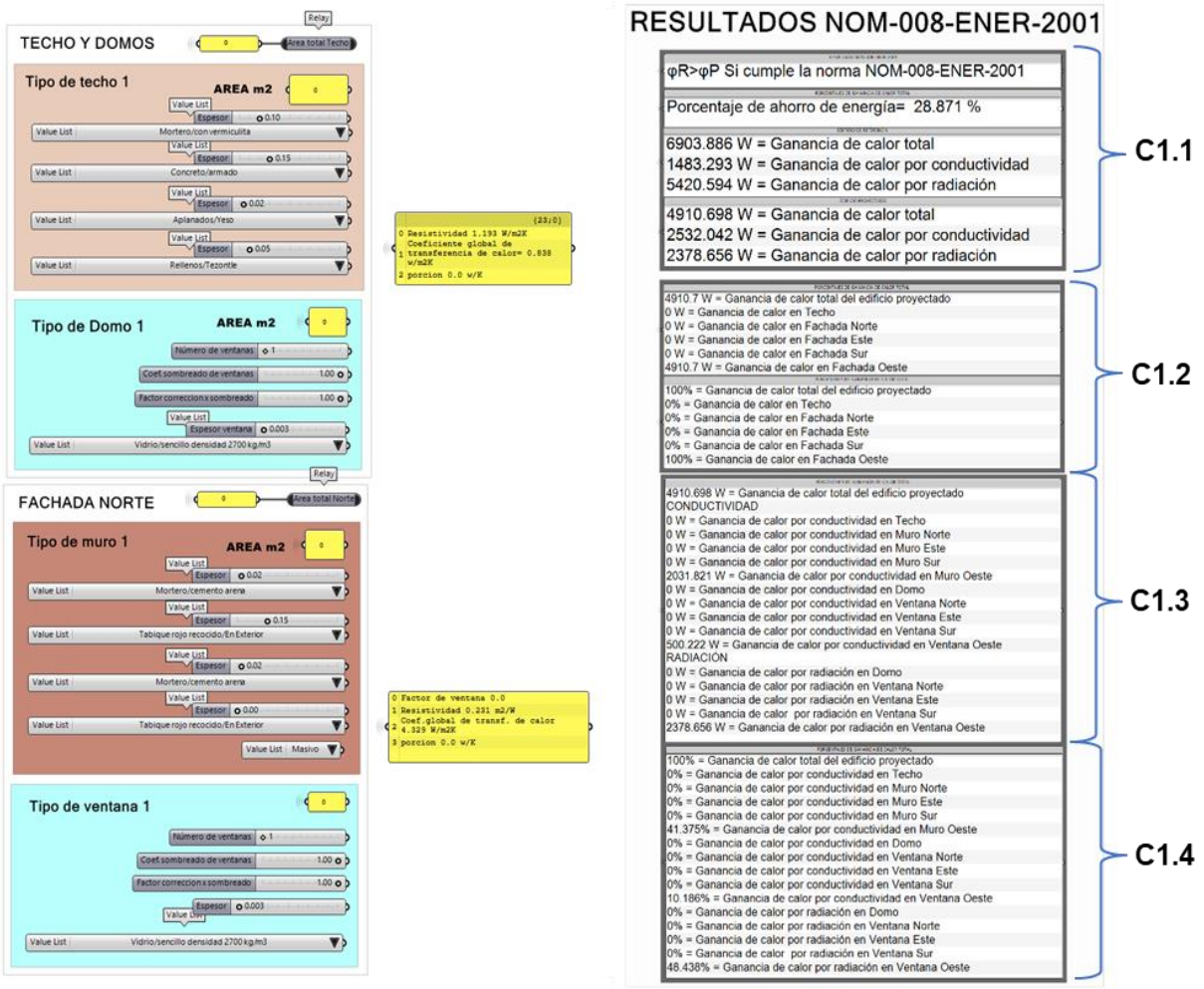


Figura 31 (Izquierda) Sección D1 de la definición. Esta sección permite introducir por cada orientación, las áreas opacas y transparentes de la envolvente, así como también permite definir el sistema constructivo que los compone. Esta es la única sección con la que el usuario interactúa para la generación del cálculo. En la imagen se aprecia solo las áreas opacas y transparentes de la sección "Techo y domos" y de la "Fachada norte".

(Derecha) Sección C1 de la definición total. En ella se reportan los resultados del cálculo. En C1.1 se reporta si el edificio proyectado cumple con la norma y se estima el porcentaje de ahorro de energía, también se reportan las ganancias de calor por conducción y radiación del edificio proyectado y de referencia. En C1.2 se desglosan por componente de la envolvente, las ganancias totales del edificio proyectado, también se estima la contribución porcentual de las ganancias al total. En C1.3 se desglosan por componente las ganancias energéticas en watts por conducción y radiación del edificio proyectado. En C1.4 se desglosa por componente de la envolvente la contribución porcentual de las ganancias por conducción y radiación total.

NOTA: En el proceso de elaboración de la definición que realiza el cálculo de la eficiencia energética se detectaron inconsistencias por parte de la herramienta de cálculo propuesta por la CONUUE. El reporte de las mismas se encuentra en el Anexo A de la presente investigación.

4.0 IMPLEMENTACIÓN METODOLÓGICA EN CASOS DE ESTUDIO

Explicada la metodología propuesta para incorporar las nubes de puntos en el análisis e inspección de las envolventes de acuerdo a los requerimientos de la NOM-008-ENER-2001, se validó el desempeño de su exactitud a través de su aplicación en 3 distintos casos de estudio.

Las variables que se documentarán en la aplicación de la metodología propuesta en comparación a la metodología convencional son:

1. La exactitud de las nubes de puntos determinada a través de escalas de referencia que nos permiten conocer la precisión entre la medida real estipulada de un elemento de la fachada y la medida determinada por la nube de puntos. Esta variable se mide en cm.
2. La exactitud de las áreas de superficies opacas y transparentes obtenidos a través del algoritmo de extracción de la información en comparación con las áreas obtenidas con una metodología de medición convencional. Las unidades de esta variable son en metros cuadrados.
3. El impacto del error de las áreas obtenidas por la metodología propuesta en los cálculos de la eficiencia energética de la fachada en cuestión en comparación a los valores de eficiencia obtenidos con la información de la metodología de medición convencional. Las unidades de esta variable son en Watts.
4. El tiempo estimado requerido para la implementación de la tecnología desde la captura de los datos en sitio hasta la obtención de los resultados relativos a la evaluación de la envolvente por la norma mexicana.

Respecto al análisis del impacto de la metodología propuesta en los resultados de eficiencia energética, se requiere definir datos adicionales a las áreas opacas y transparentes para completar el cálculo de las ganancias energéticas de las fachadas. Los datos son: Localización de edificio, orientación de fachada, coeficiente global de transferencia de calor determinado por los materiales del sistema constructivo de la fachada (muros y fachada) y factor de corrección por sombreado.

Para la aplicación de los casos de estudio se utilizaron datos que pudieran emular un escenario desfavorable en donde los rangos de error se maximizaran y se pudiera poner a prueba la influencia de la exactitud de la metodología propuesta. Se utilizó a Sonora Navojoa como el lugar de ubicación hipotético de los casos de

estudio, debido a sus altas ganancias de calor por radiación solar, así como altos rangos de temperatura.

El mismo criterio se utilizó con la orientación y el factor de corrección. La orientación Oeste de las fachadas fue elegida por tener las mayores ganancias de radiación en la mayor parte del año, esto debido al recorrido solar diario que tiene el sol causado por la latitud de la ciudad. Respecto al Factor de corrección de sombreado se consideró que las ventanas no tuvieron elementos de sombreado que bloquearan la entrada del sol para maximizar su ganancia por radiación. Respecto al sistema de construcción de las fachadas, se empleó como referencia un sistema de uso común en la mayor parte de los estados del país y con bajos coeficientes de aislamiento térmico. En resumen, se utilizaron las siguientes variables para el cálculo de la ganancia energética:

- Localización Sonora, Navojoa
- Orientación Oeste
- Factor de corrección de sombreado 1.0
- Sistema constructivo: Mortero (2cm) al interior, Tabique rojo recocido (15cm) y mortero (2cm) al exterior.

Casos de estudio

Criterios de selección

Respecto al criterio de selección de los casos se tomaron en cuenta las limitaciones técnicas del algoritmo de la extracción de la información, así como la tipología de edificación a la cual está dirigida la NOM-008-ENER-2001. Con el objetivo de expandir el rango de aplicación y alcance de la metodología, se buscó que los casos de estudio representaran características geométricas generales de las edificaciones. De aquí que las fachadas elegidas estuvieron conformadas por un solo muro exterior el cual contenía ventanas ortogonales de proporciones constantes.

Si bien el diseño contemporáneo de los edificios comerciales en los últimos años, ha generado construcciones con geometrías complejas y un diverso manejo de materiales o sistemas; la utilización de fachadas de morfología ortogonal y componentes estandarizados es un rasgo común que tienen diversas construcciones en México.

Aspectos como su bajo costo, facilidad de construcción, mejor control de ganancias solares, facilidad de mantenimiento o estandarización de sus elementos (puertas o ventanas), hacen de esta tipología una constante en diversas localidades del país. Algunos ejemplos de esto en la Ciudad de México son: la Torre Arcos Bosques ubicada en Cuajimalpa, el edificio Guardiola ubicado en el Centro Histórico o el Edificio Tlatelolco de la Secretaría de Relaciones Exteriores.

Otro aspecto a considerar de los casos de estudio seleccionados fue su altura, dado que en la metodología se propone la toma de fotografías a nivel de suelo se seleccionaron fachadas cuya diferencia de alturas permitiera analizar el impacto de esta variable en la precisión de las nubes de puntos. La altura límite de fachada fue de 4 niveles.

Análisis de características

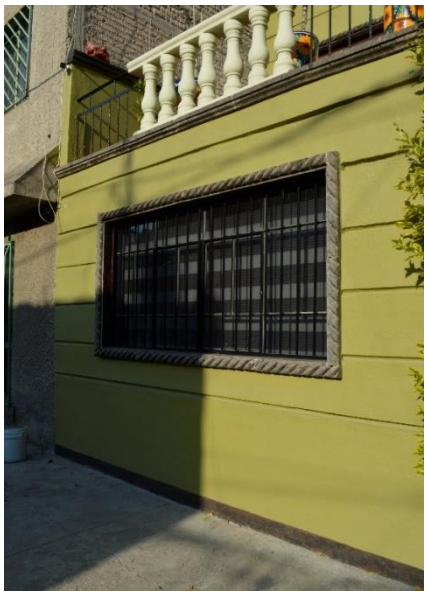


Figura 32 1°Caso de estudio de una fachada de un solo nivel con una ventana.

El primer caso de estudio seleccionado fue de una construcción de un solo nivel, de esta edificación se seleccionó para el estudio una fachada con una sola ventana. La fachada tenía una diferencia de paño mayor de 5 cm respecto al vidrio de la ventana lo que la hacía ideal para la aplicación del algoritmo de extracción de la información.

Esta fachada con orientación al este, solo tiene un solo sistema constructivo lo cual simplifica la separación de elementos y el cálculo de áreas. La uniformidad y simpleza de la misma genera un caso de estudio base en donde se esperan precisiones altas en ambos dispositivos de fotografía. La fachada se ubica a pie de calle sin elementos urbanos que interfieran en la toma de fotografías (ver Figura 32).

El segundo caso de estudio fue de un edificio de educación de 2 niveles de altura, este edificio se seleccionó para el estudio de la fachada sur. Esta fachada compuesta de un solo material uniforme en toda su superficie cuenta con 2 ventanas de diferentes proporciones en cada nivel, las cuales se repiten en ambos niveles (ver Figura 33).

Figura 33 2° Caso de estudio de fachada de un taller universitario de 2 niveles.

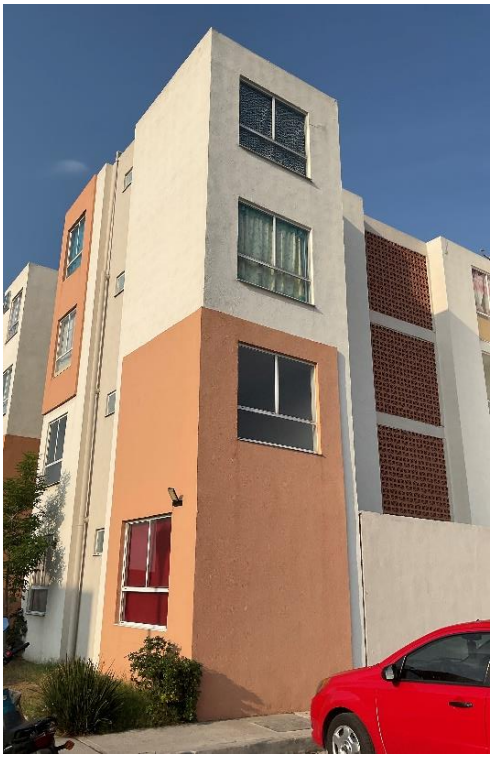


Figura 34 3° Caso de estudio de fachada de oficinas adecuadas de 4 niveles de altura.

Este caso presenta elementos obstructivos como mobiliario urbano y árboles lo cual demanda el uso de fotografías de diferentes ángulos para la captura total de su superficie. La repetición de las ventanas en planta baja y primer nivel permitió estimar el error acumulado en la nube de puntos por el aumento de la altura de la fachada. De manera parecida al primer caso de estudio la diferencia de paño entre las ventanas y el muro de la fachada fue mayor a los 5 cm lo cual facilitó la separación de los elementos con el algoritmo propuesto.

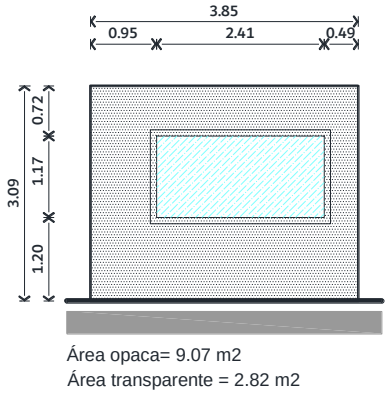
Finalmente se optó por un caso estudio de 4 niveles de un edificio administrativo de un condominio habitacional ubicado en el Edo. de México. De este edificio se seleccionó la fachada norte la cual está compuesta por un solo sistema constructivo y con ventanas de proporciones cuadradas con una diferencia de paño menor a 5 cm.

De manera parecida al segundo caso de estudio, la repetición de las ventanas en diferentes niveles permitió la medición de la acumulación de error proporcional a la altura del edificio. Esta fachada se emplaza cerca de un estacionamiento por lo que la generación de fotos con diferentes ángulos fue necesaria para la captura completa de su geometría. Si bien el edificio presenta algunas diferencias de paños producto del diseño y juego de materiales se espera que éstas puedan ser ignoradas por el algoritmo de extracción de la información (ver Figura 34).

Implementación de metodología convencional

Obtención de superficies opacas y transparentes de fachada

La medición convencional de superficies se hizo a través de instrumentación básica, utilizando un flexómetro marca Truper de 5.0 m y un distanciómetro de la misma marca con un alcance de 70 m. La utilización de estaciones totales no fue necesaria dadas las distancias máximas de los casos de estudio.



Se midió en cada caso el alto y ancho total de la fachada; adicionalmente se tomaron medidas de los elementos de los vanos de las ventanas y sus respectivos entrepaños. La documentación tomada en sitio fue vaciada posteriormente a un programa de dibujo asistido por computadora con el que se generaron planos de elevaciones y se calcularon las áreas opacas y trasparentes de los componentes cada caso (ver Figuras 35,36 y 37).

Figura 36 Elevación en CAD de 1° Caso de estudio generado con la metodología convencional.

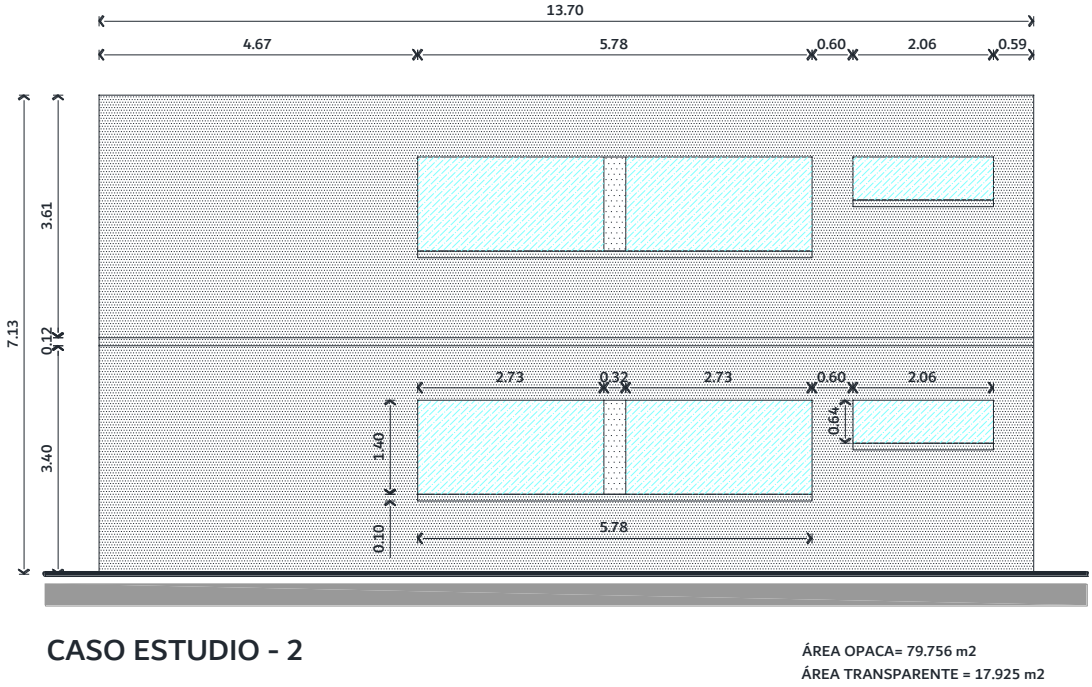


Figura 35 Elevación en CAD de 2° Caso de estudio generado con la metodología convencional.

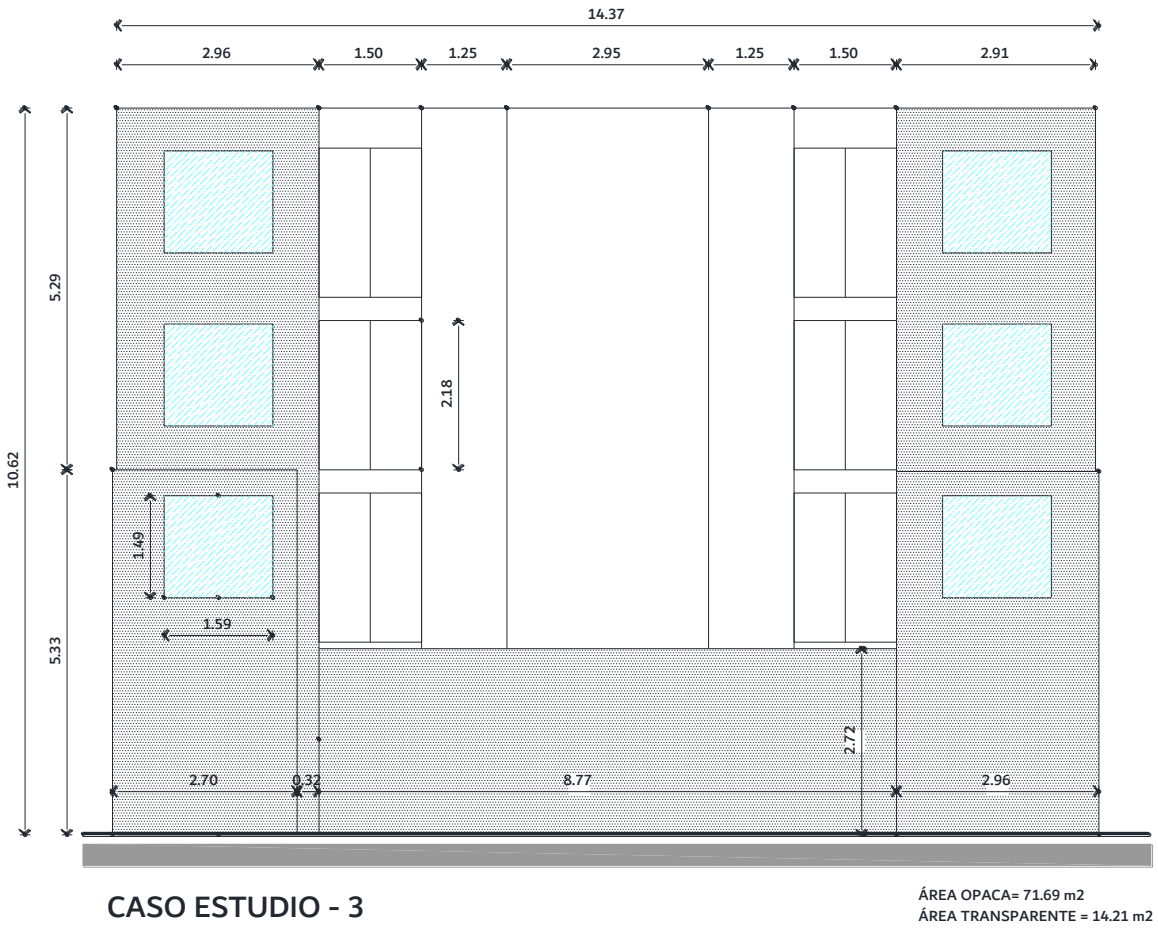


Figura 37 Elevación en CAD de 3° Caso de estudio generado con la metodología convencional.

Las áreas opacas y transparentes a obtenidas se resumen en la tabla 3.

	ÁREA OPACA (m^2)	***ÁREA TRANSPARENTE (m^2)***
CASO 1	9.07	2.82
CASO 2	79.75	17.92
CASO 3	71.69	14.21

Tabla 3 Cuantificación de áreas opacas y transparentes de los 3 casos de estudio.

Cálculo de la eficiencia energética a partir de superficies obtenidas

Se utilizó la herramienta de la CONUEE para el cálculo de las ganancias energéticas de las fachadas. Como se mencionó anteriormente para el cálculo se utilizaron variables para emular un escenario desfavorable en donde los rangos de error se maximizarán y se pudiera poner a prueba la influencia de la exactitud de la metodología propuesta.

En la tabla 4 se tabuló la ganancia energética en cada caso de estudio del edificio de referencia según la norma y del edificios proyectado, comparando ambos resultados se determinó si de acuerdo a la norma, cada caso estudio pasa o no pasa los requerimientos mínimos.

	GANANCIA DE CALOR EN WATTS		
	EDIFICIO REFERENCIA	**EDIFICIO PROYECTADO**	**NOM-008-ENER-2001**
CASO 1	890.652	793.558	SI PASA
CASO 2	8161.309	5936.512	SI PASA
CASO 3	7177.014	4958.606	SI PASA

Tabla 4 Ganancia energética de los 2 casos de estudio estimadas con la herramienta de cálculo de la CONUEE

Estimación de tiempo de trabajo

Para la estimación del tiempo de trabajo de la metodología convencional se tomó en cuenta las siguientes actividades:

1. Medición en sitio de fachada y generación de croquis
2. Vaciado de datos en programa de dibujo CAD
3. Obtención y cálculo de áreas
4. Aplicación de áreas en cálculo de ganancia energética de la fachada utilizando herramienta de cálculo de la NOM-008-ENER-2001 de la CONUEE

Considerando los parámetros anteriores se generaron 2 distintos rangos de trabajo, cuyos resultados se resumen en la tabla 5.

	Caso estudio 1		**Caso estudio 2**		**Caso estudio 3**	
	Tiempo Mínimo	**Tiempo Máximo**	**Tiempo Mínimo**	**Tiempo Máximo**	**Tiempo Mínimo**	**Tiempo Máximo**
1. Medición en sitio	10 Min.	30 Min.	30 Min.	50 Min.	80Min.	100 Min.
2. Vaciado de datos	20 Min.	30 Min.	30 Min.	60 Min.	40 Min.	60 Min.
3. Obtención de áreas	5 Min.	10 Min.	10 Min.	15 Min.	10 Min.	15 Min.
4. Cálculo de ganancias energ.	10 Min.	20 Min.	20 Min.	30 Min.	20 Min.	30 Min.
TOTAL	45 Min.	90 Min.	90 Min.	155 Min.	150 Min.	205 Min.

Tabla 5 Estimación de rangos de tiempo de los 3 casos de estudio.

Implementación de metodología propuesta a partir del uso de tecnología de nubes de puntos

Obtención de superficies opacas y transparentes de fachada

En cada etapa se utilizaron los parámetros y consideraciones estipulados en la propuesta metodológica.

Dado que el proceso de fotogrametría requiere la importación de dimensiones de control para el correcto escalado del modelo y la estimación de su precisión, se utilizó en cada caso de estudio medidas propias del levantamiento convencional.

Adquisición de datos

La obtención de las superficies opacas y transparentes se hizo a través del procesamiento de nubes de puntos generadas a través de fotogrametría en Metashape. Para la obtención de las fotos se usaron 2 dispositivos de cámara de diferentes gamas y características, las fotografías se obtuvieron cuidando un traslape mínimo de área equivalente al 60% entre las mismas. Las tablas 6 y 7 engloban las características del levantamiento fotográfico de los casos de estudio:

ADQUISICIÓN DE DATOS CÁMARA CELULAR			
	NO. DE FOTOS	**DISTANCIA AL EDIFICIO**	**DISTANCIA ENTRE CAPTURAS**
CASO 1	15	3 m	0.5 m
CASO 2	50	7 m	1 m
CASO 3	80	7 m	1 m

Tabla 6 Características del levantamiento fotográfico con celular.

ADQUISICIÓN DE DATOS CÁMARA REFLEX			
	NO. DE FOTOS	**DISTANCIA AL EDIFICIO**	**DISTANCIA ENTRE CAPTURAS**
CASO 1	15	3 m	0.5 m
CASO 2	50	7 m	1 m
CASO 3	80	7 m	1 m

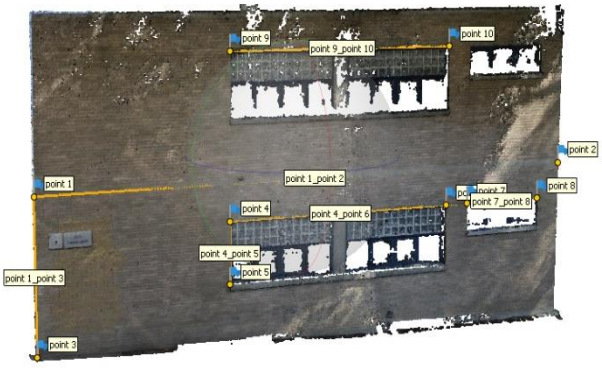
Tabla 7 Características del levantamiento fotográfico con cámara Réflex

Procesamiento fotogramétrico de nube de puntos

Las nubes de puntos se generaron en Metashape; para el escalado y estimación de la precisión de la nube se utilizaron las dimensiones de las fachadas obtenidas a partir del levantamiento convencional. El programa permitió utilizar medidas determinadas para el escalado del modelo y otras medidas para el análisis de la precisión. En las elevaciones de los caso de estudio se puede contemplar las cotas utilizadas para cada uno de los procesos.

El programa calcula el error de cada una de las cotas de “precisión” comparando la medida real introducida y la medida estimada en la nube de puntos. A partir de todos los errores de las cotas de “precisión” Metashape calcula y reporta el error medio cuadrático en metros. El error medio cuadrático o RMSE (por sus siglas en ingles “Root Mean Square Error”) se tabuló en cada uno de los casos de estudio y de las nubes obtenidas con cada dispositivo de captura de imágenes (ver Figura 38 y 39).

Scale Bars	Distance (m)	Accuracy (m)	Error (m)
point 1_point 2	13.700000	0.001000	0.000090
point 1_point 3	3.400000	0.001000	-0.000559
point 4_point 5	1.400000	0.001000	0.005520
point 4_point 6	5.780000	0.001000	-0.004311
point 6_point 7	0.600000	0.001000	-0.005724
point 7_point 8	2.060000	0.001000	-0.002801
point 9_point 10	5.780000	0.001000	-0.008418
Total Error			
Control scale bars			0.000400
Check scale bars			0.005666



Scale Bars	Distance (m)	Accuracy (m)	Error (m)
point 1_point 2	14.370000	0.010000	0.001285
point 1_point 6	2.700000	0.010000	-0.007006
point 2_point 3	2.960000	0.010000	-0.005580
point 4_point 5	2.720000	0.010000	0.006115
point 7_point 8	1.490000	0.010000	0.021417
point 9_point 10	1.590000	0.010000	0.012225
point 11_point 12	1.490000	0.010000	0.021861
point 13_point 14	1.590000	0.010000	0.015840
point 15_point 16	1.590000	0.010000	0.002236
point 17_point 18	1.490000	0.010000	-0.012461
Total Error			
Control scale bars			0.005461
Check scale bars			0.015797

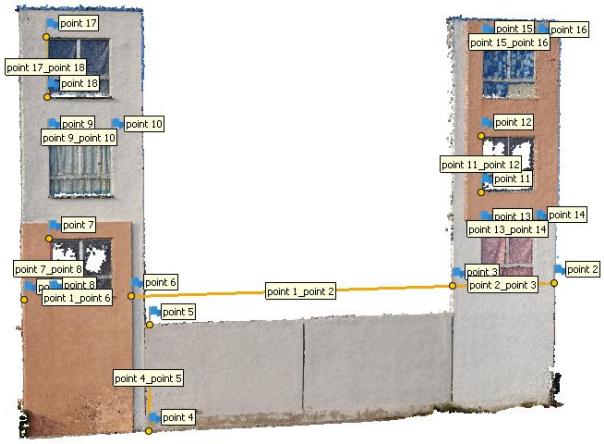


Figura 38 (Izquierda) Tabla de medidas de control utilizadas para escalar los modelos y la medición de la precisión de las respectivas nubes de puntos. Las medidas palomeadas en verde representan las medidas utilizadas para el escalado, las medidas no palomeadas fueron utilizadas para medir la precisión del modelo. (Derecha) Visualización de medidas de control en las respectivas nubes de puntos generadas en Metashape

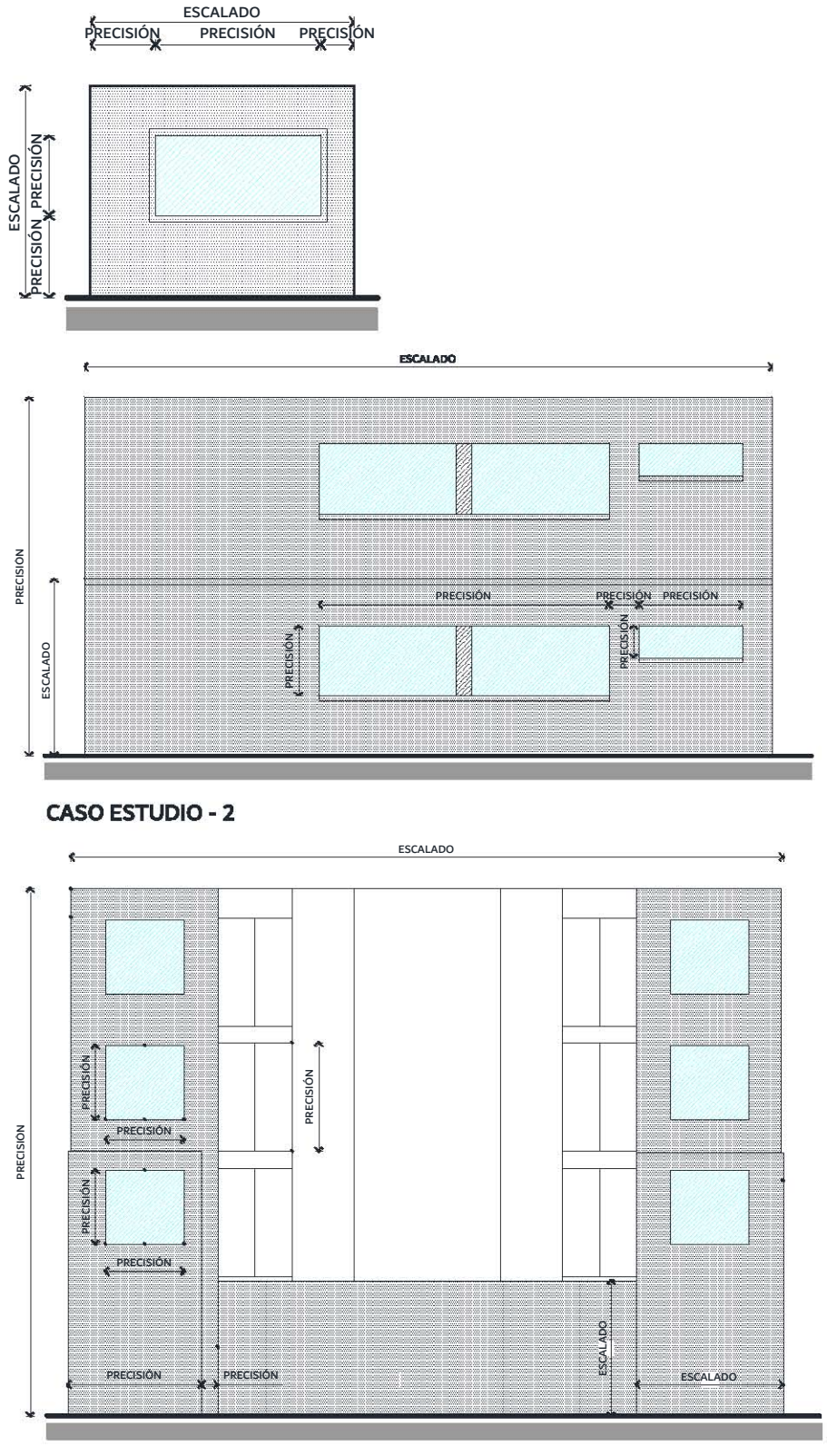


Figura 39 Elevaciones de casos de estudio con indicaciones de las cotas de control utilizadas para el escalado del modelo y las cotas utilizadas para la medición de la precisión

En las tablas 8 y 9 se muestra el error promedio obtenido de las nubes de puntos generadas con cámara de celular y cámara Réflex:

NUBE DE PUNTOS / CÁMARA CELULAR

	NO. DE PUNTOS	ERROR PROMEDIO DE MEDIDAS ESCALARES
CASO 1	59,460	1.42 cm
CASO 2	456, 869	0.8 cm
CASO 3	427,983	1.57cm

Tabla 8 Características de las nubes de puntos de los casos de estudio obtenidas a partir del levantamiento con celular.

NUBE DE PUNTOS / CÁMARA REFLEX

	NO. DE PUNTOS	ERROR PROMEDIO DE MEDIDAS ESCALARES
CASO 1	53,960	1.57 cm
CASO 2	469,664	0.5 cm
CASO 3	414,936	1.11 cm

Tabla 9 Características de las nubes de puntos de los casos de estudio obtenidas a partir del levantamiento con cámara Réflex.

Extracción de superficies opacas y transparentes

Se obtuvieron las áreas de la componente opaca y transparente utilizando las nubes puntos generadas con los dos dispositivos propuestos (la cámara réflex y la cámara del celular) y el algoritmo propuesto para la extracción de la información. La estimación del error representa la diferencia entre las áreas obtenidas con la metodología propuesta y aquellas obtenidas con la metodología convencional.

Los resultados de los 3 casos de estudio de las áreas individuales obtenidas de las superficies opacas y transparentes se resumen en las tablas 10 y 11.

DISPOSITIVO / CÁMARA CELULAR

	SUPERFICIE	AREA REAL MEDIDA (m^2)	ÁREA OBTENIDA (m^2)	ERROR (m^2)
CASO 1	Muro opaco	7.88	8.28	0.4
	Ventana 1	2.82	2.849	0.029
CASO 2	Muro opaco	79.756	80.37	0.614

	Ventana 1	3.822	3.991	0.169
	Ventana 2	3.822	3.991	0.169
	Ventana 3	3.822	3.815	-0.007
	Ventana 4	3.822	3.797	-0.025
	Ventana 5	1.318	1.477	0.159
	Ventana 6	1.318	1.542	0.224
	Muro opaco	71.69	70.111	-1.579
	Ventana 1	2.369	2.596	0.227
CASO 3	Ventana 2	2.369	2.545	0.176
	Ventana 3	2.369	2.47	0.101
	Ventana 4	2.369	2.408	0.039
	Ventana 5	2.369	2.294	-0.075
	Ventana 6	2.369	2.12	-0.157

Tabla 10 Cuantificación de áreas de muros opacos y transparentes obtenidas a partir de la metodología propuesta con cámara de celular. Se cuantifica adicionalmente el error respecto a las áreas obtenidas del levantamiento convencional.

DISPOSITIVO / CÁMARA REFLEX

	SUPERFICIE	**AREA REAL MEDIDA (m^2)**	**ÁREA OBTENIDA (m^2)**	**ERROR (m^2)**
CASO 1	Muro opaco	7.88	8.11	0.23
	Ventana 1	2.82	2.9091	0.0891
CASO 2	Muro opaco	79.756	80.29	0.534
	Ventana 1	3.822	4.089	0.267
	Ventana 2	3.822	4.089	0.267
	Ventana 3	3.822	3.903	0.081
	Ventana 4	3.822	3.811	-0.011
	Ventana 5	1.318	1.294	-0.024
	Ventana 6	1.318	1.373	0.055
CASO 3	Muro opaco	71.69	70.127	-1.563
	Ventana 1	2.369	2.567	0.198
	Ventana 2	2.369	2.527	0.158

Ventana 3	2.369	2.508	0.139
Ventana 4	2.369	2.420	0.051
Ventana 5	2.369	2.400	0.031
Ventana 6	2.369	2.082	-0.287

Tabla 11 Cuantificación de áreas individuales de muros opacos y transparentes obtenidas a partir de la metodología propuesta con cámara de Réflex. Se cuantifica adicionalmente el error respecto a las áreas obtenidas del levantamiento convencional.

Dado que la NOM-008-ENER-2001 requiere la suma de las superficies opacas y transparentes de la fachada se tabularon la suma de las áreas opacas y transparentes de cada caso de estudio y con cada dispositivo de captura propuesto. De igual manera se calculó el error entre las áreas obtenidas y las medidas con la metodología convencional de referencia (ver Tablas 12 y 13).

DISPOSITIVO / CÁMARA CELULAR

	SUPERFICIE	**AREA REAL MEDIDA (m^2)**	**ÁREA OBTENIDA (m^2)**	**ERROR (m^2)**
CASO 1	Área opaca	7.88	8.28	-0.4
	Área transp.	2.82	2.849	-0.029
CASO2	Área opaca	79.756	80.37	-0.614
	Área transp.	17.9248	18.613	-0.6882
CASO 3	Área opaca	71.69	70.111	1.579
	Área transp.	14.21	14.525	-0.315

Tabla 12 Cuantificación de áreas totales de muros opacos y transparentes obtenidas a partir de la metodología propuesta con cámara de celular. Se cuantifica adicionalmente el error respecto a las áreas obtenidas del levantamiento convencional.

DISPOSITIVO / CÁMARA REFLEX

	SUPERFICIE	**AREA REAL MEDIDA (m^2)**	**ÁREA OBTENIDA (m^2)**	**ERROR (m^2)**
CASO 1	Área opaca	7.88	8.11	0.23
	Área transp.	2.82	2.9091	0.0891
CASO2	Área opaca	79.756	80.29	-0.534
	Área transp.	17.9248	18.559	-0.6342
CASO 3	Área opaca	71.69	70.127	1.563
	Área transp.	14.21	14.504	-0.294

Tabla 13 Cuantificación de áreas totales de muros opacos y transparentes obtenidas a partir de la metodología propuesta con cámara de Réflex. Se cuantifica adicionalmente el error respecto a las áreas obtenidas del levantamiento convencional.

Cálculo de la eficiencia energética a partir de superficies obtenidas

Las superficies obtenidas con el método propuesto se utilizaron para calcular las ganancias energéticas de la fachada establecidas por la norma; el cálculo se realizó a partir de la herramienta en programación visual propuesta.

Para el cálculo de las ganancias energéticas se utilizaron los mismos parámetros que en el cálculo de la metodología convencional los cuales determinan: localización, orientación, coeficiente de sombreado de vidrio, factor de corrección de sombre y sistema constructivo de las fachadas.

Las ganancias de calor estimadas a partir de las áreas obtenidas de las nubes de puntos con ambos dispositivos propuestos, así como los resultados de la norma NOM-008-ENER-2001 se pueden visualizar en las tablas 14 y 15.

GANANCIA DE CALOR EN WATTS CÁMARA CELULAR

	EDIFICIO REFERENCIA (w)	EDIFICIO PROYECTADO (w)	NOM-008-ENER-2001
CASO 1	929.837	812.437	SI PASA
CASO 2	8270.109	60091.423	SI PASA
CASO 3	7071.406	4974.038	SI PASA

Tabla 14 Ganancias de calor estimadas a partir de las áreas obtenidas con la nube de puntos generada con la cámara del celular.

GANANCIA DE CALOR EN WATTS CÁMARA REFLEX

	EDIFICIO REFERENCIA (w)	EDIFICIO PROYECTADO (w)	NOM-008-ENER-2001
CASO 1	920.655	819.296	SI PASA
CASO 2	8258.913	6078.319	SI PASA
CASO 3	7070.988	4970.347	SI PASA

Tabla 15 Ganancias de calor estimadas a partir de las áreas obtenidas con la nube de puntos generada con la cámara Réflex.

De modo similar se compararon los valores de las ganancias energéticas (obtenidos con la metodología propuesta contra los valores de las ganancias energéticas obtenidos con la metodología convencional. El objetivo de esta comparación es determinar el impacto que tienen los valores de error acumulados en los valores finales calculados por la NOM-008-ENER-2001 (ver Tablas 16 y 17).

GANANCIA DE CALOR EN WATTS CÁMARA CELULAR

	TIPO DE EDIFICIO	GANANCIA REAL WATTS (w)	GANANCIA OBTENIDA WATTS (w)	ERROR WATTS (w)
CASO 1	Referencia	893.994	929.837	35.843
	Proyectado.	794.751	812.437	17.686
CASO2	Referencia	8161.309	8270.109	108.86
	Proyectado.	5936.512	6091.423	155.745
CASO 3	Referencia	7177.014	7071.406	-105.608
	Proyectado.	4958.606	4974.038	15.432

Tabla 16 Comparación de las ganancias de calor estimadas a partir de la nube de puntos generada con cámara del celular respecto a las ganancias obtenidas a partir del levantamiento convencional

GANANCIA DE CALOR EN WATTS CÁMARA REFLEX

	TIPO DE EDIFICIO	GANANCIA REAL WATTS (w)	GANANCIA OBTENIDA WATTS (w)	ERROR WATTS (w)
CASO 1	Referencia	890.652	920.655	26.66
	Proyectado.	793.558	819.296	25.545
CASO2	Referencia	8161.309	8258.913	97.671
	Proyectado.	5936.512	6078.319	141.641
CASO 3	Referencia	7177.014	7070.988	-106.026
	Proyectado.	4958.606	4970.347	11.741

Tabla 17 Comparación de las ganancias de calor estimadas a partir de la nube de puntos generada con cámara Réflex respecto a las ganancias obtenidas a partir del levantamiento convencional

Estimación de tiempo de trabajo

Para la estimación del tiempo de trabajo de la metodología convencional se tomó en cuenta las siguientes actividades:

1. Toma de fotografías en sitio y toma de medidas de control
2. Generación de nubes de puntos utilizando Metashape y fotogrametría
3. Obtención de áreas propuestas a través de algoritmo de extracción de la información
4. Cálculo de las ganancias energéticas de la fachada de acuerdo con la NOM-008-ENER-2001 utilizando la herramienta de cálculo integrada en programación visual.

Considerando los parámetros anteriores se estimaron los rangos de tiempo mínimo y máximo de cada actividad. (ver Tabla 18).

	Caso estudio 1		Caso estudio 2		Caso estudio 3	
	Tiempo Mínimo	**Tiempo Máximo**	**Tiempo Mínimo**	**Tiempo Máximo**	**Tiempo Mínimo**	**Tiempo Máximo**
1. Toma de fotos y medidas de control	10 Min	15 Min.	10 Min.	30 Min.	10Min.	30 Min.
2. Generación de NP/ fotogrametría	20 Min.	30 Min.	40 Min.	60 Min.	40 Min.	60 Min.
3. 1. Obtención de áreas propuestas a través de algoritmo de extracción de la información	10 Min.	30 Min.	20 Min.	40 Min.	20 Min.	40 Min.
4. Cálculo de ganancias energéticas con herramienta propuesto	5 Min.	10 Min.	5 Min.	10 Min.	5 Min.	10 Min.
TOTAL	45 Min.	85 Min.	75 Min.	140 Min.	75 Min.	140 Min.

Tabla 18 Estimación de tiempos de trabajo de cada caso de estudio utilizando la metodología propuesta.

5.0 COMPARACIÓN METODOLÓGICA

Análisis de la exactitud de las nubes de puntos

Para el análisis de la exactitud de las nubes de puntos generadas con fotogrametría en Metashape, se utilizaron los datos del error medio cuadrático de cada una de las nubes con cada uno de los dispositivos de captura (cámara del celular y cámara Réflex).

Como se había mencionado, en cada caso de estudio se utilizaron medidas específicas tanto para el escalado de la nube como para la medición de la precisión, este último conjunto de medidas fue utilizado por Metashape para el cálculo del error medio cuadrático. El error calculado es producto de la diferencia entre las medidas reales de referencia introducidas en Metashape y las medidas estimadas en la nube de puntos.

La gráfica 2 permite visualizar y comparar el error en centímetros de las nubes de puntos de los 3 casos de estudio, generadas con los 2 dispositivos de captura propuestos.

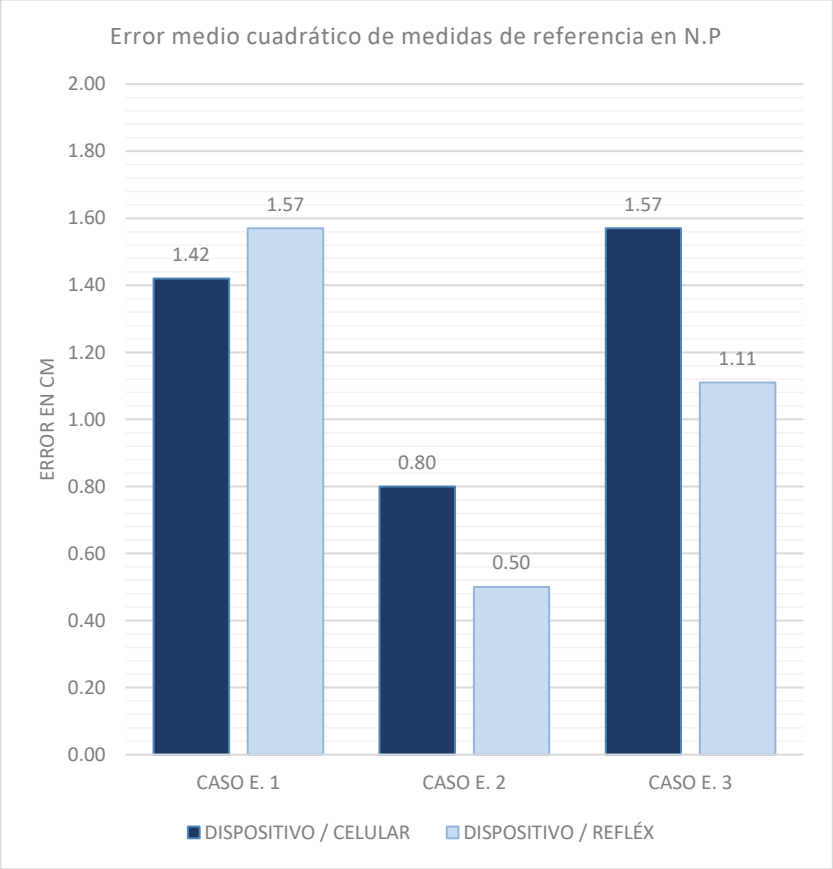


Gráfico 2 Gráfica de barras del error medio cuadrático calculado por Metashape de las nubes de puntos en cada caso de estudio. Se comparan las nubes de puntos generadas con las fotografías de la cámara Réflex con las nubes generadas con las fotos del dispositivo móvil.

Se puede observar que en todos los casos el error medio cuadrático no supera el valor de los 2 cm teniendo como valor máximo los 1.57 cm en los casos de estudio 1 y 3.

Es interesante observar que en los casos de estudio 1 y 3 el error estimado es similar esto a pesar de la diferencia existente entre las alturas de las fachadas de cada caso (1 nivel en el caso de estudio 1 y 4 niveles en el caso de estudio 3), sugiriendo que no existe una diferencia significativa de error producto de la altura de las fachadas utilizadas en el estudio.

Por otra parte también se observa que el error en cada caso de estudio tiende a ser menor cuando se utilizan fotos o imágenes obtenidas a partir de una cámara profesional en lugar de una cámara integrada en un dispositivo celular; sin embargo es necesario destacar que los errores existentes entre las nubes de puntos de cada dispositivo no superan la diferencia de 0.5cm por lo que la cámara del celular se posiciona como una opción viable para la obtención de nubes de puntos de fachadas con características similares.

Si bien los errores dimensionados superan el rango de 1 cm, es importante considerar que estos también contemplan la estrategia utilizada para la captura de las fotos, en la cual solo se utilizaron fotografías al pie de calle sin la necesidad de drones o vehículos aéreos para la captura de imágenes perpendiculares en altura de las fachadas Teniendo en cuenta estos aspectos la generación de modelos de nubes de puntos con esta estrategia es viable siempre que los objetivos mínimos de precisión estipulados se encuentren alrededor de los 1.5 cm.

Comparación de superficies obtenidas con metodología propuesta y convencional

A partir de las nubes de puntos y el algoritmo propuesto de extracción de superficies, se obtuvieron las áreas correspondientes a las componentes opacas y transparentes de cada caso de estudio, las cuales fueron utilizadas para el análisis de precisión y exactitud.

Para la validación se compararon los datos de las áreas calculadas a partir del proceso propuesto con aquellas obtenidas a partir de un levantamiento convencional. El error estimado de cada medida representa la diferencia absoluta entre los valores de las áreas obtenidas con ambos métodos.

Se hizo el cálculo del error a partir del total de las áreas opacas y transparentes respectivas de cada caso de estudio. La razón de considerar el error total de las áreas de las superficies en lugar del valor del error individual de cada una de las porciones, es debido a que la NOM-008-ENER-2001 solo contempla la suma de las áreas opacas y transparentes de cada fachada considerando que éstas tienen el mismo sistema constructivo.

Cabe destacar que el valor del error en m^2 de cada caso estudio está en función de las proporciones y magnitudes de sus respectivas fachadas, por lo que este valor aumentará cuando la superficie de la fachada sea mayor y disminuirá cuando la superficie de la fachada sea menor. Para obtener una medida de error adimensional y poder hacer posible la comparación de errores entre los casos de estudio se utilizó el valor del error relativo.

Este valor expresado en porcentaje se calcula con la siguiente ecuación y estima el valor de error en proporción con las dimensiones base.

$$\varepsilon r = \left|\frac{X_i - X_v}{X_v}\right| 100\% \qquad (7)$$

En donde:

εr = Error relativo

X_i = Dimensión de superficie estimada

X_v = Dimensión de superficie real

A partir de los valores del error relativo se compararon los diferentes casos de estudio tomando en consideración el dispositivo de captura de imágenes con el que se generaron las nubes de puntos base.

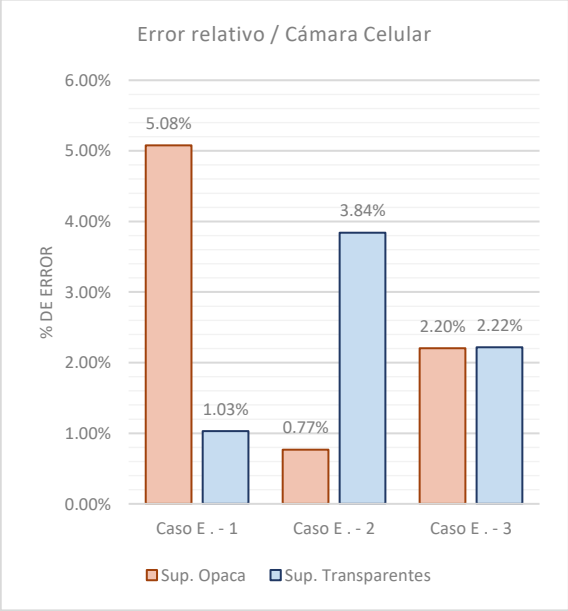


Gráfico 3 Gráfica de barras del error relativo de las áreas opacas y transparentes obtenidas con la metodología propuesta en comparación a la metodología convencional. Las gráficas cubren los 3 casos de estudio y las nubes generadas con la cámara del celular.

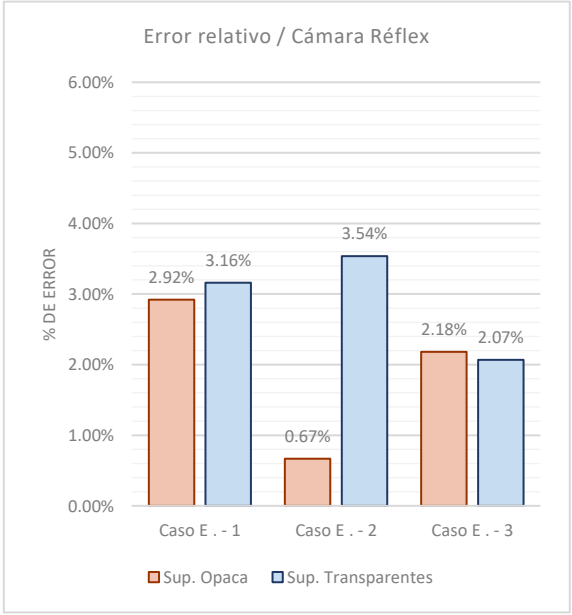


Gráfico 4 Gráfica de barras del error relativo de las áreas opacas y transparentes obtenidas con la metodología propuesta en comparación a la metodología convencional. Las gráficas cubren los 3 casos de estudio y las nubes generadas con la cámara Réflex.

Se puede observar en las gráficas 3 y 4 que, en casi todos los casos el error relativo de las superficies se encuentra por debajo del 5% con un rango que va desde el 0.67% hasta 5.08%., encontrándose la mayoría por debajo del 4% de error relativo.

Con excepción del caso de estudio 1, los valores de error de las superficies opacas y transparentes son similares tanto en las nubes generadas a partir de la cámara Réflex como en aquellas generadas con la cámara del celular.

Por otra parte, las superficies obtenidas a partir de las nubes de puntos generadas con las imágenes de la cámara Réflex mantienen rangos menores de error en cada caso estudio respecto a sus contrapartes pertenecientes al grupo de las nubes generadas con la cámara del celular. Sin embargo, también es importante destacar que en los casos de estudio 2 y 3, dicha diferencia dada por los dispositivos de captura es menor al 0.2%.

Lo anterior si bien nos corrobora la ventaja de la utilización de equipos profesionales de fotografía contra aquellos integrados en dispositivos móviles, también nos indica, dado el rango mínimo de diferencia de error, del gran precio / beneficio que estos últimos tienen respecto a las cámaras profesionales.

Si bien todos los valores de las superficies alcanzan un rango aceptable de exactitud (debajo del 5% de error), no lo hacen respecto a la precisión. Dado que la precisión evalúa el grado de proximidad que tienen las diferentes mediciones entre sí, es claro que el algoritmo de extracción de la información propuesto tiene aún oportunidades de mejora. Lo anterior basado en las grandes diferencias existentes entre los valores de error de las superficies opacas y los de las superficies transparentes, en donde se tienen diferencias de hasta un 4% (en el caso de estudio 1 de las nubes de puntos de la cámara del celular).

Adicionalmente, el análisis se realizó tomando en cuenta el error de porcentaje medio absoluto (conocido como MAPE por sus siglas en inglés “Mean Absolute Percentage Error”) el cual equivale al promedio del error relativo de todas las superficies.

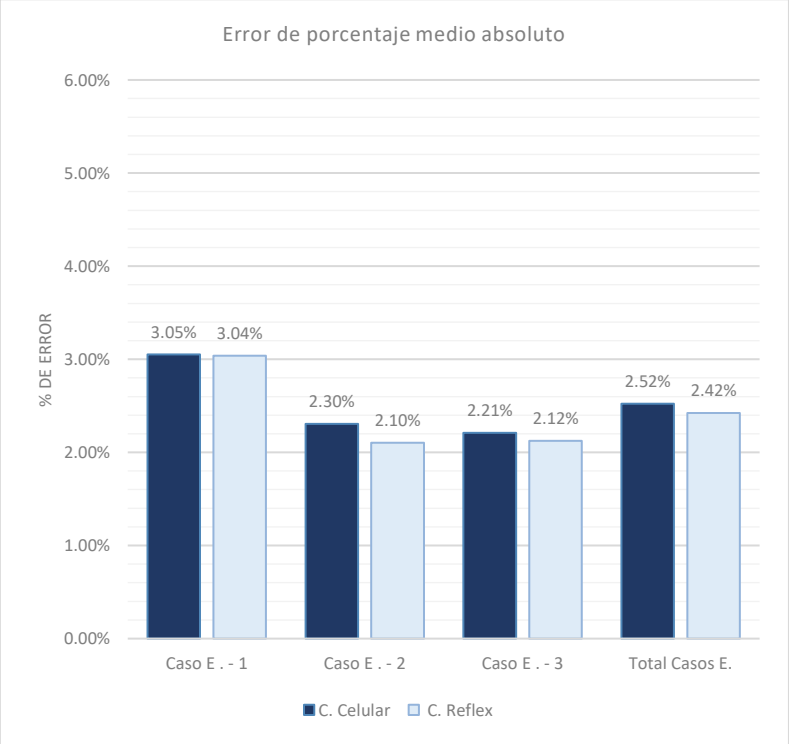


Gráfico 5 Gráfica de barras del error relativo total de las superficies obtenidas con la metodología propuesta. En la gráfica se toma en cuenta el dispositivo de fotografía utilizado para la generación de las nubes de puntos en cada uno de los casos de estudio.

De manera similar en la gráfica 5 se observa una disminución de error en las superficies obtenidas con nubes de puntos generadas a partir de las imágenes de

la cámara profesional, sin embargo, la diferencia de error respecto a las nubes generadas con imágenes del celular es mínima. En el caso del error de porcentaje medio absoluto, esta diferencia es menor al 0.1%.

Aunque en la gráfica de errores de superficies opacas y transparentes existen diferencias de valores de hasta un 4%, el error de porcentaje medio absoluto de las mismas permite visualizar la precisión general de la metodología propuesta respecto de las áreas totales de cada una de las fachadas y de todos los casos de estudio.

En la columna Total Casos E., se tomó en cuenta el promedio de error relativo de todas las superficies de los 3 casos de estudio, dando como resultado un error relativo de 2.52% en el caso de las nubes de puntos generadas con celular y 2.42% en el caso de las nubes generadas con cámara Réflex.

Impacto de la metodología en la ganancia energética calculada por la NOM-008-ENER-2001

Puesto que el objetivo principal de la presente investigación es proponer una metodología para la integración de la tecnología de nube de puntos en los procedimientos de inspección y cálculo conforme a la normativa mexicana de eficiencia energética NOM-008-ENER-2001. Es indispensable analizar el impacto de la metodología propuesta en los procesos de análisis propios de la norma.

La NOM-008-ENER-2001 contiene los procedimientos para calcular y evaluar las ganancias energéticas de las envolventes a partir de diversas variables, entre las cuales se encuentran las áreas de las superficies opacas y transparentes de las fachadas. Al proponer un método de extracción de dichas variables a partir de las nubes de puntos, es lógico suponer que los errores de la generación y procesamiento de las nubes impactan de forma proporcional a los resultados del cálculo.

Para analizar el impacto del método propuesto, se reconstruyó el cálculo de las ganancias energéticas estipulado por la norma utilizando las áreas opacas y transparentes obtenidas del método propuesto y se comparó con un cálculo similar con las variables obtenidas a partir de un método convencional de medición. Las variables adicionales para el cálculo de ganancia energética como localización, sistema constructivo de muros y ventanas, asoleamiento, orientación y sombreado se mantuvieron constantes.

Utilizando los valores de ganancia obtenidos a partir de las superficies pertenecientes al método convencional, se calcularon los errores de los valores de ganancia energética obtenidos de las superficies del método propuesto (ver Gráficas 6 y 7).

Se utilizó el cálculo del error relativo para obtener valores adimensionales que pudieran ser comparados entre los 3 casos de estudio propuestos. Se graficaron los valores del error relativo de las ganancias energéticas del edificio de referencia y del edificio proyectado, en cada caso de estudio.

De modo similar a los valores de error relativo de las superficies opacas y transparentes, los valores de error relativo de las ganancias energéticas se sitúan

por debajo del 5% independientemente del dispositivo utilizado para la generación de las nubes de puntos.

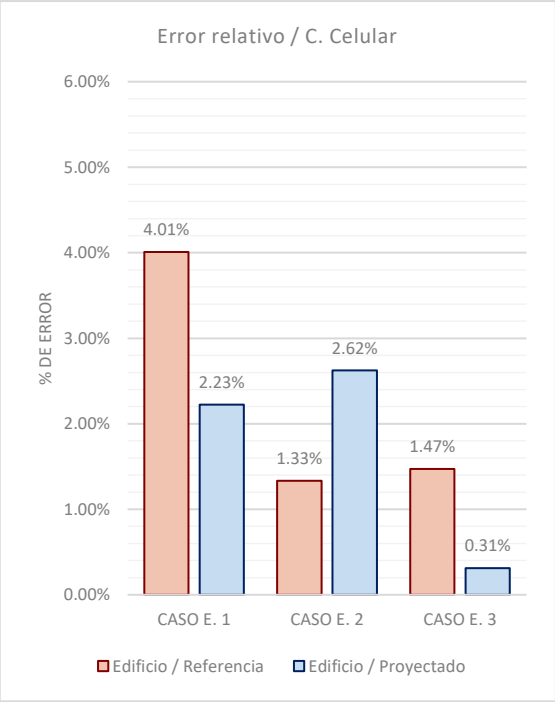


Gráfico 6 Gráfica de barras del error relativo de las ganancias energéticas obtenidas a partir de las áreas de la metodología propuesta. Las gráficas cubren los 3 casos de estudio de las nubes generadas con la cámara del celular.

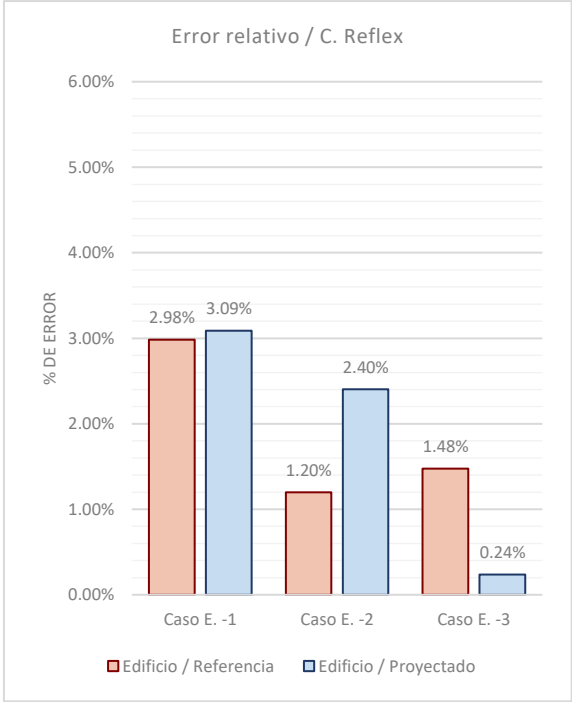


Gráfico 7 Gráfica de barras del error relativo de las ganancias energéticas obtenidas a partir de las áreas de la metodología propuesta. Las gráficas cubren los 3 casos de estudio de las nubes generadas con la cámara Réflex.

Con excepción del caso de estudio 1, los valores de ganancia calculada en los caso de estudio 2 y 3 son similares entre los 2 dispositivos. En esta gráfica se visualiza nuevamente que los valores de error relativo son menores en las nubes de puntos generadas con la cámara Réflex, aunque la diferencia de estos valores respecto a los de las nubes generadas con la cámara del celular, es menor al 1% en la mayor parte de los casos y menor al 2% en el caso de estudio 1.

Una observación relevante es que existe una gran diferencia entre los errores relativos del edificio de referencia y el edificio proyectado de cada caso estudio (en ambos dispositivos de captura), la cual es causada de manera directa por el error de las áreas de las superficies opacas y transparentes obtenidas por medio del algoritmo de extracción de la información propuesto. La diferencia máxima de error relativo visualizada se encontró en el caso de estudio 1 de las nubes de puntos generadas con celular, con un valor máximo de 1.78%.

Para comprenderlo mejor se considera que, si en un caso de estudio se obtienen las áreas opacas y transparentes con un error relativo igual, este mismo error relativo se verá reflejado en las ganancias energéticas de los edificios de referencia y proyectado de dicho caso estudio. Sin embargo, cuando el error relativo de las áreas opacas y transparentes no es igual, esto causara una diferencia relevante entre los valores de error relativo pertenecientes a las ganancias energéticas del edificio de referencia y edificio proyectado. En otras palabras, la diferencia de error entre los valores del edificio proyectado y de referencia es causada por la diferencia de error existente entre las superficies opacas y las transparentes obtenidas con el método propuesto.

Se tabuló adicionalmente el error de porcentaje medio absoluto de las ganancias energéticas totales. Este valor permite comprender en términos generales el porcentaje de error derivado de los dispositivos de captura en cada caso de estudio (ver Gráfica 8).

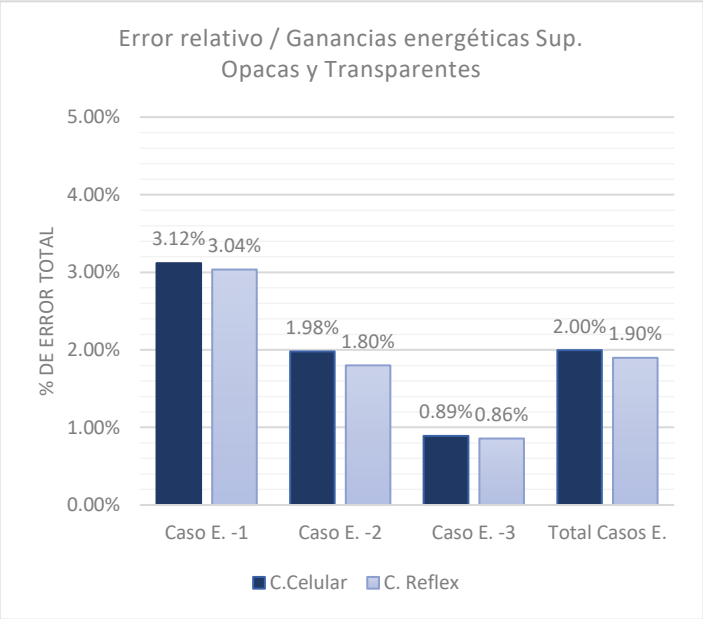


Gráfico 8 Gráfica de barras del error relativo total de las ganancias energéticas totales obtenidas con la metodología propuesta. En la gráfica se toma en cuenta el dispositivo de fotografía utilizado para la generación de las nubes de puntos en cada uno de los casos de estudio. El último par de barras representa el error relativo considerando el promedio total de las ganancias energéticas de los 3 casos de estudio

Se observa que los errores fueron consistentes entre las nubes obtenidas con los 2 dispositivos propuestos. El mayor error lo tuvo el caso de estudio 1 con un 3.12% y el menor el caso de estudio 3 con 0.86%. Todos los errores se mantuvieron por debajo de 4%.

Tomando en cuenta todos los casos de estudio se tiene que el impacto de la metodología en los resultados de la norma es de un rango de error entre 2 - 4%. De igual manera se observa que el uso de la cámara Réflex permite la obtención de mejores resultados, aunque la diferencia respeto al error obtenido con la cámara del celular es por debajo de 1%.

Impacto de la metodología en los tiempos de trabajo

Se compararon los tiempos totales de trabajo requeridos en los 3 casos de estudio. Cada metodología (propuesta y convencional) contempla diferentes procesos para el cumplimiento de la tarea propuesta. El proceso de cada metodología considera desde la toma de mediciones o fotografías en sitio hasta la obtención del cálculo de las ganancias energéticas estipulado por la norma. Cabe destacar que se consideró un rango de tiempo mínimo y máximo para la realización de las diferentes tareas, esto debido a las distintas variables que impactan la velocidad del proceso.

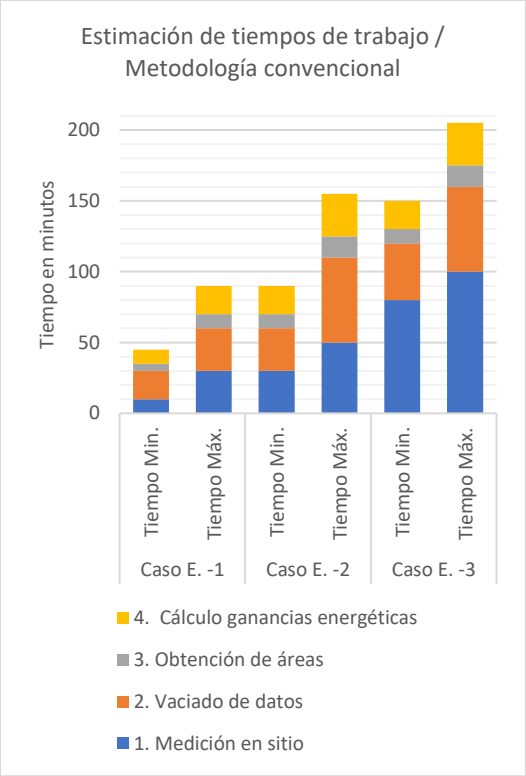


Gráfico 9 Gráfica de tabulación de tiempos de trabajo de la metodología convencional.

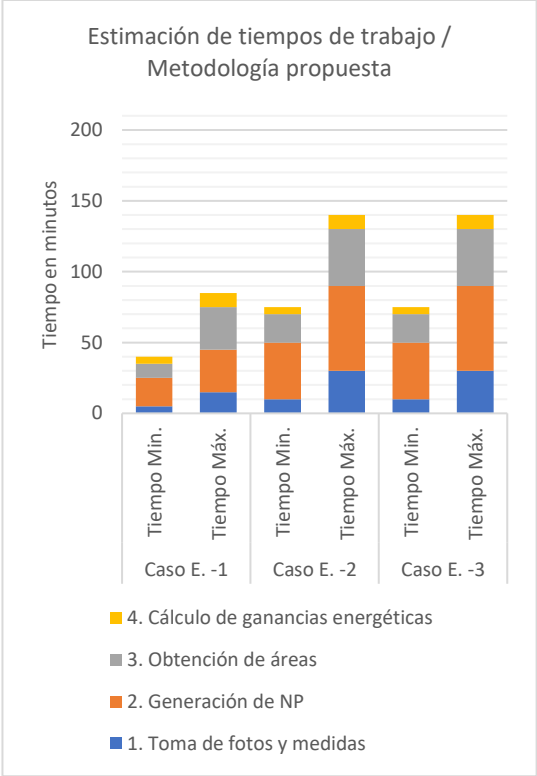


Gráfico 10 Gráfica de comparación de tiempos de trabajo de la metodología propuesta.

Las gráficas 9 y 10 muestra los tiempos mínimos y máximos (en minutos) considerados en cada caso de estudio y con cada una de las metodologías. En cada barra de tiempo se visualiza con colores los diferentes procesos propios de cada metodología, con la finalidad de entender la proporción de tiempo que conlleva cada una de las actividades.

Se puede observar de manera general que los tiempos de trabajo medidos en la metodología propuesta son menores en los 3 casos de estudio.

La diferencia máxima entre los tiempos registrados de aplicación de las metodologías, se encuentra en el caso de estudio 3, en donde el tiempo mínimo registrado de la metodología convencional es de 150 minutos contra los 75 minutos de la metodología propuesta (75 minutos de diferencia). Respecto al rango de tiempo máximo del mismo caso de estudio la diferencia entre ambas metodologías disminuye, considerando 205 minutos de la metodología convencional y 140 de la metodología propuesta (65 minutos de diferencia).

Por otra parte, la diferencia mínima registrada entre los tiempos de trabajo se encuentra en el caso de estudio 1 en donde ambas metodologías registran 45 minutos totales. Esto es debido a la baja altura y complejidad de este caso de estudio (compuesto por 1 solo nivel en planta baja), haciendo de su levantamiento un proceso sencillo y rápido por medio de métodos convencionales.

Respecto a la proporción de los tiempos de trabajo entre los casos de estudio, se puede apreciar que en el caso de la metodología convencional los tiempos tienen un aumento proporcional a las dimensiones de la altura y superficie de la fachada. Siendo el caso de estudio 3 (4 niveles) el que cuenta con un mayor tiempo de trabajo en sitio en comparación a los casos de estudio 2 (2 niveles) y caso de estudio 1 (1 nivel). Este comportamiento se pude explicar si se considera el mayor esfuerzo que requiere el levantamiento de superficies de mayor altura con equipo de medición básico y ausencia de estaciones totales.

En comparación en la metodología propuesta los tiempos de trabajo en sitio en los casos de estudio 2 y 3 son similares; fenómeno que ocurre debido a la facilidad con la que la fotografía a pie de calle se ajusta a las respectivas fachadas independientemente de su altura, evitando la toma adicional de medidas en sitio.

El comportamiento de los tiempos permite entender que la efectividad de la metodología propuesta aumenta cuando se aplica en fachadas de mayor altura en donde el registro de distancias se dificulta para los equipos simples de medición convencional (flexómetros y distanciómetros).

Este fenómeno se observa de forma más pronunciada al graficar el porcentaje de ahorro de tiempo entre la metodología propuesta y la convencional.

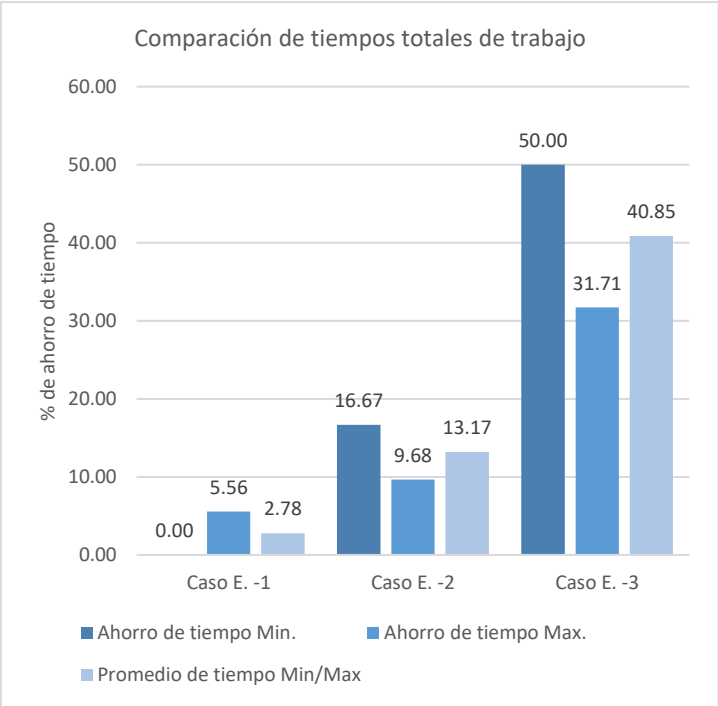


Gráfico 11 Ahorro de tiempo de la metodología propuesta respecto a la convencional. Se presentan los 3 casos de estudio tomando en cuenta el rango mínimo y máximo de tiempo, así como su respectivo promedio.

Como se observa en la gráfica 11, el mayor ahorro de tiempo (50%) se obtiene en el caso de estudio 3 considerando los tiempos mínimos de trabajo de ambas metodologías, mientras que el menor es en el caso de estudio 1 (0%). De acuerdo al promedio del porcentaje de ahorro de los rangos mínimos y máximos se tiene que en el caso de una fachada de 4 niveles se puede lograr alrededor de un 40% de ahorro de tiempo utilizando la metodología propuesta respecto a al convencional y un 13% en el caso de una fachada de 2 niveles como es el caso del caso estudio 2. Contrario a los otros casos, no se recomienda la metodología propuesta en casos de estudio de 1 nivel, debido al ahorro de tiempo tan reducido (2.7%).

Finalmente es importante considerar la proporción de tiempo que conlleva cada una de las actividades en ambas metodologías. De acuerdo a las gráficas de estimación de porcentaje, en la metodología convencional una de las actividades más demandantes en tiempo es el vaciado de datos obtenidos en sitio. Esta actividad se hace utilizando programas CAD que posteriormente permitan el cálculo de las áreas de las superficies, esta actividad solo se ve superada en proporción de tiempo en el caso de estudio 3 en donde la medición en sitio ocupo casi un 50% del tiempo total del proceso, en contraparte la obtención de las áreas y el cálculo de las ganancias energéticas fueron los procesos más sencillos de esta metodología.

Respecto a la metodología propuesta la generación de las nubes de puntos fue el proceso más demandante de tiempo en todos los casos de estudio, ocupando entre el 30% y 50% del tiempo total de la actividad, esta actividad es seguida de la obtención de las áreas a partir del algoritmo de extracción de la información, lo cual denota área potencial de mejora para el algoritmo. En contraste con la metodología convencional, la toma de fotos y medidas de control en sitio ocupa un menor porcentaje del tiempo total de procesamiento con un máximo de 20%. Cabe agregar que la implementación del cálculo de las ganancias energéticas en programación visual, permitió un mejoramiento en su rapidez ocupando un 10% del tiempo total de la metodología propuesta en contraste con el 30% del tiempo de la metodología convencional.

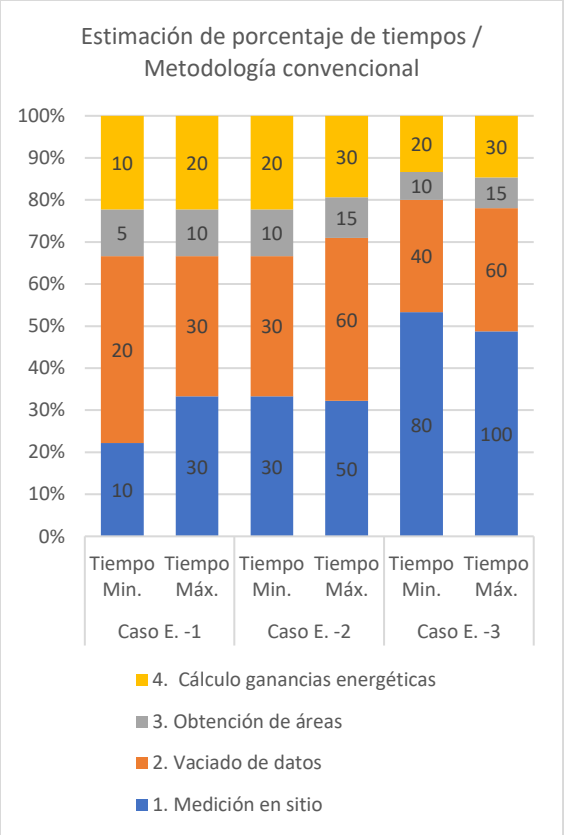


Gráfico 12 Gráfica de proporción de tiempos de trabajo por actividad. Se consideran los tiempos de la aplicación de la metodología convencional en los 3 casos de estudio.

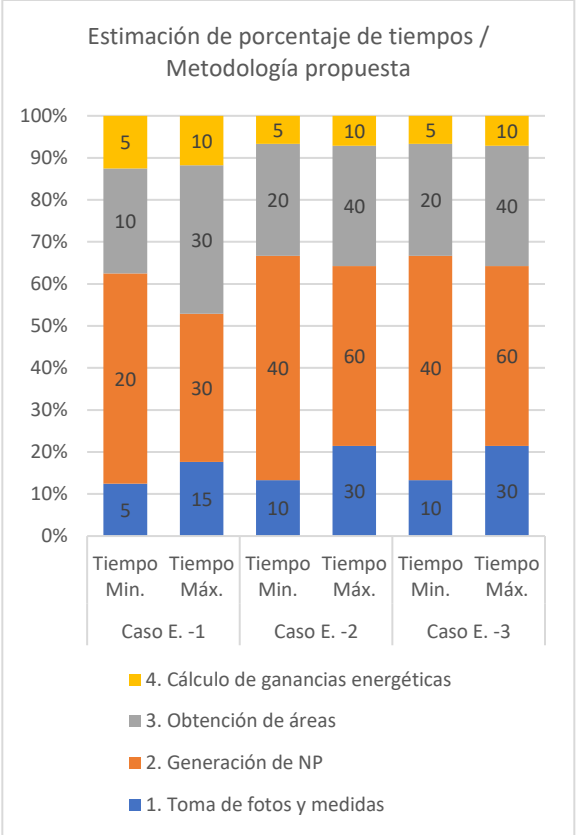


Gráfico 13 Gráfica de proporción de tiempos de trabajo por actividad. Se consideran los tiempos de la aplicación de la metodología propuesta en los 3 casos de estudio.

6.0 CONCLUSIONES

El presente estudio tuvo como objetivo principal proponer una metodología para integrar la tecnología de nube de puntos en los procesos de inspección y cálculo de ganancias energéticas de las envolventes conforme a lo estipulado por la norma mexicana de eficiencia energética NOM-008-ENER-2001.

Se propuso particularmente la utilización de esta tecnología para obtener de forma semiautomática las áreas opacas y transparentes de las fachadas, las cuales son variables indispensables para el cálculo de las ganancias energéticas. Esta metodología contempla el proceso para la obtención de las nubes de puntos a través de la técnica de la fotogrametría. Se propuso la utilización de 2 dispositivos de captura de imágenes de diferentes precios y calidades.

Adicionalmente se utilizó programación visual para la creación de un algoritmo con la capacidad de extraer de las nubes de puntos las variables necesarias para el cálculo de las ganancias energéticas. Finalmente se reprodujo en programación visual el cálculo de las ganancias energéticas estipulado por la NOM-008-ENER-2001, con la finalidad de contemplar todo el proceso en un mismo ecosistema.

Se evaluó la metodología a través del análisis de 4 variables principales:

- La precisión de las nubes de puntos obtenidas por los dispositivos propuestos
- La exactitud de las superficies opacas y transparentes obtenidas por el algoritmo propuesto en programación visual
- El impacto de la metodología en la exactitud del cálculo de las ganancias energéticas estipuladas por la norma
- El análisis de los tiempos de trabajo requeridos para la implementación de la metodología propuesta

La validación de la información se hizo comparando los datos con aquellos obtenidos por una metodología de medición convencional aplicadas en 3 casos de estudio.

Para comenzar, se observó que las nubes de puntos generadas utilizando fotografías de una cámara profesional y una cámara integrada a un celular tuvieron un rango de exactitud promedio de 1.5 cm, de igual manera se comprobó un mejoramiento mínimo en la exactitud de las nubes generadas por la cámara profesional en comparación a la cámara del celular.

Respecto a las variables obtenidas a partir del algoritmo de programación visual, se encontró que el error relativo promedio de las superficies obtenidas fue

de 2.52% en el caso de las nubes generadas con el dispositivo móvil y de 2.42% en el caso de las nubes generadas con la cámara profesional, corroborando la superioridad de la precisión de esta última, aunque por un rango de error mínimo. Analizando por separado las superficies opacas y transparentes, el error relativo de la exactitud de las áreas contempla un valor máximo de hasta un 5%.

En cuanto al impacto de estos datos en los cálculos de las ganancias energéticas estipulados por la NOM-008-ENER-2001, se observó que el error relativo promedio de las nubes de puntos generadas con el dispositivo móvil fue de 2.0%; en el caso de las nubes de puntos generadas con la cámara profesional se observó un error relativo promedio de 1.9%, mejorando la exactitud del cálculo respecto a las nubes de generadas por el celular por un rango de 0.1%.

Respecto a los tiempos de trabajo se notó una mejora considerable en 2 de los casos de estudio utilizando la metodología propuesta, ahorrando un 13% de tiempo respecto al proceso de la metodología convencional en la fachada de 2 niveles y hasta un 50% en la fachada de 4 niveles. No se encontraron diferencias de tiempo considerables en el caso de estudio de 1 nivel.

A partir de los datos analizados, son evidentes las potenciales aportaciones positivas que la implementación de esta tecnología y metodología puede ofrecer a los procesos de inspección de la norma de eficiencia energética mexicana. Si bien existe un grado de error provocado por la generación de las nubes y su respectivo procesamiento, se observó que éste se encontraba en un rango de 5% en el caso más crítico, lo cual es un indicativo de la posible viabilidad del método propuesto en la realidad.

Los resultados mencionados se alinean con uno de los objetivos secundarios del presente documento de investigación, el cual busca determinar los rangos de exactitud de la metodología propuesta. Estos valores son indispensables para su implementación certera en la de obtención de las áreas opacas y transparentes de las fachadas, así como para el cálculo de las ganancias energéticas de las envolventes.

Este análisis adicionalmente permite comprender el potencial (ampliamente documentado y mencionado por diferentes investigaciones del estado del arte) de los dispositivos móviles para la captura de las fotografías base utilizadas en el procesamiento de las nubes de puntos de las envolventes de los edificios. Esta característica es relevante debido a las implicaciones que tiene en los costos del proceso propuesto, al demostrar lo prescindibles que son los dispositivos de

fotografía profesional para la generación de nubes de puntos con un rango de precisión equivalente a 1.5 cm.

La investigación también aporta al estado del arte un posible método de segmentación de la información de las nubes de puntos pertenecientes a las fachadas de las envolventes de los edificios. Si bien el algoritmo propuesto destaca por su simplicidad en comparación a aquellos analizados en el marco teórico de la investigación, su implementación en un programa orientado a la arquitectura con capacidades de programación visual, lo hace viable para su operación por parte de actores pertenecientes a la industria de la construcción cuyos conocimientos naturalmente no se encuentran tan profundizados en las áreas de visualización por computadora y programación computacional.

De igual manera se utiliza la programación visual para proponer una herramienta de cálculo de las ganancias energéticas de las envolventes de acuerdo a lo estipulado por la NOM-008-ENER-2001. Esta herramienta no solo corrige inconsistencias de la herramienta actual propuesta por la CONUEE, si no que aporta instrumentos para la toma de decisiones y el mejoramiento de envolventes que no cumplen con los requerimientos necesarios para aprobar la norma o cuya eficiencia logra bajos índices de ahorro energético.

Por otra parte, es necesario destacar las limitaciones propias de la presente investigación. Dado que la comparación y generación de nubes de puntos se realizó utilizando un número reducido de cámaras fotográficas, aún no se tiene una perspectiva completa de las capacidades de los dispositivos móviles en comparación con los de fotografía profesional. Para obtener una perspectiva real en la amplia oferta del mercado actual se requiere la comparación de la exactitud de las nubes de puntos entre dispositivos de diferentes gamas y características. Otro factor crucial es el constante avance tecnológico, lo cual obligaría a realizar dicha comparación de forma constante y periódica.

Una situación similar ocurre con los casos de estudio, puesto que se utilizaron fotografías a nivel de suelo para la generación de las nubes de puntos, se necesitarían diferentes casos de estudio de diferentes alturas para determinar la altura máxima a la cual se podría utilizar dicha estrategia, contemplando siempre los límites mínimos de precisión requeridos por el estudio. Dicha variabilidad en los casos de estudio permitiría observar de manera más amplia la efectividad del algoritmo de la extracción de la información.

Respecto al algoritmo para la extracción de la información, la investigación se limitó a la obtención más básica de las áreas de las superficies de las fachadas por

lo que diversas oportunidades de mejora quedaron sin abordar. La principal, respecto a la precisión de las superficies obtenidas; en el análisis se vislumbró que los errores relativos de las áreas opacas y transparentes tenían diferencias de hasta 4%, esto impactaba de manera proporcional en los resultados de las ganancias energéticas de los edificios de referencia y proyectado, generando en estas últimas diferencias de errores relativos de hasta 1.78%.

Por otra parte, la generación de una interfaz comercial, la inclusión de la detección de volados, el cálculo de factores de sombreado, la adicción de criterios de selección y segmentación de superficies son algunas de las posibles mejoras que podrían abordarse de manera más profunda en futuras investigaciones sobre el tema.

Respecto a la herramienta en programación visual para el cálculo de las ganancias energéticas estipuladas por la NOM-008-ENER, sería posible su mejoramiento a través de la ampliación de la base de datos con materiales constructivos actuales, la generación de una interfaz comercial, la generación de gráficos automatizados e incluso la generación automática de reportes parecidos a los creados por la herramienta de cálculo de la CONUEE.

Finalmente, la implementación de equipos aéreos para el levantamiento y análisis de las envolventes de las edificaciones a nivel urbano es una de las posibles áreas de estudio complementarias con la capacidad de masificar y escalar la implementación de la norma en tiempos reducidos de trabajo.

Reflexiones finales

Este trabajo tiene como trasfondo la problemática actual que vive la norma mexicana en materia de eficiencia energética de las edificaciones. Su baja aplicabilidad en comparación a las normas de eficiencia energética en productos, denota un atraso respecto a las estrategias energéticas que implementa nuestro país en materia de procesos y calidad constructiva. Si bien la norma mexicana se conforma de un modelo de análisis sencillo, ha demostrado ser útil para la mejora de la eficiencia energética de los edificios comerciales, lo cual la hace, aún hoy en día viable para su difusión e implementación a lo largo del territorio mexicano.

Lejos de buscar la creación de un único método para el análisis e inspección estipulados en la NOM-008-ENER-2001 y la Ley de la Infraestructrua de la Calidad, se buscó en el presente trabajo de investigación la generación de herramientas que faciliten y apoyen la implementación de las normas existentes. La generación de metodologías alternas que aprovechen las innovaciones tecnologías tiene el

potencial de servir como escalón para la actualización y evolución de las normas, así como la de sus respectivos procedimientos.

En la era actual, donde la evolución tecnológica es un fenómeno imparable, la adaptación de nuestra infraestructura y sistemas es un aspecto crucial para mantener vigentes nuestras capacidades de innovación y competitividad. Esto es fundamental para asegurar que los objetivos del país en materia de eficiencia energética no solo crezcan, sino que también evolucionen hacia un futuro más objetivo y sustentable.

7.0 REFERENCIAS

Aerial, V. (2022, junio 7). Lidar vs. Photogrammetry: Which is Best for Your Project? Vision Aerial. https://visionaerial.com/lidar-vs-photogrammetry-which-is-best-for-your-project/

Agisoft LLC. (2023). Agisfot Metashape User Manual> Professional Edition, Version 2.0.

Baltsavias, E. P. (1999). A comparison between photogrammetry and laser scanning. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54(2), 83-94. https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00014-3

Barber, D., & Mills, J. (2011). 3D Láser scanning for Heritage (second edition). Advice and guidance to users on laser scanning in archaeology and architecture. (2.ª ed.). English Heritage.

Bedford, J., & England, H. (2017). Photogrammetric Applications for Cultural Heritage: Guidance for Good Practice. Historic England. https://books.google.com.mx/books?id=tdrMtQEACAAJ

Belton, D., & Lichti, D. (2006). Classification and segmentation of terrestrial laser scanner point clouds using local variance information. IAPRS, 36, 44-49.

Biham, S. (2022, agosto 5). Point Cloud Registration—Classic Approaches. Medium. https://towardsdatascience.com/point-cloud-registration-classic-approaches-d6191302b0b2

Bohórquez, O., Derigent, W., & El Haouzi, H. (2021). Parametric point-cloud slicing for facade retrofitting. International Journal of Architectural Computing.

Boulaassal, H., Landes, T., & Grussenmeyer, P. (2009). Automatic Extraction of Planar Clusters and Their Contours on Building Façades Recorded by Terrestrial Laser Scanner. International Journal of Architectural Computing vol. 7 - no. 1, 1-20, 7. https://doi.org/10.1260/147807709788549411

Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. (2017). Herramienta Cálculo NOM-008. Gobierno de México. https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/herramienta-calculo-nom_008?state=published

CONUEE, & SENER. (2017). Guía Rápida de cálculo de la NOM-008-ENER-2001.

CONUEE, & SENER. (2020). Normas oficiales mexicanas de eficiencia energética: Balance al 2020.

CONUEE, & SENER. (2021). Normas oficiales mexicanas de eficiencia energética: Balance al 2021.

CONUEE, & SENER. (2022). Normas oficiales mexicanas de eficiencia energética: Balance al 2022.

Costantino, D., Grimaldi, A., & Pepe, M. (2022). 3D Modelling of buildings and urban areas using Grasshopper and Rhinoceros. Geographia Technica, 17, 168-177. https://doi.org/10.21163/GT_2022.171.13

Definición de Vóxel | Diccionario SIG. (s. f.). Recuperado 27 de junio de 2024, de https://support.esri.com/es-es/gis-dictionary/voxel

Definition of Workflow. (2024, marzo 13). https://www.merriam-webster.com/dictionary/workflow

[engelbeck]. (2017). Recommended Gradual Filter Settings. Recommended Gradual Filter Settings. [Publicación en un foro online]. Mensaje publicado en: https://www.agisoft.com/forum/index.php?topic=6888.0

Eyoh, A., Ubom, O., & Ekpa, A. (2019). Comparative analysis of UAV photogrammetry and total station traversing on route survey. 7(4).

Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica. (2001). Nuevo presidente del comité técnico del FIDE. Notifide Metropolitano, 106, 1-3.

Filin, S., & Pfeifer, N. (2006). Segmentation of airborne laser scanning data using a slope adaptive neighborhood. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 60 (2). ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 60, 71-80. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2005.10.005

Firzal, Y. (2021). Architectural Photogrammetry: A Low-Cost Image Acquisition Method in Documenting Built Environment. International Journal of GEOMATE, 20, 100-105. https://doi.org/10.21660/2021.81.6263

Gao, R., Li, M., Yang, S.-J., & Cho, K. (2022). Reflective Noise Filtering of Large-Scale Point Cloud Using Transformer. Remote Sensing, 14(3). https://doi.org/10.3390/rs14030577

Gao, Y., Chen, W., Yu, C., Yao, Y., & Xiao, T. (2017). Automatic extraction of building elevation contours based on LIDAR data. 2017 4th International Conference on Systems and Informatics, ICSAI 2017, 2018-January, 1352-1357. https://doi.org/10.1109/ICSAI.2017.8248496

Garwood, T., Hughes, B., O'Connor, D., Calautit, J. K., Oates, M., & Hodgson, T. (2018). A framework for producing gbXML building geometry from Point Clouds for accurate and efficient Building Energy Modelling. Applied Energy, 224. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.046

Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2018). Digital image processing (Fourth edition). Pearson.

Hasegawa, H., Matsuo, K., Koarai, M., Watanabe, N., Masaharu, H., & Fukushima, Y. (2000). DEM accuracy and the base to height (B/H) ratio of stereo images. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 33.

Huang, J., Warner, J. L., Wiel, S., Rivas, A., & De Buen, O. (1998). A commercial building energy standard for Mexico. Laurence Berkeley National Laboratory.

INEGI. (2024). Indicadores de empresas constructoras. Noviembre de 2023 (Económico 24; p. 12). Instituto Nacional de Geografía y Estadística.

ISPRS - Historical Background. (s. f.). Recuperado 31 de octubre de 2023, de https://www.isprs.org/society/history.aspx

Jeong, J., & Kim, T. (2016). Semi-automatic building models and façade texture mapping from mobile phone images. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLI-B3, 613-616. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B3-613-2016

Jochem, A., Höfle, B., & Rutzinger, M. (2011). Extraction of vertical walls from mobile laser scanning data for solar potential assessment. Remote Sensing, 3(4), 650-667. https://doi.org/10.3390/rs3030650

Klimkowska, A., Cavazzi, S., Leach, R., & Grebby, S. (2022). Detailed Three-Dimensional Building Façade Reconstruction: A Review on Applications, Data and Technologies. Remote Sensing, 14(11). https://doi.org/10.3390/rs14112579

Kuhail, M. A., Farooq, S., Hammad, R., & Bahja, M. (2021). Characterizing Visual Programming Approaches for End-User Developers: A Systematic Review. IEEE Access, 9, 14181-14202. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3051043

Ley de la Infraestructura de la Calidad, 63 (2020).

López Moreno, P. (2016). Irregularidades en los procesos y autorizaciones de las manifestaciones de construcción. Impunidad Cero.

Mañana Borrazás, P., & Parcero Oubiña, C. (2024). Tecnologías digitales de documentación geométrica y representación del patrimonio.[Curso online] [Centro de supercomputación de Galicia]. https://aula.cesga.es/courses/TDDG/index.php?id_session=0

Martin-Dominguez, I., & Alarcón-Herrera, M. (2004, octubre). Evolución de las metodologías para el cálculo de cargas térmicas en edificaciones, desarrolladas por la ASHRAE.

Martínez, J., Soria-Medina, A., Arias, P., & Buffara-Antunes, A. F. (2012). Automatic processing of Terrestrial Laser Scanning data of building façades. Automation in Construction, 22, 298-305. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.09.005

Morales Martínez, N. E. (2013, septiembre). Acciones de Conuee en edificaciones: NOM-008-ENER-2001 y NOM-020-ENER-2001. XXI Congreso Internacional Ambiental-THE GREEN EXPO.

Mostafa, E. (2014). 3D laser scanners: History, applications, and future. https://doi.org/10.13140/2.1.3331.3284

Nguyen, H., Wünsche, B., Delmas, P., & Lutteroth, C. (2015). 3D Models from the Black Box: Investigating the Current State of Image-Based Modeling.

Norma oficial mexicana NOM-008-ENER-2001. Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales., Pub. L. No. NOM-008-ENER-2001 (2001).

O Donnell, J., Truong-Hong, L., Boyle, N., Corry, E., Cao, J., & Laefer, D. (2019). LiDAR point-cloud mapping of building façades for building energy performance simulation. Automation in Construction, 107, 102905. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102905

Otero, R., Frías, E., Lagüela, S., & Arias, P. (2020). Automatic gbXML Modeling from LiDAR Data for Energy Studies. Remote Sensing, 12, 2679. https://doi.org/10.3390/rs12172679

Peteinarelis, A. (2018). Custom point cloud edit and analysis tools in visual programming: Evaluation of heritage facades. 2018 3rd Digital Heritage International Congress (DigitalHERITAGE) held jointly with 2018 24th International Conference on Virtual Systems & Multimedia (VSMM 2018), 1-7. https://doi.org/10.1109/DigitalHeritage.2018.8810052

Pflipsen, B. (2007). Volume computation: A comparison of total station versus laser scanner and different software.

Photo Modeler Technologies. (2015). UAS / UAV Photography for 3D Scanning, Measurement and Modeling – PhotoModeler. Photo Modeler Technologies. https://www-photomodeler-com.translate.goog/uas-uav-photography-for-3d-scanning-measurement-and-modeling/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es-419&_x_tr_pto=sc

Photogrammetry vs. LIDAR: what sensor to choose for a given application. (2023, enero 27). Wingtra. https://wingtra.com/drone-photogrammetry-vs-lidar/

Pix4D. (s. f.). Reprojection error. Recuperado 30 de mayo de 2024, de https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559369

Poux, F. (2019). The Smart Point Cloud: Structuring 3D intelligent point data [PhD Thesis, Twente]. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20457.75367

Previtali, M., Barazzetti, L., Brumana, R., Cuca, B., Oreni, D., Roncoroni, F., & Scaioni, M. (2014). Automatic façade modelling using point cloud data for energy-efficient retrofitting. Applied Geomatics, 6(2), 95-113. https://doi.org/10.1007/s12518-014-0129-9

Pu, S., & Vosselman, G. (2006). Automatic extraction of building features from terrestrial laser scanning. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36.

Pu, S., & Vosselman, G. (2009). Knowledge based reconstruction of building models from terrestrial laser scanning data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64(6), 575-584. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.04.001

¿Qué son los datos LIDAR?—ArcMap | Documentación. (s. f.). Recuperado 31 de octubre de 2023, de https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/las-dataset/what-is-lidar-data-.htm

Rakotosaona, M.-J., Barbera, V. L., Guerrero, P., Mitra, N. J., & Ovsjanikov, M. (2019). PointCleanNet: Learning to Denoise and Remove Outliers from Dense Point Clouds. CoRR, abs/1901.01060. http://arxiv.org/abs/1901.01060

Santiago Cruz, I. (2004). Normalización Energética en las Edificaciones. Análisis de la Nom-008-Ener «Eficiencia energética en Edificaciones, Envolvente de Edificios No Residenciales». Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado de Arquitectura.

Segarra, F. J. (2023, mayo 22). Lidar vs. Photogrammetry: Understanding Pricing and Technical Variances of Drone Inspection Services. ConnexiCore. https://connexicore.com/lidar-vs-photogrammetry-price-and-variances/

Settimi, A., Vestartas, P., Gamerro, J., & Weinand, Y. (2022, abril). Cockroach: An Open-source Tool for Point Cloud Processing in CAD. https://doi.org/10.52842/conf.caadria.2022.2.325

Siewczynska, M., & Zioło, T. (2022). Analysis of the Applicability of Photogrammetry in Building Façade. Civil and Environmental Engineering Reports, 32, 182-206. https://doi.org/10.2478/ceer-2022-0035

Skarlatos, D., & Kiparissi, S. (2012). Comparison of laser scanning, photogrammetry and SFM-MVS pipeline applied in structures and artificial surfaces. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, I-3, 299-304. https://doi.org/10.5194/isprsannals-I-3-299-2012

Souto-Vidal, M., Ortiz, J., & Gil, M. (2015). Implementación del levantamiento eficiente de fachadas mediante fotogrametría digital automatizada y el uso de software gratuito. Informes de la Construcción, 67, e107. https://doi.org/10.3989/ic.14.098

Sweeney et al., C. (2015). Computing Similarity Transformations from Only Image Correspondences. http://theia-sfm.org/sfm.html

Tapia Guillen, F., Carbajal Avila, J., & Meza, C. (2023). Aplicación de una metodología de eficiencia energética de un edificio escolar de nivel superior:

Caso de estudio centro de información del TecNM / IT de Acapulco. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 7, 5129-5149. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.4820

Visual programming. Advantages, shortcomings and the scope of the use. (s. f.). Embrox Solutions | Software and Hardware Development Company. Recuperado 6 de junio de 2024, de https://embrox.com/blog/visual-programming

Vosselman, G., Gorte, B., Sithole, G., & B, T. (2003). Recognising structure in laser scanner point clouds. Inter. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., 46.

Wahbeh, W. (2021). Parametric modelling approach to reconstructing architectural indoor spaces from point clouds. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLIII-B4-2021, 251-257. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B4-2021-251-2021

Walker, M. (2023, noviembre 16). Optimising Overlap in Drone Mapping: A Comprehensive Guide for Operators and Surveyors - Aircam Drone Services. https://aircamdrone.co.uk/optimising-overlap-in-drone-mapping-a-comprehensive-guide-for-operators-and-surveyors/

Wang, C., & Cho, Y. (2012). Automated 3D Building Envelope Recognition from Point Clouds for Energy Analysis. 1155-1164. https://doi.org/10.1061/9780784412329.116

Wang, Q., & Kim, M. (2019). Applications of 3D point cloud data in the construction industry: A fifteen-year review from 2004 to 2018. Advanced Engineering Informatics, 39, 306-319. https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.02.007

Wang, Q., Tan, Y., & Mei, Z. (2020). Computational Methods of Acquisition and Processing of 3D Point Cloud Data for Construction Applications. Archives of Computational Methods in Engineering, 27(2), 479-499. https://doi.org/10.1007/s11831-019-09320-4

Wang, X., Wu, C., & Que, R. (2021). Regularized rebuild workflow of hbim for built heritage documentation. En Y. H. Dang A. Li A. ,. Hou M. ,. He Y. (Ed.), ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (Vol. 8, Número M-1-2021, pp. 193-200). Copernicus GmbH. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-VIII-M-1-2021-193-2021

Wu, C., Yuan, Y., Tang, Y., & Tian, B. (2021). Application of Terrestrial Laser Scanning (TLS) in the Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry. Sensors, 22, 265. https://doi.org/10.3390/s22010265

Xu, Y., & Stilla, U. (2019). Contour extraction of planar elements of building facades from point clouds using global graph-based clustering. En X. Y. Stilla U. Hoegner L. (Ed.), ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote

Sensing and Spatial Information Sciences (Vol. 4, Número 2/W7, pp. 211-219). Copernicus GmbH. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W7-211-2019

Zhang, R., Wu, J., Li, G., & Wang, L. (2018). A mixed algorithm for building facade extraction from point clouds. International Journal of Performability Engineering, 14(6), 1119-1129. https://doi.org/10.23940/ijpe.18.06.p3.11191129

Zhang, S., Shan, J., Zhang, Z., Yan, J., & Hou, Y. (2016). Integrating smartphone images and airborne lidar data for complete urban building modelling. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLI-B5, 741-747. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B5-741-2016

Zhao, R., Pang, M., & Zhang, Y. (2018). Robust shape extraction for automatically segmenting raw LiDAR data of outdoor scenes. International Journal of Remote Sensing, 39(23), 9181-9205. https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1508914

Zolanvari, S. M. I., Laefer, D. F., & Natanzi, A. S. (2018). Three-dimensional building façade segmentation and opening area detection from point clouds. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 143, 134-149. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.04.004

Zwierzycki, M., Evers, H., & Tamke, M. (2016, agosto). Parametric Architectural Design with Point-clouds—Volvox. https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2016.2.673

Bibliografía consultada

Alkadri, M. F., Luca, F. D., Turrin, M., & Sariyildiz, S. (2020). An integrated approach to subtractive solar envelopes based on attribute information from point cloud data. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 123, 109742. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109742

Boulaassal, H., Landes, T., Grussenmeyer, P., & Tarsha-Kurdi, F. (2012). Automatic segmentation of building facades using Terrestrial Laser Data. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36.

Cai, Y., Fan, L., & Zhang, C. (2021). An overview of constructing geometric models of buildings using point clouds. 26. https://doi.org/10.1117/12.2611685

Charles, R. Q., Su, H., Kaichun, M., & Guibas, L. J. (2017). PointNet: Deep Learning on Point Sets for 3D Classification and Segmentation. 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 77-85. https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.16

Edl, M., Mizerák, M., & Trojan, J. (2018). 3D laser scanners: History and applications. Acta Simulatio, 4, 1-5. https://doi.org/10.22306/asim.v4i4.54

Filin, S. (2012). Surface clustering from airborne laser scanning data. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34.

Hammoudi, K., Dornaika, F., Soheilian, B., & Paparoditis, N. (2010). Extracting outlined planar clusters of street facades from 3D point clouds. CRV 2010 - 7th Canadian Conference on Computer and Robot Vision, 122-129. https://doi.org/10.1109/CRV.2010.23

Hernández, J. (2004). Evaluación de la conformidad de un edificio existente de uso no residencial con la norma oficial mexicana NOM-008-ENER-2001, en materia de eficiencia energética en lo que se refiere a su envolvente. Universidad Nacional Autónoma de México.

Huber, D., Akinci, B., Tang, P., Adan, A., Okorn, B., & Xiong, X. (2010). Using laser scanners for modeling and analysis in architecture, engineering, and construction. Proc. CORD Conf., 1-6. https://doi.org/10.1109/CISS.2010.5464818

Li, Y., Hu, Q., Wu, M., Liu, J., & Wu, X. (2016). Extraction and Simplification of Building Façade Pieces from Mobile Laser Scanner Point Clouds for 3D Street View Services. ISPRS International Journal of Geo-Information, 5(12). https://doi.org/10.3390/ijgi5120231

Martin, I., Trejo, M. N., & Muñoz, N. A. R. (2017). Implicaciones en las consideraciones metodológicas de la NOM-020-ENER. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:188800005

Massafra, A., Prati, D., Predari, G., & Gulli, R. (2020). Wooden Truss Analysis, Preservation Strategies, and Digital Documentation through Parametric 3D Modeling and HBIM Workflow. Sustainability, 12(12). https://doi.org/10.3390/su12124975

Tóvári, D., & Pfeifer, N. (2012). Segmentation based robust interpolation- A new Approach to laser data filtering. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36.

Visual Programming—What is it And Why Should Architects Care? (s. f.). Recuperado 5 de octubre de 2024, de https://www.novatr.com/blog/visual-programming-in-architecture

Wang, Y., Ma, Y., Zhu, A. -xing, Zhao, H., & Liao, L. (2018). Accurate facade feature extraction method for buildings from three-dimensional point cloud data considering structural information. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 139, 146-153. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.11.015

Zhou, M., Ma, L., Li, Y., & Li, J. (2018). Extraction of building windows from mobile laser scanning point clouds. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2018-July, 4304-4307. https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8518899

8.0 ANEXO A

En la siguiente sección se pretende reportar las observaciones encontradas en la herramienta de la NOM-008-ENER-2001 publicada en la página del gobierno de México y CONUEE el día 10 de agosto del 2017.

https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/herramienta-calculo-nom_008

La observación se encuentra en el cálculo de las ganancias de calor del edificio de referencia, específicamente en la sección 4.2.2 Ganancias por radicación (partes transparentes). De acuerdo con la norma para obtener las ganancias de calor por radiación de las componentes transparentes de la fachada del edificio proyectado, se debe utilizar la siguiente ecuación:

$$\phi_{rsi} = \sum_{i=1}^{5} \left[A_{ri} \; x \, CS_{ri} \; x \, FG_i \right]$$

En donde:

A_{ri} = Área de la parte transparente de la envolvente del edificio de Referencia, con orientación *i,* en m2

CS_{ri} = Coeficiente del sombreado del vidrio empleado en el edificio de referencia, con orientación i, con valor adimensional de 0.85 para l techo y 1.0 para las paredes.

FG = calor solar por orientación, determinada en la tabla 1 del Apéndice A en W/m2.

El área de la parte transparente de la fachada con orientación *i* se debe calcular de acuerdo a los porcentajes de área total estipulados en la tabla de características del edificio de referencia. La cual indica que del 100% del área del muro, un 40%corresponde a la fachada o parte transparente. En otras palabras, se debe multiplicar el área del muro total por un factor 0.40 para obtener el área transparente del edificio de referencia.

Esto se ve reflejado en la sección 4.2.2 del informe del cálculo de ganancias de la herramienta de la CONUEE, al multiplicar los valores del área total de los muros por el factor de 0.40. Sin embargo, en la orientación Este en lugar de utilizar el valor del área total introducida en el cálculo, la herramienta sustituye el área real del muro por el valor de 23 m^2.

4. Cálculo Comparativo de la Ganancia de Calor

4.1.- Datos Generales
Temperatura Interior: 25 °C

4.2.- Edificio de referencia

$$\phi_{rci} = \sum_{j=1}^{n} [K_j \times A_{ij} \times (te - t)]$$

4.2.1.- Ganancias por conducción (partes opacas y transparentes)

Tipo y orientacion de la porcion de la envolvente	Coeficiente Global de Tranferencia de Calor (W/m^2K) [K]	Area del edificio proyectado (m^2) [A]	Fracción de la componente [F]	Temperatura equivalente (K) (te)	Ganancia por Conducción Φrci (*) [K*A*F*(te-t)]
Techo	0.3480	100.0	0.95	50	826.500
Tragaluz y domo	5.9520		0.05	29	119.040
Muro Norte	0.3920	100.0	0.60	35	235.200
Ventana Norte	5.3190		0.40	30	1063.800
Muro este	0.3920	100.0	0.60	40	352.800
Ventana este	5.3190		0.40	32	1489.320
Muro sur	0.3920	100.0	0.60	37	282.240
Ventana Sur	5.3190		0.40	32	1489.320
Muro oeste	0.3920	100.0	0.60	38	305.760
Ventana oeste	5.3190		0.40	32	1489.320
Superficie inferior	0.3480	0.0	0.95	34	-
				SUBTOTAL	7653.300

* Nota: Si los valores son negativos significa una bonificación, por lo que deben sumarse algebraicamente

4.2.2. Ganancias por radiación (partes transparentes)

$$\phi_{rsi} = \sum_{j=1}^{m} [A_{ij} \times CS_j \times FG_i \times SE_{ij}]$$

Tipo y orientacion de la porcion de la envolvente	Coeficiente de Sombreado (CS)	Area del edificio proyectado (m2) [A]	Fracción de la componente [F]	Ganancia de Calor (W/m2) [FG]	Ganancia por Radiación ϕ rs (*) [CS*A*F*FG]
Tragaluz y domo	0.8500	100.0	0.05	322	1368.500
Ventana norte	1.0000	100.0	0.4	70	2800.000
Ventana este	1.0000	23.0	0.4	159	1462.800
Ventana sur	1.0000	100.0	0.4	131	5240.000
Ventana oeste	1.0000	100.0	0.4	164	6560.000

Esta discrepancia, altera los valores de ganancia de calor por radiación del edificio proyectado y por ende las ganancias totales de calor del mismo. De igual modo influye en el porcentaje de ahorro energético calculado y en última instancia en los resultados de la evaluación de la NOM-008-ENER-2001.

Se ha comprobado a través de diferentes ejemplos, que el valor sustituido de 23 m^2 es constante. Si bien no tiene tanto impacto en envolventes de áreas cercanas a este valor, la diferencia se agranda mientras se tengan fachadas más alejadas a este valor.

En la imagen se muestra un ejemplo de un edificio cuyas fachadas miden 100 m^2 de área. El cálculo hecho por la herramienta de la CONUEE de las ganancias por radiación de la fachada Este arroja un valor de 1462 W en comparación al valor corregido de 6360 W. Lo cual implica una diferencia de 4898 W.