



Desarrollo de un sistema de medición del desempeño en procesos de diseño, basado en BIM, aplicado a proyectos de vivienda de interés social

Arq. Diego Ernesto Carranza Avilán

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Artes, Maestría en Construcción
Bogotá, Colombia
2024

Desarrollo de un sistema de medición del desempeño en procesos de diseño, basado en BIM, aplicado a proyectos de vivienda de interés social

Arq. Diego Ernesto Carranza Avilán

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Construcción

Director (a):

MBA. Arquitecto Felipe Novoa Gonzalez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Artes, Maestría en Construcción
Bogotá, Colombia
2024

«En cada momento mantén la atención en la tarea que tienes entre manos. Realiza cada tarea como si fuera la última, evitando la distracción, el drama, la vanidad y la queja por tu situación.»

Marco Aurelio.

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Diego Ernesto Carranza Avilán

Fecha 22/01/2024

Agradecimientos

El desarrollo de este trabajo ha sido una de las tareas más arduas que he tenido la fortuna de emprender, y no lo hubiese finalizado sin el apoyo de muchas personas, a las cuales les tengo un cariño y agradecimiento inmenso por todo lo que hicieron por mí.

Primero, quisiera agradecerle a la Universidad Nacional de Colombia, de la cual me siento muy orgulloso de ser egresado y poder continuar escribiendo mi historia de vida entre los muros de esta maravillosa institución, sin lugar a duda el haber sido admitido acá ha sido el suceso más importante que he tenido el privilegio de vivir. De igual manera, a la Maestría en Construcción y a los coordinadores Martha Luz Salcedo, Francisco Lopez y Luis Alfonso Pérez, por su apoyo incondicional, tanto en el pregrado de arquitectura como en este programa, gracias a ustedes pude emprender este camino. Al profesor Felipe Novoa, por sus consejos y su dirección siempre pertinente en la elaboración de esta tesis, así como su amabilidad y disponibilidad para atender mis inquietudes, muchas gracias.

Quiero agradecerle a mi familia, a mis padres que siempre han estado apoyándome en todas mis decisiones y brindándome su cariño, comprensión y regaños cuando son necesarios. A mis hermanos que siempre han estado para mí, escuchándome y aconsejándome. Ellos siempre han creído y seguirán creyendo en mí, los quiero y les agradezco toda la paciencia.

A mis amigos, quienes tuvieron que lidiar con los momentos buenos y no tan buenos de este periodo de mi vida; quisiera agradecerle principalmente a Germán Peñaloza, quien fue una gran compañía en el desarrollo y la recta final de esta tesis y estuvo hasta el último día conmigo, apoyándome en todo, aconsejándome y regañándome cuando fue necesario, sin su presencia seguramente no hubiese podido finalizar esta tesis, infinitas gracias. También a Adriana Rico, quien me ha servido de soporte y compañía, teniéndome una gran paciencia y muy acertados consejos, quien no ha dudado un segundo en decirme la verdad como es y eso lo aprecio

profundamente. Igualmente, a Cesar Riaño, Melissa Sánchez y Vanessa Farieta, quienes me apoyaron y me tuvieron muchísima paciencia para atender todas mis dudas e inquietudes, yo y esta tesis les debemos demasiado, les agradezco mucho. De igual manera, al resto de amigos y familiares que tuvieron que escucharme una y otra vez la frase “*tengo que hacer tesis*”, a todos ustedes, mil gracias por la paciencia.

A TDC LAB y a mis jefes, Javier Cardenas y Luis Carlos Morales, por la flexibilidad y la ayuda incondicional que tuvieron en todo este tiempo, por la comprensión y los consejos, tanto profesionales como de vida, les estoy profundamente agradecido. Igualmente, al resto del equipo de TDC LAB, quienes siempre supieron orientarme cuando tenía alguna duda, muchas gracias.

Finalmente, quiero agradecer al universo y a la vida que me permitió compartir un espacio y un tiempo con todas estas maravillosas personas, realmente he sido muy afortunado, a todos ustedes, infinitas gracias.

Resumen

Desarrollo de un sistema de medición del desempeño en procesos de diseño, basado en BIM, aplicado a proyectos de vivienda de interés social.

Este estudio aborda la carencia de un sistema de medición claro para evaluar el desempeño en proyectos de vivienda de interés social VIS durante las etapas de diseño. A través de una investigación exhaustiva, se identificaron criterios e indicadores cruciales para evaluar el éxito en proyectos de construcción, destacando la falta de prácticas de medición específicas durante la fase de diseño. La revisión de literatura y entrevistas con expertos revelaron criterios esenciales como Costo, Tiempo, Calidad, Salud y seguridad, Ambiental, Satisfacción del cliente, entre otros. Además, se exploró el uso de metodologías BIM en proyectos de vivienda, analizando la información generada y validándola mediante encuestas a BIM Managers. Esto proporcionó la base conceptual para la integración de datos BIM en la medición del desempeño. Así, se propuso una estrategia eficaz para utilizar datos BIM y tecnologías BI, desarrollando un sistema estructurado con seis criterios de éxito y 17 indicadores de desempeño, automatizando la obtención de datos para mejorar la eficiencia y minimizar recursos. La implementación de una plataforma digital, utilizando herramientas como Autodesk Revit®, Autodesk Navisworks Manage®, Autodesk Construction Cloud®, y Microsoft Power BI, facilita la gestión de información y la visualización de datos. La integración de estas soluciones da lugar a tableros de control estructurados los cuales presentan la información de manera lógica y eficiente, mejorando la toma de decisiones durante la etapa de diseño en proyectos de vivienda VIS.

Palabras clave: Medición del desempeño, VIS, Building Information Modeling, BIM, Inteligencia empresarial, analítica de datos, indicadores.

Abstract

Development of a performance measurement system in design processes, based on BIM, applied to social housing projects.

This study addresses the lack of a clear measurement system to evaluate performance in social housing projects (VIS) during the design stages. Through comprehensive research, crucial criteria, and indicators for assessing success in construction projects were identified, emphasizing the absence of specific measurement practices during the design phase. Literature review and interviews with experts revealed essential criteria such as Cost, Time, Quality, Health and Safety, Environmental factors, Customer Satisfaction, among others. Additionally, the study explored the use of Building Information Modeling (BIM) methodologies in housing projects, analyzing generated information, and validating it through surveys with BIM Managers. This laid the conceptual foundation for integrating BIM data into performance measurement. Consequently, an effective strategy was proposed for utilizing BIM data and Business Intelligence (BI) technologies, developing a structured system with six success criteria and 17 performance indicators, automating data acquisition to enhance efficiency and minimize resources. The implementation of a digital platform, employing tools such as Autodesk Revit®, Autodesk Navisworks Manage®, Autodesk Construction Cloud®, and Microsoft Power BI, facilitates information management and data visualization. The integration of these solutions results in structured dashboards that logically and efficiently present information, improving decision-making during the design phase in VIS housing projects.

Keywords: Performance Measurement, Building Information Modeling, BIM, Business intelligence, Data analysis, KPI.

Contenido

	Pág.
Agradecimientos	VIII
Resumen	XI
Abstract	XII
Contenido	XIII
Lista de figuras	XV
Lista de tablas	XVI
Introducción	1
1. Planteamiento del problema	3
1.1 Contexto nacional.....	3
1.2 Medición del desempeño.....	4
1.3 Problema de investigación	6
1.4 Justificación.....	6
1.5 Preguntas de investigación	8
1.6 Objetivos de investigación	9
1.6.1 Objetivo general	9
1.6.2 Objetivos específicos	9
2. Marco Teórico	11
2.1 Project Management – Gestión de Proyectos.....	13
2.1.1 Enfoques de gestión de proyectos	13
2.1.2 Gestión de proyectos aplicado a la vivienda de interés social en Colombia	19
2.1.3 Éxito del proyecto y criterios de éxito (Project Success).....	20
2.2 Medición del desempeño de proyectos (Performance Measurement).....	21
2.2.1 Medición del desempeño de proyectos de construcción en Colombia.....	23
2.2.2 Uso de Indicadores Clave de Desempeño (KPI) para la medición de proyectos	23
2.2.3 Medición del desempeño en procesos de diseño.....	26
2.3 Building Information Modeling – BIM.....	26
2.3.1 Integración entre BIM y Project Management.....	27

2.3.2	Integración de BIM con la medición del desempeño en proyectos.....	28
2.3.3	Políticas, procesos y tecnologías BIM	28
2.3.4	Datos e información de los modelos BIM.....	37
2.3.5	Integración entre BIM y Business Intelligence	42
2.4	Conclusiones del marco teórico	43
3.	Metodología	47
3.1	Revisión de literatura	49
3.1.1	Conclusiones revisión de literatura	54
3.2	Entrevistas a panel de expertos	55
3.2.1	Resultados de las entrevistas.....	57
4.	Sistema de medición del desempeño basado en indicadores para procesos de diseño.....	69
4.1	Componentes del sistema de medición de indicadores	69
4.2	Estructura del sistema de medición de indicadores.....	72
4.2.1	Fases de proyecto	72
4.2.2	Procesos de proyecto.....	76
4.2.3	Criterios de éxito para la medición del desempeño.....	78
4.3	Medición del desempeño en procesos de diseño mediante indicadores.....	82
4.3.1	Medición de la autoría de diseños.....	84
4.3.2	Medición de la revisión de diseño.....	93
4.3.3	Medición de la coordinación técnica de diseños.....	97
4.3.4	Medición de la Estimación del costo	99
4.4	Encuesta de validación del sistema de medición	106
4.4.1	Resultados de la encuesta.....	108
4.5	Integración de soluciones digitales usando Business Intelligence	114
4.5.1	Fuentes de datos e información.....	115
4.5.2	Archivos interoperables para el intercambio de información	119
4.5.3	Interfaz de análisis y visualización de datos	123
5.	Conclusiones y recomendaciones	129
5.1	Conclusiones	129
5.2	Recomendaciones.....	132
	Bibliografía	135

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1	11
Figura 2	32
Figura 3	41
Figura 4	49
Figura 5	50
Figura 6	54
Figura 7	57
Figura 8	63
Figura 9	69
Figura 10	75
Figura 11	78
Figura 12	115
Figura 13	115
Figura 14	116
Figura 15	117
Figura 16	118
Figura 17	119
Figura 18	123
Figura 19	124
Figura 20	125
Figura 21	126
Figura 22	126
Figura 23	127
Figura 24	128

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1	25
Tabla 2	30
Tabla 3	35
Tabla 4	36
Tabla 5	38
Tabla 6	40
Tabla 7	43
Tabla 8	49
Tabla 9	51
Tabla 10	52
Tabla 11	53
Tabla 12	56
Tabla 13	58
Tabla 14	59
Tabla 15	61
Tabla 16	62
Tabla 17	63
Tabla 18	64
Tabla 19	72
Tabla 20	76
Tabla 21	82
Tabla 22	106
Tabla 23	107
Tabla 24	117

Tabla 25.....	120
Tabla 26.....	122
Tabla 27.....	122

Introducción

En el ámbito de la construcción de viviendas de interés social en Colombia, la carencia de un sistema de medición claro para evaluar el desempeño y éxito de los proyectos, especialmente en etapas tempranas como la planeación y el diseño, ha sido identificada como una problemática significativa. Esta ausencia de métricas específicas durante la etapa de diseño ha generado la necesidad de desarrollar estrategias efectivas que permitan una evaluación estructurada y sistemática del desempeño de estos proyectos. La presente investigación surge como respuesta a la problemática identificada, abordando diversos objetivos con el fin de establecer un marco sólido para la medición del desempeño en proyectos de vivienda de interés social. A través de un riguroso proceso de diseño de investigación, se han obtenido conclusiones valiosas que arrojan luz sobre la realidad actual de la medición del desempeño en la industria de la construcción colombiana.

En primer lugar, se ha realizado un exhaustivo análisis para identificar los criterios e indicadores más relevantes para la medición del éxito durante la fase de diseño. La revisión de literatura y las entrevistas a un panel experto revelaron la escasa práctica de sistemas de medición del desempeño durante el diseño de proyectos de construcción. Además, se identificaron criterios de éxito esenciales, como Costo, Tiempo, Calidad, Salud y seguridad, Ambiental, Satisfacción del cliente, entre otros, que proporcionan un marco integral para la evaluación de proyectos de vivienda VIS. En segundo lugar, la investigación se adentró en el análisis de proyectos que emplearon metodologías BIM (Building Information Modeling) en sus procesos de diseño. Se examinó detalladamente la información generada en estos proyectos, clasificándola en información geométrica y no geométrica, y se validó mediante una encuesta dirigida a BIM Managers de empresas constructoras. Esta fase permitió identificar archivos interoperables y establecer la base conceptual para la utilización de datos BIM en la medición del desempeño. Posteriormente, se desarrolló una estrategia efectiva para integrar datos BIM y tecnologías de Business Intelligence (BI) en la medición del desempeño. El sistema propuesto se estructura en seis criterios de éxito y 17 indicadores de desempeño distribuidos en procesos clave de diseño. La automatización de la obtención de datos minimiza recursos y mejora la eficiencia en el seguimiento constante de indicadores. Finalmente, se presenta una plataforma digital que utiliza herramientas como

Autodesk Revit®, Autodesk Navisworks Manage®, Autodesk Construction Cloud®, y Microsoft Power BI para la gestión eficiente de la información y la visualización de datos. La integración de estos recursos existentes en las organizaciones permite la creación de tableros de control estructurados, denominados "interfaces", que presentan la información de manera lógica y eficiente para facilitar la toma de decisiones durante la etapa de diseño en proyectos de vivienda VIS.

En conjunto, esta investigación ofrece un enfoque integral y práctico para abordar la problemática de la medición del desempeño en proyectos de vivienda de interés social, incorporando tanto criterios tradicionales como metodologías BIM y tecnologías BI para impulsar la eficiencia y la calidad en la industria de la construcción en Colombia.

∴

1. Planteamiento del problema

1.1 Contexto nacional

La construcción ha sido tradicionalmente considerada una de las industrias más ineficientes, inefectivas y derrochadoras (Beatham et al., 2004), poco innovadora (Winch, 2003) y poco productiva (CAMACOL & McKinsey & Co, 2018) cuando se le compara con otras industrias como la manufacturera, la automotriz o el sector financiero (Bygballe & Ingemansson, 2014). Estas percepciones del sector constructor se apalancan en problemáticas que están presentes en el desarrollo de proyectos, tales como los retrasos en entregas de hasta un 20% por encima de lo planeado, y sobrecostos de hasta el 80% de lo presupuestado (CAMACOL & McKinsey & Co, 2018).

El contexto nacional colombiano no ha sido ajeno a estas problemáticas, tal como se puede observar en estudios como el “Informe de productividad. Sector Construcción de edificaciones”, realizado por CAMACOL & McKinsey & Co, (2018), en donde se muestra como la industria de la construcción en Colombia se encuentra rezagada en términos de productividad comparadas con otras (pág. 22), así como estadísticas relacionadas con demoras en la construcción de proyectos de vivienda de interés social (VIS) y proyectos no VIS (p. 37-38), y la presencia de sobrecostos en proyectos del mismo tipo (p. 38). De esta manera, en el estudio realizado se afirma que en general “las compañías nacionales adoptan un menor nivel de mejores prácticas disponibles en relación con el promedio internacional, 59% frente a 65%” (CAMACOL & McKinsey & Co, 2018, p. 29).

Estos indicadores muestran la problemática de productividad que sufre la industria de la construcción, la cual se torna más crítica en cuanto el sector es uno de los principales pilares de la economía nacional, tal como se muestra en las Cuentas Nacionales Trimestrales realizadas por el DANE para el IV trimestre de 2022, en donde la construcción aportó el 4.29% del PIB nacional, significando un valor de 11068 miles de millones de pesos (DANE, 2022a). Asimismo, tal como lo muestran los boletines técnicos de indicadores económicos alrededor de la construcción

realizados por el DANE, se puede evidenciar el impacto del sector con un crecimiento en el PIB en el trimestre julio - septiembre de 2022 del 7%, con relación al mismo trimestre de 2021 (DANE, 2022b). Adicionalmente, la construcción revela una gran importancia no solo en la dimensión económica, sino además en la dimensión social, en donde su impacto mejora las condiciones y calidad de vida de los ciudadanos, según se indica en el Marco Nacional de Cualificaciones (CAMACOL, 2020b), formando parte de las condiciones que son revisadas por parte del índice de pobreza multidimensional, principalmente en las áreas de “Condiciones de vivienda” y “Trabajo”. Estos datos nos revelan la gran importancia del sector constructor para la economía y la sociedad, y refuerzan la necesidad de corregir las problemáticas de productividad y eficiencia de la industria a nivel general.

De entre los subsectores correspondientes a la construcción, la vivienda es uno de los que más relevancia ha adquirido en últimos años, debido principalmente a las cifras de ventas de unidades de vivienda de interés social VIS, las cuales han tenido un crecimiento considerable en los últimos 10 años según las cifras de Coordinada Urbana, citada en los informes económicos de Camacol (CAMACOL, 2022). Este crecimiento se encuentra explicado principalmente por las políticas de vivienda a través de programas como “Mi Casa Ya”, entre otros, los cuales de manera conjunta brindaron 67730 subsidios a fecha de 2018 (CAMACOL, 2020b). Aunque se muestran unas importantes cifras de ventas de unidades de vivienda, sumado al crecimiento constante que ha tenido el subsector en la última década, estudios como el de CAMACOL & McKinsey & Co (2018) revelan que las empresas constructoras tienen todavía un amplio margen de mejora respecto a la productividad de la industria.

1.2 Medición del desempeño

Dado el contexto anterior, se genera desconfianza e incertidumbre respecto al éxito de los proyectos de construcción residencial en Colombia, especialmente cuando estos afrontan problemáticas que directamente van en contra de los objetivos de cualquier proyecto, como los sobrecostos y demoras en la entrega de las viviendas. El éxito de un proyecto tiene diferentes significados para diferentes personas, sin embargo, suele estar definido por el cumplimiento de las metas y los objetivos establecidos por las partes interesadas del proyecto (*stakeholders*), y determinado mediante la formulación de criterios de éxito, basados en la medición de Indicadores

Claves de Desempeño (*KPI*) del proyecto (A. P. C. Chan & Chan, 2004; Moradi et al., 2022; Olugboyega et al., 2021).

En el pasado, la definición de éxito del proyecto se basaba principalmente en la medición de los aspectos financieros del proyecto, así como del “triángulo de hierro” (*iron triangle*) el cual se centra en el costo, tiempo y calidad (Beatham et al., 2004), estos eran los criterios básicos que se tenían en cuenta para la gestión de proyectos (*Project Management, PM*). Sin embargo, se ha evidenciado la necesidad de establecer métricas que midan más allá de esos factores, debido a que estos son insuficientes para definir completamente el éxito de un proyecto (Beatham et al., 2004; Moradi et al., 2022; Olugboyega et al., 2021; Toor & Ogunlana, 2010). Por lo tanto, han sido propuestos nuevos criterios que evalúan aspectos no financieros como la satisfacción del cliente, seguridad, reclamaciones legales, desempeño ambiental entre otros (A. P. C. Chan & Chan, 2004; Moradi et al., 2022). Así, estos nuevos criterios muestran una perspectiva más amplia e integral del éxito de un proyecto, permitiendo su comprensión más allá de los enfoques tradicionales.

Es importante tener en cuenta que el éxito depende de la forma en que el equipo de trabajo logre alcanzar efectivamente los objetivos del proyecto (Parikh & Phugat, 2008) y por ello es crítico realizar una medición del desempeño. El desempeño o rendimiento (*performance*) tanto del proyecto como del equipo ha sido detectado como un aspecto clave en el éxito de un proyecto debido a que su gestión y medición permiten mejorar los resultados y lograr los objetivos propuestos (Moradi et al., 2022; Parikh & Phugat, 2008). Pese a estos beneficios, no es común la medición del desempeño en las empresas constructoras colombianas (Botero et al., 2007). Sin embargo, se ha escrito bastante literatura sobre la medición del desempeño y el establecimiento de KPIs para los proyectos de construcción, tales como propuestas de KPIs para procesos de diseño (Herrera et al., 2019; Orihuela et al., 2017), eficiencia ambiental (Kylili et al., 2016; Presley & Meade, 2010; Stanitsas et al., 2021), procesos de seguridad (Mahmoud et al., 2020), y otras temáticas más. No obstante, la formulación de estos KPIs obedece principalmente al interés o necesidad de medir el proceso o resultado puntual, y no se encuentran enmarcados dentro de una estrategia organizacional de medición del desempeño.

Adicionalmente, la gran mayoría de las propuestas de medición se centran en los indicadores de resultados, teniendo en cuenta la diferenciación que indica Alarcon et al. (2001) entre los indicadores de proceso y los indicadores de resultados, diferenciación que también resalta Beatham

et al. (2004), distinguiendo entre los KPIs y los KPOs, respectivamente. Esta diferenciación es clave debido a que la gran mayoría de propuestas de medición del desempeño se encuentran enfocadas en KPOs o indicadores de resultados, pero al obtenerse una vez finalizado el proyecto no son útiles como herramienta para evaluar y controlar el desempeño durante el desarrollo del proyecto, por lo cual una estrategia completa debe incluir tanto KPIs como KPOs, enmarcados en una perspectiva integral de gestión de proyectos.

1.3 Problema de investigación

El crecimiento sustancial en la demanda de proyectos de construcción de viviendas en Colombia en la última década ha coincidido con desafíos significativos en cuanto a la productividad en el sector. Las empresas constructoras enfrentan obstáculos relacionados con la carencia de un sistema de medición claro para evaluar el desempeño y éxito de los proyectos, particularmente en etapas tempranas como la planeación o el diseño. Esta ausencia de un marco estructurado de evaluación dificulta a las empresas constructoras mantener un control efectivo sobre el estado de sus procesos, limitando su capacidad para intervenir de manera eficaz y asegurar el cumplimiento de los objetivos previstos.

1.4 Justificación

Dada la problemática detectada en la industria de la construcción, y teniendo en cuenta el volumen de proyectos de vivienda y su importancia en el contexto colombiano, es de gran importancia atender los problemas relacionados con la productividad mediante estrategias, mecanismos y herramientas que permitan realizar una correcta medición de estado actual del proyecto y poder hacer modificaciones oportunas cuando se presenten inconvenientes en el desarrollo de las distintas actividades y tareas. De esta manera, se propone el desarrollo de una estrategia de medición del desempeño en proyectos a través del uso de KPIs y KPOs sobre distintos criterios de éxito seleccionados. Sin embargo, autores como Collin (Tal como se cita en A. P. C. Chan & Chan, 2004) y Botero et al. (2007) advierten que la captura de datos para la medición de los indicadores puede hacer de este un proceso que consuma bastantes recursos y tiempo. Buscando evitar esto se plantea el uso de BIM (*Building Information Modelling*) para la generación de la información del proyecto y los datos necesarios para la medición del desempeño.

Varios autores encuentran en BIM (*Building Information Modelling*) una potencial herramienta que permitirá mejorar la productividad de la industria de la construcción (CAMACOL & McKinsey & Co, 2018; Eastman et al., 2011; Succar et al., 2012). BIM es una metodología que se enfoca en la centralización de la información de edificaciones mediante la creación y el uso de modelos 3D durante todo el ciclo de vida de estos (Borrmann et al., 2018). Su uso es recomendado por Camacol y McKinsey como uno de los principales frentes de trabajo para reducir la brecha de productividad debido a la poca adopción de tecnologías en la industria de la construcción en el país (CAMACOL & McKinsey & Co, 2018). Adicionalmente, la implementación de estas metodologías se encuentra alineada con los objetivos determinados por el gobierno nacional y Camacol dentro de la Estrategia Nacional BIM para impulsar la transformación digital del sector para mejorar la productividad y competitividad (CAMACOL, 2020a).

Pese a los beneficios reportados por la aplicación de estas metodologías, se ha encontrado la necesidad de continuar investigando sobre las implicaciones de BIM dentro la gestión de proyectos (*Project Management*) para la construcción (A. Chan et al., 2018; Fazli et al., 2014; Olugboyega et al., 2021), principalmente como una parte del *Project Management System (PMS)* debido a la utilidad de sus herramientas para la gestión, planificación y control de un proyecto (Peterson et al., 2011; Rokooei, 2015). Sin embargo, se evidencia un vacío de conocimiento cuando se busca asociar la información generada por los procesos BIM dentro de la gestión realizada en un PMS. Adicionalmente, estos vacíos de conocimiento se incrementan cuando son trasladados a un entorno nacional, en donde la implementación de BIM en las empresas nacionales ha sido principalmente desarrollado por las constructoras de mayor tamaño (CAMACOL & McKinsey & Co, 2018), pero enfocado a los procesos de producción, sin considerarlos partes de una estrategia general y unificada para la gestión de un proyecto. Por lo tanto, se evidencia la necesidad de profundizar la aplicación de BIM en PM (*Project Management*). De esta manera, se propone el uso de metodología y, principalmente, los datos BIM en la gestión del proyecto, con un enfoque puntual en la medición del desempeño de los procesos de producción. Esta perspectiva es innovadora al explorar tópicos desconocidos, mediante el uso de tecnologías recientes aplicadas a procesos de evaluación y control.

El uso de Inteligencia Empresarial (*Business Intelligence, BI*) se ha vuelto cada vez más relevante en la industria de la construcción, especialmente en el contexto de la implementación BIM en los proyectos de construcción dado que los procesos BIM generan una gran cantidad de datos,

incluyendo información geométrica, de costos, tiempo, especificaciones e información de rendimiento de los activos físicos, entre otros tipos de información (Borrmann et al., 2018). Para aprovechar al máximo esta gran cantidad de datos, las empresas constructoras pueden utilizar herramientas de BI para procesarlos y analizarlos de manera efectiva. El uso de BI en combinación con BIM permite la obtención de información relevante y oportuna para la toma de decisiones en la gestión de proyectos de construcción (Kadcha et al., 2022).

Por lo tanto, el presente estudio propone definir una estrategia de medición del desempeño de proyectos residenciales a través de indicadores KPIs y KPOs específicos, la cual se alimente de la información BIM contenida en los proyectos y se apoye en el uso de herramientas de analítica de datos y *Business Intelligence* BI para su visualización. De esta manera se buscó demostrar como el uso combinado de la información BIM y las tecnologías BI permiten mejorar la medición del desempeño de proyectos residenciales, contribuyendo a lograr el cumplimiento de los criterios de éxito de estos. Además, los resultados del estudio proporcionaron herramientas para su implementación en empresas constructoras a BIM manager, project manager, coordinadores y directores de proyectos, sirviendo como instrumento práctico que permita realizar mediciones del desempeño para la organización. Por último, el estudio desarrolló conocimiento y permitió cerrar vacíos en cuanto a la relación entre los tópicos generales de BIM y *Project Management*, así como amplió la literatura en cuanto al uso combinado de información BIM y *Business Intelligence* BI, con posibles aplicaciones a otros tipos de proyectos dentro del sector de la construcción.

1.5 Preguntas de investigación

- ¿Cuáles son los criterios y KPIs más relevantes para medir el éxito durante el diseño de proyectos de vivienda VIS en empresas de construcción colombianas?
- ¿Qué información puede ser obtenida de proyectos de vivienda VIS en los que se implementaron metodologías BIM para su uso en la medición de desempeño?
- ¿Cómo puede utilizarse de manera conjunta datos BIM y tecnologías BI para mejorar la medición del desempeño en proyectos de vivienda?
- ¿Cuál es la mejor manera de comunicar los resultados de los análisis y la medición del desempeño con los líderes de proyecto?

1.6 Objetivos de investigación

Los objetivos de esta investigación se han desarrollado teniendo en cuenta los planteamientos de Hernández-Sampieri & Mendoza (2018) con el fin de explicar que pretende la investigación de manera clara. Expresado lo anterior, se propone el siguiente objetivo general para la presente investigación.

1.6.1 Objetivo general

Desarrollar un sistema para medir el desempeño de los procesos de diseño en proyectos de vivienda VIS, a través del uso de indicadores de desempeño basados en información BIM y tecnologías BI para empresas constructoras.

1.6.2 Objetivos específicos

- Identificar los criterios e indicadores más relevantes para la medición del éxito durante el diseño de proyectos de vivienda de interés social en empresas de construcción colombianas.
- Identificar y analizar la información desarrollada en proyectos de vivienda de interés social que utilizaron metodologías BIM en sus procesos de diseño para determinar su uso en la medición del desempeño de estos.
- Desarrollar una estrategia efectiva para utilizar datos BIM y tecnologías BI de manera conjunta en la medición del desempeño en proyectos de vivienda de interés social.
- Establecer un enfoque para comunicar los resultados de la medición del desempeño en proyectos de vivienda de interés social, utilizando tecnologías BIM, BI y herramientas de visualización de datos.

∴

2. Marco Teórico

Teniendo en cuenta las recomendaciones de Creswell (2014) se elabora un mapa de literatura mostrado en la Figura 1, que permite organizar de forma jerárquica los temas y subtemas que se consideran los más pertinentes para el desarrollo del estudio. El mapa desarrollado tiene como objetivo desglosar unos temas generales en aspectos cada vez más específicos, para así dar con la necesidad de estudio en la cual se enmarca el presente trabajo de investigación. De esta manera, los temas centrales seleccionados para la revisión de literatura se agrupan en dos grandes categorías, a saber: *Project Management* y *Building Information Modelling*, a los cuales siempre se les considera bajo el filtro del sector constructor de vivienda en Colombia.

Figura 1

Mapa de literatura



De esta forma, el marco teórico se estructura en dos partes: la primera, define el concepto de gestión de proyectos o *Project Management*, como disciplina clave para la ejecución de proyectos de manera eficiente. En esta primera parte se centra el aspecto con mayor carga teórica y de mayor relevancia para la investigación, dado que se revisa los distintos enfoques de gestión aplicados a proyectos de construcción, definiendo el tópico de éxito del proyecto (*project success*), así como los criterios de este. Con estos conceptos claros, se procede a hacer una amplia revisión de la medición del desempeño (*performance measurement*), con relación a las metodologías de gestión de proyectos revisadas, haciendo hincapié en la medición de procesos. De esta manera se aborda uno de los objetivos específicos del estudio, el cual es identificar los criterios y KPIs más relevantes para la medición del desempeño y, en consecuencia, del éxito de proyectos residenciales.

La segunda parte del marco teórico se centra en el concepto de BIM (*building information modelling*) como una metodología para la gestión de la información en proyectos de construcción. Así, se busca explorar la relación que existe entre las disciplinas de BIM y *Project Management*, observando en la primera una herramienta que potencia la gestión, con miras a la mejora de la productividad en la ejecución de los proyectos de construcción. De esta manera, la revisión de literatura sobre BIM abordará su relación con el *Project Management* y con los criterios de éxito, además de conectarse directamente con la medición del desempeño a través del entendimiento de los KPIs y en como la metodología puede apoyar el levantamiento de la información necesaria para la elaboración de métricas, enmarcado en el contexto de la construcción en Colombia y su madurez en la implementación de procesos BIM.

Finalmente, el marco teórico aborda un concepto sobre el análisis de datos, además de las herramientas y procesos más actuales en la inteligencia empresarial (*business intelligence BI*), el cual se encuentra enmarcado en los lineamientos de gestión de proyectos de construcción, para dar cumplimiento a dos de los objetivos de la presente investigación, a saber, establecer una estrategia efectiva para el uso de BI sobre los datos BIM generados por los proyectos, y adicionalmente, definir la manera en la que se presentarán los reportes y la información de manera eficaz a los líderes de proyecto para su visualización y toma de decisión.

2.1 Project Management – Gestión de Proyectos

Dado que la industria de la construcción es una industria orientada a proyectos (Lock, 2007), es clave entender la gestión de proyectos o *Project Management*. Tal como es definida por el Project Management Institute (PMI), la dirección o gestión de proyectos es la aplicación de conocimiento y herramientas para dirigir la ejecución de un proyecto y lograr los resultados esperados (Project Management Institute, 2021). Un proyecto es un esfuerzo temporal destinado a la creación de un resultado único, el cual tiene un inicio y un fin bien definidos, así como habitualmente una asignación de recursos (Project Management Institute, 2021).

Aunque el concepto de gestión de proyectos ha existido a lo largo de la historia de la humanidad, su desarrollo como disciplina formal comenzó a mediados del siglo XX, cuando la industria militar estadounidense comenzó a utilizar técnicas de planificación y programación (Lock, 2007). En la década de 1960, se funda el *International Project Management Association* (IPMA) en Europa y el *Project Management Institute* (PMI) en Estados Unidos, y posteriormente surgen muchas otras entidades como la *Association for Project Management* (APM) en Reino Unido y la *Project Management Association of Japan* (PMAJ) en Japón, mostrando así un gran interés en el desarrollo y promoción de las mejores prácticas para la gestión de proyectos.

El sector de la construcción es altamente complejo debido a la naturaleza única de cada proyecto, a causa de los diferentes tipos de construcción (residencial, industrial, comercial, portuario, infraestructura, etc.), varias especialidades y disciplinas presentes en cada proyecto, además de una ejecución desarrollada por variados contratistas y cadenas de suministros complejas (Clough et al., 2008), y los múltiples intereses que cada *stakeholder* tenga sobre los objetivos del proyecto (Schaufelberge & Holm, 2017). Esto hace necesaria la aplicación de procesos y metodologías de *Project Management*, con el objetivo de gestionar el desarrollo de los proyectos en la industria de la construcción, de tal manera que sean más eficientes y se cumplan los objetivos trazados.

2.1.1 Enfoques de gestión de proyectos

La gestión de proyectos es una disciplina amplia que se ha venido desarrollando los últimos 50 años, y durante este tiempo han sido creadas diferentes perspectivas o enfoques para abordar el desarrollo de los proyectos. Con el objetivo de aclarar conceptos, se toma la definición de *Project Management Approach* mencionada por Špundak (2014), en la cual se indica como un conjunto de

principios y directrices que establecen cómo se gestiona un proyecto específico. A continuación, se listan los principales enfoques de la gestión de proyectos para el sector de la construcción:

Enfoque tradicional:

Durante muchos años, sólo existió una única perspectiva para el desarrollo de proyectos bajo metodologías consideradas como *Project Management*, la cual se consolidó a través de los BOK, *Body Of Knowledge*, que surgieron gracias al trabajo realizado por las distintas organizaciones de PM desde la década de los 80s (Špundak, 2014). Este enfoque, también denominado de *cascada* o *predictivo* se caracteriza por ser lineal y secuencial, en donde la estructura de gestión del proyecto es rígida y jerárquica, así como la definición de las fases y los alcances de cada etapa, las cuales deben completarse en un orden específico (Špundak, 2014). Esto sucede debido a que en este enfoque se asume que los proyectos tienen límites bien definidos, por lo cual se realiza una planificación temprana del proyecto, la cual incluye un presupuesto y una duración claramente acotados, así como un alcance específico, de tal manera que los proyectos son solo una secuencia de actividades o tareas, las cuales deben controlarse rígidamente y no deberían presentar mayor variación a lo largo de su ciclo de vida (Lalmi et al., 2022; Lock, 2007; Špundak, 2014). Esta visión del enfoque tradicional fue, durante mucho tiempo, expuesta como una de sus principales virtudes, la capacidad de poder gestionar en un único conjunto de procesos y métodos cualquier proyecto por su uniformidad (Lock, 2007; Špundak, 2014), sin embargo, los estudios realizados posteriormente han mencionado que esa rigidez de la visión tradicional no podía aplicarse a todos los tipos de proyectos, debido a las grandes diferencias que pueden existir entre los objetivos, alcances, presupuestos y contexto de cada uno, mencionando esto como una desventaja del alcance tradicional (Lalmi et al., 2022; Špundak, 2014).

Enfoque Ágil:

El enfoque ágil de gestión de proyectos es un enfoque iterativo e incremental, el cual se centra en la entrega temprana y continua de valor al cliente. En contraposición a la perspectiva tradicional o en cascada vista anteriormente, la metodología ágil promueve la flexibilidad y adaptación al cambio constante de los proyectos (Špundak, 2014). Esta perspectiva emerge para el desarrollo de proyectos de IT y software, y básicamente, se define la agilidad como el balance óptimo entre estabilidad y un adecuado nivel de flexibilidad (Albuquerque et al., 2020; Ciric et al., 2019). Gracias a esto, la gestión ágil permite la entrega de valor al cliente, durante el desarrollo de proyectos complejos que son cambiantes y poco definidos, teniendo en cuenta la impredecibilidad

del proyecto y los requerimientos de cambios de clientes, de tal manera que los productos se testean y verifican con el cliente antes de su finalización, mediante procesos iterativos en donde se retroalimentan y se construye sobre lo construido cada vez, precisando así hasta culminar el proyecto (Lalmi et al., 2021). Albuquerque et al. (2020) define 3 características principales de la gestión ágil de proyectos: Una planeación flexible y constante, especialmente en proyectos con objetivos poco definidos o un alcance abierto; Un desarrollo iterativo del alcance del proyecto basado en una secuencia de entregas parciales / validaciones, que se habilitan mediante ciclos de continuo crecimiento y retroalimentación del cliente; y equipos de trabajo autónomos y autodirigidos, los cuales son multidisciplinarios y tienen amplia independencia sobre sus tareas y procesos.

Scrum:

Scrum es un marco de trabajo ágil de gestión de proyectos desarrollada en el sector de las tecnologías de la información, el cual se ha utilizado con éxito en distintas industrias. Si bien inicialmente se desarrolló para proyectos de software, los principios y prácticas de Scrum pueden adaptarse para aplicarse en proyectos de construcción de manera efectiva (Schwaber & Sutherland, 2020; Streule et al., 2016). En un proyecto que utiliza Scrum, se definen tres roles principales: El *Scrum Máster* es responsable de facilitar el proceso de Scrum y garantizar que se sigan las reglas y prácticas, por otro lado, el *Product Owner* representa los intereses del cliente y establece las prioridades del proyecto, finalmente, los equipos de desarrollo están compuestos por profesionales que trabajan juntos para entregar los productos o resultados del proyecto (Streule et al., 2016).

De esta manera, el proyecto se divide en iteraciones llamadas *sprints*. Antes de que comience cada sprint se realiza una reunión de planificación, durante esta reunión, el *Product Owner* identifica y prioriza los elementos del backlog del proyecto que se trabajarán en el sprint. El equipo de desarrollo colabora para estimar la cantidad de trabajo que se puede realizar durante el sprint y crea el plan para completar esos elementos (Streule et al., 2016). Las reuniones diarias, conocidas como *Daily Scrum*, son una parte fundamental de Scrum. Estas reuniones se llevan a cabo todos los días y brindan la oportunidad de que el equipo de desarrollo se sincronice y se mantenga al tanto del progreso. Durante la reunión, cada miembro del equipo responde a tres preguntas clave: ¿Qué hizo ayer?, ¿Qué hará hoy? y ¿Hay algún obstáculo o problema que impida su progreso? Esta comunicación regular y rápida ayuda a identificar y abordar problemas de manera oportuna. De esta manera, Scrum se basa en la entrega incremental de productos o resultados (Schwaber &

Sutherland, 2020). Esto implica que el equipo de desarrollo trabaje en componentes o secciones del proyecto que se pueden entregar de forma independiente, de tal manera que cada incremento entregado debe ser funcional y agregar valor al proyecto en su conjunto. Esto permite que el cliente y otras partes interesadas proporcionen comentarios tempranos y facilita los ajustes y cambios en función de las necesidades cambiantes. Al final de cada sprint, se lleva a cabo una reunión de revisión del sprint, en la cual el equipo de desarrollo muestra los resultados alcanzados durante el sprint al *Product Owner* y a otras partes interesadas relevantes. Durante esta reunión, se recopila el *feedback* y se realizan ajustes en el backlog del proyecto según sea necesario. Además, se lleva a cabo una retrospectiva del sprint, donde el equipo de construcción reflexiona sobre su proceso y busca mejoras continuas en la forma en que trabajan juntos (Schwaber & Sutherland, 2020).

Sin embargo, es importante tener en cuenta que Scrum puede no ser adecuado para todos los proyectos de construcción. La naturaleza y las características del proyecto, así como la disponibilidad y la experiencia del equipo de construcción, deben considerarse al determinar si Scrum es la metodología más apropiada. En algunos casos, una combinación de enfoques ágiles y tradicionales puede ser más efectiva.

Enfoque híbrido:

Como su nombre lo indica, los enfoques híbridos son aquellos donde se toman características de ambos enfoques, tradicional y ágil, para así crear una metodología que se ajuste a las necesidades particulares de un proyecto o industria específico, tomando los beneficios y flexibilidad de las metodologías ágiles, sin perder el orden y la estructura de la metodología tradicional (Lalmi et al., 2022). En los enfoques híbridos, el principio más importante es ser flexible para desarrollar un buen modelo de gestión para el proyecto (Lalmi et al., 2021).

Lean Construction:

Las metodologías *Lean Construction* aparecen enmarcadas en el concepto de enfoque híbrido, en las cual se mantiene la estructura del enfoque tradicional o de cascada, pero añadiendo principios que permiten reducir el gasto y desperdicio, frecuentes en la industria de la construcción (Lalmi et al., 2021). Lean es una filosofía de trabajo y un sistema de producción que proviene originalmente de la industria manufacturera y automotriz conocido como *Lean Manufacturing* (Pons, 2014), de esta manera, Lean nace como un sistema de negocio desarrollado por Toyota al finalizar la segunda guerra mundial, conocido como *Toyota Production System TPS*, con el objetivo de proveer mejor calidad a un menor coste, y en menos tiempo (Pons, 2014). El TPS se

basaba en los conceptos de Just-In-Time y Jidoka, así como también de la mejora continua o Kaizen, y el ciclo de Deming, con lo cual Toyota obtuvo un sistema productivo superior. Así, Womack y Jones (1996) definieron cinco principios básicos del pensamiento Lean:

1. Valor: el objetivo central de la metodología Lean es crear valor al cliente, entendiendo que es lo que el cliente percibe como valioso y, a partir de ahí, construir el diseño de producto y el proceso para que sea más efectiva su fabricación, eliminando aquellas características que no agreguen valor.
2. *Value Stream* o Cadena de Valor: Estas son todas las actividades que permiten transformar insumos y entradas en un producto listo para entregar al cliente. Las actividades que no generen valor o no sean necesarias en la cadena deben ser eliminadas.
3. Flujo: Se busca optimizar el flujo de trabajo y minimizar las interrupciones mediante una planificación cuidadosa y una secuencia lógica de actividades.
4. Sistema *Pull*: Se basa en la demanda de las actividades finales sobre sus necesidades y requerimientos, los cuales son comunicados hacia las actividades anteriores, de tal manera que los responsables de las actividades anteriores atienden la demanda y los responsables de las actividades finales son los que “jalan” o “tiran” de la necesidad.
5. Perfección: Se entiende como la búsqueda la perfección mediante la mejora continua en todas las áreas y aspectos del proceso. Se fomenta la mentalidad de Kaizen, donde todos los miembros del equipo buscan identificar oportunidades de mejora, experimentar y aprender de los resultados.

De esta manera, la aplicación de los principios anteriormente descritos a los proyectos de construcción se conoce como *Lean Construction*, siendo su implementación desde la concepción del proyecto hasta su ejecución y puesta en servicio (Pons, 2014).

PRINCE2:

PRINCE2 es una metodología estructurada para la gestión efectiva de cualquier tipo de proyecto (Bradley, 1997). Desarrollado por el gobierno de Reino Unido, fue concebida originalmente para la gestión de sistemas de tecnología de la información, con el objetivo de ayudar a organizaciones e individuos a gestionar sus proyectos, programas y servicios consistentemente y de manera efectiva (Office of Government Commerce, 2009). Para lograr esto, la metodología aísla los aspectos relacionados con la gestión y la administración, de aquellos aspectos propios de la contribución de

cada especialista, como por ejemplo el diseño o la construcción, y se basa en 7 principios detallados a continuación:

1. **Justificación de negocio continua:** El proyecto debe estar claramente justificado en términos de beneficios y viabilidad para la organización. Esto implica evaluar constantemente si el proyecto sigue siendo viable y proporciona un retorno de inversión idóneo.
2. **Aprendizaje desde la experiencia:** Se quiere aprovechar la experiencia producto del desarrollo de proyectos anteriores. Por lo tanto, es importante documentar las lecciones aprendidas y aplicarlas a proyectos futuros.
3. **Roles y responsabilidades definidos:** La metodología establece roles y responsabilidades claros para todos los interesados en el proyecto, asegurando un entendimiento de las tareas, sus responsables, así como de los tomadores de decisión en el proyecto. Así, se identifican 3 participantes principales: Patrocinados del negocio, Usuarios y Proveedores.
4. **Gestión por etapas:** Los proyectos basados en esta metodología se dividen en etapas manejables, cada una con objetivos, planes y entregables definidos. Esto permite una mayor visibilidad y control del progreso del proyecto, así como la posibilidad de evaluar la viabilidad y la continuidad del proyecto en cada etapa.
5. **Gestión de excepciones:** Se definen claramente las tolerancias para cada objetivo del proyecto, permitiendo delegar autoridad apropiada según las distintas responsabilidades para dirigir, gestionar o entregar el proyecto.
6. **Orientado a productos:** la metodología se centra en los productos o entregables del proyecto. Cada producto se define claramente y se establecen criterios de calidad para su entrega. Esto garantiza que los resultados del proyecto sean claros, medibles y alineados con los requisitos del cliente.
7. **Adaptación a la medida del proyecto:** El principal valor de la metodología PRINCE2 es que se puede aplicar independientemente del tipo de proyecto, tamaño o ubicación. Por lo tanto, es importante realizar una adaptación del método, entendiendo como se va a aplicar en el proyecto.

Estos principios son universales, pudiendo ser aplicados a cualquier proyecto sin importar que tipo de proyecto ni sus dimensiones, y aunque se ha aplicado principalmente a proyectos de desarrollo de software y tecnologías de la información, estudios como el de Sobieraj et al., (2021) muestran

que esta metodología se puede implementar en proyectos de construcción con igual eficacia que metodologías tradicionales como el PMBoK®.

2.1.2 Gestión de proyectos aplicado a la vivienda de interés social en Colombia

El desarrollo de proyectos de vivienda en Colombia, incluyendo la vivienda de interés social, han sido gestionados usando las metodologías tradicionales o predictivas (Caballero et al., 2018; Jiménez, 2021), siendo el PMBOK® una referencia esencial para la gestión de este tipo de proyectos. Es así como en una búsqueda de literatura es posible identificar varios autores, tesis y artículos que hablan sobre el uso y la aplicación de metodologías y herramientas de *Project Management* con un enfoque más tradicional y predictivo a proyectos y empresas constructoras en Colombia, principalmente para el desarrollo de proyectos de vivienda.

El estudio realizado por Caballero et al. (2018) hace una revisión de literatura sobre la aplicación de metodologías *Lean Construction* en Colombia, de la cual concluyeron que, pese a su reciente aparición (2002), este tipo de enfoque para la gestión de proyectos ha sido acogido entre empresas de gran envergadura y reconocimiento, dados los resultados positivos y los beneficios encontrados. Sin embargo, también reconoce la baja aplicación en el sector, principalmente dada por la resistencia al cambio de paradigma respecto a procesos que funcionan y ofrecen resultados satisfactorios siguiendo un enfoque predictivo y tradicional (Caballero et al., 2018). Aun así, es posible encontrar en la literatura distintas tesis (de posgrado, principalmente) que proponen integraciones entre modelos de gestión tradicionales con aplicación de metodologías Lean, de tal manera que sea un complemento para mejorar la gestión general de los proyectos (Caballero et al., 2018; Silva Sarmiento, 2022).

Con respecto a las metodologías ágiles como Scrum se hace notoria la disminución de literatura que aborde su implementación en proyectos de construcción a nivel nacional. Se encontraron 3 tesis que abordan su implementación, una de ellas (Aguilar et al., 2020) analiza las ventajas que supone usar Scrum para la planeación de proyectos de vivienda, siendo las otras dos tesis dedicadas a la implementación de Scrum en proyectos de construcción de otras infraestructuras. Las tres tesis tienen en común varias conclusiones, de tal manera que Scrum se debe utilizar de manera conjunta con metodologías tradicionales, creando un sistema híbrido, dado que así se minimiza el riesgo y se ayuda a superar las barreras de adaptabilidad, y por otro lado, que su mayor

valor se encuentra en la etapa de planificación y diseño del proyecto, más que durante la ejecución (o construcción) de este, y justificando la inversión en tiempo y recursos realizada para usar Scrum, dados los beneficios que reportaron los proyectos analizados (Aguilar et al., 2020; Hernández, 2022; Torres, 2021).

2.1.3 Éxito del proyecto y criterios de éxito (Project Success)

Una vez se han entendido los distintos métodos para gestionar proyectos de construcción, es necesario hacer una revisión respecto al concepto de *Project Success* o Éxito del proyecto. En primer lugar, la palabra “éxito” significa diferentes cosas para diferentes participantes del proyecto (*stakeholders*), por lo cual, visto a través de este lente, el éxito es una variable multidimensional (A. P. C. Chan & Chan, 2004; Olugboyega et al., 2021). También es importante destacar que el éxito de un proyecto de construcción no se limita únicamente a la finalización del proyecto a tiempo y dentro del presupuesto, por lo que es fundamental cumplir con los objetivos de calidad establecidos y satisfacer las expectativas del cliente, esto es lo que se conoce como el triángulo de hierro (*iron triangle*) de la gestión de proyectos (Atkinson, 1999; Beatham et al., 2004; A. P. C. Chan & Chan, 2004).

Sin embargo, varios autores han evidenciado la necesidad de establecer otras medidas de éxito que midan más allá de esos tres factores relacionados con el triángulo de hierro, debido a que son insuficientes para definir completamente el éxito de un proyecto de construcción dadas las complejidades que estos implican, tanto en su desarrollo como en la ejecución (Beatham et al., 2004; Moradi et al., 2022; Olugboyega et al., 2021; Toor & Ogunlana, 2010). Por lo tanto, han surgido criterios que evalúan aspectos no financieros como la satisfacción del cliente, seguridad, reclamaciones legales, desempeño ambiental, comunicación entre los miembros del equipo del proyecto, entre otros (A. P. C. Chan & Chan, 2004; Moradi et al., 2022). De esta manera, Moradi et al. (2022) menciona una clasificación de los criterios en dos grupos, cuantitativos y cualitativos. En términos cuantitativos, se pueden utilizar criterios como el cumplimiento de plazos y presupuesto, la eficiencia en el manejo de recursos, o la rentabilidad y el retorno de la inversión. Sin embargo, también es crucial considerar los aspectos cualitativos, como la satisfacción del cliente, la calidad percibida, la seguridad en el lugar de trabajo, la satisfacción de los contratistas y el impacto ambiental. La evaluación completa del éxito de un proyecto de construcción requiere un enfoque integral que abarque todos estos aspectos.

2.2 Medición del desempeño de proyectos (Performance Measurement)

Dado que el éxito de un proyecto dependerá del cumplimiento de los objetivos trazados, sean estos de índole cuantitativa o cualitativa, será entonces a través de la medición del desempeño en proyectos de construcción, también conocida como *performance measurement*, como se podrá constatar el cumplimiento de estos objetivos (Moradi et al., 2022). La medición del desempeño es una herramienta fundamental para evaluar y controlar el progreso y los resultados de los proyectos en la industria (Parikh & Phugat, 2008), la cual ha sido definida como el proceso de cuantificar la eficiencia y eficacia de las acciones pasadas (Neely et al., 2002), así como también el proceso de determinar cuán exitosas han sido las organizaciones o individuos en el logro de sus objetivos (Bititci et al., 1997).

Performance Measurement Systems

Los sistemas de medición del desempeño en proyectos de construcción, conocidos como *Performance Measurement Systems* (PMS), es un conjunto de mediciones e indicadores estructurados y sistemáticos, los cuales siguen unas pautas o reglas definidas claramente, que se utilizan para evaluar y controlar el rendimiento de los proyectos en la industria de la construcción. El propósito principal de un PMS es medir y mejorar la eficiencia y la calidad del desempeño, así como identificar oportunidades para una mejora progresiva (Yang et al., 2010).

Han sido realizados varios estudios sobre las formas y conceptos de un marco de trabajo que pueda llevar a cabo, de manera efectiva, la medición del desempeño de una empresa desde principios de la década de 1990 (Yu et al., 2007). Así, han aparecido diversas propuestas de PMS con herramientas de medición e indicadores variados, dentro de las cuales destacan tres enfoques que serán mencionados a continuación:

CII Best Practices

El *Construction Industry Institute* de Estados Unidos, afiliado a la Universidad de Texas en Austin, fue fundado en 1983 y se ha dedicado a realizar investigaciones con el fin de mejorar la productividad, calidad y seguridad de la industria de la construcción. De esta manera, ha desarrollado varias herramientas para medir el desempeño en proyectos de construcción, enmarcados dentro de una estrategia llamada *CII Best Practices*, en la cual aparece una categoría de “*Benchmarking & Metrics*”, en las cuales se usa el proceso sistemático de medir el desempeño

tanto internamente como contra la competencia, para determinar las mejores prácticas que puedan mejorar el rendimiento de las organizaciones.

EFQM

En Europa aparece el “*European Foundation for Quality Management excellence model*” en 1989, con el objetivo de mejorar la calidad de la gestión en Europa, por lo que es usado para medir y optimizar la calidad general de una organización (Yang et al., 2010). En 2019 se realiza una revisión y transformación del modelo EFQM, de tal manera que el foco del nuevo modelo no se centra tanto en la evaluación y el reconocimiento, sino en proporcionar una guía que permita a las organizaciones mejorar su funcionamiento y rendimiento (EFQM, 2021). Por lo tanto, el nuevo modelo EFQM reduce el número de criterios de nueve (9) a siete (7), agrupándolos en 3 categorías o bloques: Dirección, Ejecución y Resultados; de igual manera, los criterios de evaluación fueron redefinidos, cambiando con respecto al modelo anterior, siendo los nuevos criterios los siguientes:

1. Propósito, visión y estrategia
2. Cultura de la organización y liderazgo
3. Implicación de los grupos de interés
4. Creación de valor sostenible
5. Gestión del funcionamiento y la transformación
6. Percepción de los grupos de interés
7. Rendimiento estratégico y operativo.

Con estos cambios, el objetivo central es facilitar los procesos de autoevaluación de las organizaciones, identificando las fortalezas y encontrando áreas de mejora, para esto, utiliza un modelo de puntaje que reparte 1000 puntos entre los 7 criterios anteriormente definidos a través de 3 matrices REDER (EFQM, 2021). Estos cambios hacen que los dos modelos sean sustancialmente diferentes, no existiendo correspondencias entre los criterios de ambos modelos, aunque se mantenga el mismo espíritu de evaluación y excelencia de las organizaciones.

Balanced Scorecard (BSC)

El Balanced Scorecard (BSC) es una herramienta de control estratégico que permite evaluar y supervisar el rendimiento de una organización mediante un conjunto equilibrado de métricas e indicadores que abarcan distintas perspectivas más allá de las tradicionales métricas financieras

(Kaplan & Norton, 1992). De esta manera, permiten a las organizaciones revisar su desempeño a través de 4 grandes categorías:

1. Financiera – Centrada en los aspectos financieros y rendimientos del proyecto.
2. Cliente – Centrada en la satisfacción del cliente.
3. Procesos y/o perspectivas internas – Centrada en la eficiencia y eficacia de los procesos.
4. Aprendizaje y crecimiento – centrada en el desarrollo de habilidades y conocimientos.

Al utilizar estas 4 perspectivas y sus indicadores, el *Balanced Scorecard* proporciona una visión más holística y completa del rendimiento de un proyecto u organización (Tennant & Langford, 2008), a través de un conjunto específico de indicadores KPI que permiten a las distintas áreas dentro de la organización coordinar sus esfuerzos y objetivos con una estrategia general de desempeño (Beatham et al., 2004).

2.2.1 Medición del desempeño de proyectos de construcción en Colombia

Los esfuerzos dedicados al desarrollo de metodologías para la medición del desempeño en proyectos de construcción de manera estructurada y colaborativa, a través de medidas de *benchmarking*, no han logrado trascender en las empresas del sector constructor en Colombia como lo indica Botero et al. (2007), pese a su iniciativa para la definición de indicadores de desempeño, la página web citada en la publicación (www.benchcolombia.com) no se encuentra activa, y tampoco se registran publicaciones ni investigaciones que continúen con la propuesta presentada. La medición de indicadores en el sector constructor en Colombia se realiza según los esfuerzos individuales de cada organización, en donde predomina más los modelos de gestión tradicionales y el *Balance Scorecard* como herramientas de medición (Botero et al., 2007).

2.2.2 Uso de Indicadores Clave de Desempeño (KPI) para la medición de proyectos

Los distintos sistemas de medición del desempeño mostrados anteriormente se basan en el uso de indicadores clave de desempeño (KPIs) con el fin de determinar el cumplimiento de los objetivos esperados. Los KPI pueden definirse como los criterios que permiten medir el éxito o el fracaso de un proyecto (Atkinson, 1999; Beatham et al., 2004; A. P. C. Chan & Chan, 2004; Moradi et al., 2022). De esta manera, los indicadores deberían mostrar el estado de las organizaciones y los

proyectos, y servir tanto para la comprobación como para la toma de decisiones y correctivos necesarios. Fruto de este interés por la medición del rendimiento han surgido las propuestas de *Benchmarking*, que buscan comparar a las distintas organizaciones bajo criterios específicos, que permitan establecer una línea base ideal y, de manera conjunta, promover mejores prácticas para un aumento general de la productividad en el sector a través del aprendizaje y de una mejora continua en los procesos (Beatham et al., 2004).

Sin embargo, Beatham et al. (2004) detecta un problema significativo en los indicadores usados en los sistemas de medición del desempeño, los cuales no ofrecen la oportunidad de cambio, pues son indicadores diseñados para ser usados posterior a los resultados, para identificar el nivel de “rezago” en el proyecto finalizado, sin ofrecer la posibilidad de cambiar el desempeño del proceso asociado. Por lo tanto, autores como Beatham et al. (2004) y Orihuela et al. (2017) afirman que es necesario una mayor profundización y diferenciación en los tipos de métricas y/o indicadores, por lo que se proponen distintas clasificaciones de indicadores según la función que estos tienen en las métricas. Beatham et al. (2004) se basa en el modelo EFQM para definir una clasificación que separa los KPI - *Key Performance Indicator* (Indicadores Claves de Desempeño) de los KPO – *Key Performance Outcomes* (Resultados Clave de Desempeño), así, los KPI son definidos como mediciones que indican el rendimiento de los procesos asociados en “tiempo real”, la cual permite identificar el estado actual de un proceso y realizar cambios o tomar medidas correctivas, mientras que los KPOs son definidos como el resultado de un proceso o acción completada, por lo cual no ofrecen la oportunidad de cambiar en sí mismos, pues su resultado es una medida de un proceso que ya finalizó, pero si se pueden usar como base para la toma de decisiones y cambio en futuros procesos. De igual manera, Orihuela et al. (2017) propone una clasificación diferenciada en tres tipos de indicadores, a saber, Indicadores de Resultados, Indicadores de Procesos e Indicadores Predictivos. Los Indicadores de resultados busca evaluar el cumplimiento de los objetivos esperados al finalizar las fases o el proyecto como tal. En cambio, los indicadores de procesos buscan medir el desarrollo de actividades relacionadas con los pasos necesarios para alcanzar el objetivo trazado. Finalmente, los indicadores predictivos están relacionados con acciones proactivas o preventivas con el objetivo de medir si se logrará un resultado esperado, permitiendo realizar cambios de ser necesario.

Según la visión de Kerzner (2011), es necesario destacar la importancia de los indicadores de resultado en la evaluación del éxito de un proyecto tras su conclusión. Estos indicadores se enfocan

en medir los resultados reales en comparación con los objetivos y metas iniciales. Para él, estos indicadores son cruciales para determinar si un proyecto ha logrado sus objetivos y para evaluar su desempeño en términos de tiempo, costo y calidad. Los KPOs se emplean para una evaluación retrospectiva y para extraer lecciones de triunfos y desafíos pasados, lo que a su vez contribuye a la mejora de futuras prácticas de gestión de proyectos. Por otro lado, Kerzner también reconoce la importancia de los KPIs de predicción en la gestión de proyectos. Estos indicadores son vitales para anticipar y prevenir posibles problemas o desviaciones en el proyecto antes de que se materialicen. Los KPIs de predicción respaldan la gestión proactiva de proyectos, ya que habilitan la toma oportuna de medidas correctivas para evitar desviaciones significativas en términos de tiempo, costo o calidad. Kerzner enfatiza que la combinación de KPIs de resultado y de predicción brinda una visión integral y equilibrada de la gestión de proyectos, permitiendo a los gerentes anticiparse a los desafíos y tomar decisiones informadas para garantizar el éxito del proyecto desde su inicio hasta su conclusión. Podemos ver la comparación entre estos tipos de indicadores en la Tabla 1.

Tabla 1

Comparativa entre tipos de Indicadores según varios autores

Beatham et al.	Orihuela et al.	Kerzner	Definición
KPI	Indicadores Predictivos	Leading KPI Diagnostic KPI	Indicadores que miden el desempeño actual de los procesos y brindan oportunidad de cambio, permitiendo corregir y alcanzar los objetivos planteados
KPO	Indicadores de Resultados Indicadores de Proceso	Lagging KPI	Indicadores que miden el desempeño pasado de los procesos y proyectos, verifica el cumplimiento de los objetivos y permite establecer estrategias para los procesos futuros
Percepción	***	***	Indicadores basados en encuestas o entrevistas, de carácter cualitativo, busca determinar la percepción de los participantes sobre el estado del proceso específico a medir.

2.2.3 Medición del desempeño en procesos de diseño

La medición del desempeño se encuentra directamente relacionada con los criterios de éxito de un proyecto, por lo cual los principales sistemas de medición mencionados (CII, EFQM, Balanced Scorecard) usan KPOs (Indicadores de resultados) como la base de sus métricas. Sin embargo, estas iniciativas son principalmente propuestas de benchmarking, las cuales miden organizaciones o proyectos como una generalidad, y solo en algunos casos se centran en la fase de construcción del proyecto, ignorando el resto del ciclo de vida de este (Orihuela et al., 2018). De tal manera que durante la etapa de diseño no existe una amplia práctica de la medición del desempeño (Herrera et al., 2019), así como tampoco existen muchas investigaciones sobre el tema (Salvatierra et al., 2019). La necesidad de medir el desempeño durante otras fases es clave para garantizar la calidad y la consecución de los objetivos del proyecto. Esta necesidad se suma otra de medir los proyectos a través de un esquema holístico que permita integrar distintos tipos de indicadores siguiendo con las ideas de Kerzner.

2.3 Building Information Modeling – BIM

A modo de contexto, debemos entender claramente la definición de BIM. La ISO en la norma ISO 19650.1 define BIM como el “uso de una representación digital compartida de un activo construido para facilitar los procesos de diseño, construcción y operación, y proporcionar una base confiable para la toma de decisiones” (Organización Internacional de Normalización [ISO], 2018), Elmualim & Gilder (2014) definen BIM como el proceso de generación y gestión de datos de la edificación durante su ciclo de vida, Eastman et al. (2011) hablan de BIM como una tecnología de modelado y un conjunto de procesos para producir, comunicar y analizar modelos de construcción, y Deutsch (Citado en Meneses & Montoya, 2014) afirma: “B.I.M. es la combinación de tecnologías, personas y procesos que apoyan el desarrollo y el intercambio de información para la construcción de edificios y su operación” (p.398). Esto se alinea con la definición dada por Succar (2009) donde menciona que BIM “es un conjunto de políticas, procesos y tecnologías que generan una metodología para gestionar los datos esenciales del diseño de edificios y del proyecto en formato digital a lo largo del ciclo de vida del edificio”. Las definiciones anteriores no se limitan a hablar sobre de BIM como una tecnología detrás de la generación de información en un modelo geométrico tridimensional, sino que se entiende la idea detrás del concepto de BIM va más allá de tecnologías y piensa en ella como una nueva manera de organizar la industria de la construcción. Por lo tanto, se define BIM como una metodología para la gestión de la información del proyecto y

del activo, mediante la implementación de procesos y políticas, apalancados en una base tecnológica, principalmente modelos digitales tridimensionales de información, que permiten la integración, comunicación y colaboración de los participantes durante el ciclo de vida del proyecto.

2.3.1 Integración entre BIM y Project Management

Siendo una metodología de trabajo colaborativa, BIM también se aplica con éxito en la gestión de proyectos sirviendo como una herramienta adicional del Project Management, ofreciendo numerosos beneficios y mejoras en la eficiencia y calidad de estos (Rokoei, 2015). De esta manera, varios autores consideran BIM como un PMS - *Project Management System*, debido a la utilidad de sus herramientas y procesos para la planificación, seguimiento y control de proyectos de construcción (A. Chan et al., 2018; Fazli et al., 2014; Olugboyega et al., 2021).

Olugboyega et al. (2021); Olugboyega & Windapo (2020) y Won & Lee (2016) mencionan que BIM es una herramienta que ayuda a la consecución del éxito del proyecto (*Project Success*). Recordando lo dicho en una sección anterior, donde se indica que el éxito de un proyecto es una variable multidimensional que depende de la definición de cada *stakeholder* o participante del proyecto, los cuales definen criterios de éxito que son clave para medir el cumplimiento de los objetivos del proyecto, Olugboyega et al. (2021) indica que el éxito en proyectos basados en BIM se ve afectado por el impacto de la metodología BIM en los distintos procesos, lo que se muestra en los indicadores que definen el cumplimiento de las expectativas y objetivos del proyecto. El autor concluye que el éxito de un proyecto basado en BIM es igual a la medida de los efectos del desempeño en la aplicación de BIM en los criterios de éxito del proyecto, de tal manera que si hay una mayor extensión de la aplicación de BIM en el proyecto se obtendrán mejoras en los resultados de los criterios de éxito del proyecto (Olugboyega et al., 2021). Won & Lee (2016) poseen una visión similar de la influencia de BIM en el éxito del proyecto, por lo cual ellos desarrollaron una metodología llamada SLAM BIM para medir el éxito de un proyecto BIM. En este método, se determinan unos objetivos BIM alineados a los objetivos del proyecto, estos a su vez determinaran el establecimiento de unos Usos BIM particulares para el desarrollo del proyecto. Juntos, objetivos y usos BIM se usan para definir un conjunto de KPIs con el cual poder medir el impacto de BIM en el éxito del proyecto mediante la recolección y evaluación de datos. Ambos autores afirman que, al usar metodologías BIM para impactar los criterios de éxito de los proyectos, se pueden medir y, potencialmente, mejorar los resultados obtenidos para los objetivos definidos, aumentando así el éxito de proyecto.

2.3.2 Integración de BIM con la medición del desempeño en proyectos

Se han desarrollado varios estudios atendiendo a la integración de BIM en la medición del desempeño en proyectos, estos estudios han mostrado la relación que hay entre las distintas áreas del conocimiento definidas en el PMBOK 6ta edición y las capacidades BIM, asociando cada área de conocimiento con características y/o funcionalidades obtenidas mediante la aplicación de metodologías BIM (Fazli et al., 2014; Rokooei, 2015); de igual manera, Olugboyega & Windapo (2020) definen un modelo que integra los criterios que existen en sistemas para la medición de indicadores de desempeño del proyecto, como EFQM y CII entre otros, con capacidades e indicadores BIM, de tal manera que el modelo integrado proporciona una visión holística para la medición del desempeño. Por su parte, Khanzadi et al. (2020) aborda la discusión de la aplicación de BIM en la medición de indicadores de desempeño en proyectos durante la fase de construcción en Irán, en la cual se determinaron 5 indicadores clave de proyecto, y se relacionaron con 9 indicadores basados en BIM. Visto así es indiscutible el aporte existente al aplicar BIM como una herramienta que potencia las capacidades de la gestión de proyectos, sin embargo, si esta aplicación carece de visión y se entiende como una mera plataforma o soporte tecnológico sobre el cual se realizan parte de los procesos de producción del proyecto, se pierde gran parte del potencial que BIM puede ofrecer tanto a la gestión de proyectos como a la medición del desempeño en los proyectos (A. Chan et al., 2018). En los estudios descritos, los indicadores presentados son de resultados o KPO según la definición dada en la Tabla 1, esto representa un desaprovechamiento de las capacidades actuales de las tecnologías BIM para realizar un seguimiento de los proyectos, debido a que estas tecnologías se encuentran apalancadas por datos que permiten análisis con el objetivo de mejorar el desempeño del proyecto (Marzouk & Enaba, 2019). Pese a lo anterior, los estudios realizados permiten establecer una base sobre la cual relacionar los criterios de éxito de los proyectos y la medición del desempeño con las herramientas y capacidades BIM, las cuales se mencionarán a continuación:

2.3.3 Políticas, procesos y tecnologías BIM

Succar (2009) define un marco conceptual que permite entender BIM como una integración de múltiples dimensiones, más allá que un conjunto dispar de procesos y tecnologías. Dentro de su propuesta, plantea un modelo tri-axial que se encuentra compuesto por:

- Campos BIM (*BIM Field*)

- Etapas BIM (*BIM Stage*)
- Lentes BIM (*BIM Lenses*)

Dentro de los campos BIM, Succar (2009) establece tres campos de actividad interrelacionados, tecnología, procesos y políticas, los cuales tienen a su vez dos subcampos, actores y entregables. Estos campos tienen interacciones y traslapes entre sí, permitiendo la transferencia de conocimiento, así como también pueden compartir actores y entregables entre los distintos campos.

Políticas BIM

Succar define las políticas BIM como principios o reglas para guiar la toma de decisiones, desarrolladas por actores como entidades regulatorias y gubernamentales, investigadores, instituciones educativas y asociaciones industriales, que producen entregables tales como estándares, guías, regulaciones y buenas prácticas para salvaguardar los beneficios y minimizar las disputas entre los participantes de la industria AECO.

Enmarcado en este concepto de políticas BIM se incluye el estándar ISO 19650, el cual establece los conceptos y principios recomendados para el sector de la construcción en apoyo a la gestión y producción de información durante el ciclo de vida de los activos. Este marco técnico estándar que soporta la gestión de la información será clave para el desarrollo exitoso de un proyecto y la aplicación de metodologías BIM. En Colombia estas normativas ISO ya se encuentra normalizada por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas ICONTEC. De igual manera, asociaciones de industriales como la Cámara Colombiana de Construcción CAMACOL han elaborado un esfuerzo por divulgar y comunicar estándares BIM para la industria, llamados BIM KIT (BIM Forum Colombia, 2020). A continuación, se realiza una explicación y profundización del marco técnico definido en la ISO 19650 para la gestión de información.

La ISO 19650: Organización y digitalización de la información sobre edificios y obras de ingeniería civil, incluido el modelado de información de construcción (BIM), se compone de tres partes, cada una de las cuales se centra en un aspecto diferente de la gestión de la información BIM a lo largo del ciclo de vida de un activo de construcción. La Parte 1 establece los conceptos y principios generales de la gestión de la información BIM, esta parte brinda recomendaciones para definir un marco de gestión de información que incluya el intercambio, registro y control de versiones. Esta parte es aplicable a todo el ciclo de vida de cualquier activo construido. La Parte 2

se enfoca en la fase de entrega del activo, detallando los requisitos para la gestión de la información BIM durante esta fase, desde la preparación del proyecto hasta la entrega de los datos de activos. Finalmente, la Parte 3 establece los requisitos y lineamientos para la gestión de la información en la fase de operación y mantenimiento del activo, incluyendo la definición de los roles y responsabilidades de los actores involucrados en el proceso de gestión de información. La Tabla 2 muestra los documentos de gestión de la información BIM descritos en el estándar ISO 19650 junto con una breve descripción.

Tabla 2

Documentos de gestión descritos en la serie ISO 19650

Sigla	Nombre documento en ISO 19650 (2018)	Nombre documento en NTC-ISO 19650 (2021)	Descripción
EIR	Exchange Information Requirements	Requerimientos de intercambio de información.	Documento que define los requerimientos BIM de información y entrega para un proyecto de construcción. Estos requerimientos son definidos por la parte que designa o contrata.
AIR	Asset Information Requirements	Requerimientos de información del activo.	Documento que define los requerimientos BIM de información del activo.
OIR	Organizational Information Requirements	Requerimientos de información de la organización.	Documento que define los requerimientos de información necesarios para cumplir con los objetivos de la organización.
PIR	Project Information Requirements	Requerimientos de información del proyecto.	Documento que define los requerimientos de información necesarios para cumplir con los objetivos del proyecto.
BEP	BIM Execution Plan	Plan de ejecución BIM	Documento que describe el plan detallado del equipo de entregas para implementar y gestionar el BIM según los requerimientos de información definidos.

PRE-BEP	BIM Execution Plan Precontractual	Plan de ejecución BIM precontractual	Documento que describe el plan general del equipo de entregas para implementar y gestionar el BIM según los requerimientos de información definidos previo a la contratación.
MDR	Responsibility Matrix	Matriz detallada de responsabilidades	Matriz de gestión BIM en donde se definen y asignan las responsabilidades para la producción de información BIM, incluidos los modelos según el nivel de información necesaria requerida.
MRA	High-Level Responsibility Matrix	Matriz de responsabilidades de alto nivel	Matriz de gestión BIM en donde se establece de manera clara y detallada las responsabilidades y roles de cada uno de los miembros del equipo de proyecto que intervienen en el proceso BIM, desde la fase de diseño hasta la construcción y mantenimiento del activo.
PDM	BIM Mobilization Plan	Plan de movilización	Documento de gestión que busca que el equipo de entregas prepare y asegure la disponibilidad de los recursos humanos y técnicos necesarios para el inicio de las actividades BIM del proyecto.
MIDP	Master Information Delivery Plan	Plan o programa Maestro de Entrega de Información	Matriz de gestión que establece cómo se entregará y gestionará la información del modelo BIM durante todo el ciclo de vida del proyecto.
TIDP	Task Information Delivery Plan	Plan o programa de entrega de información de tareas	Matriz de gestión que establece cómo se entregará y gestionará la información del modelo BIM para cada tarea específica en el proyecto

Documentos de requerimiento de información BIM

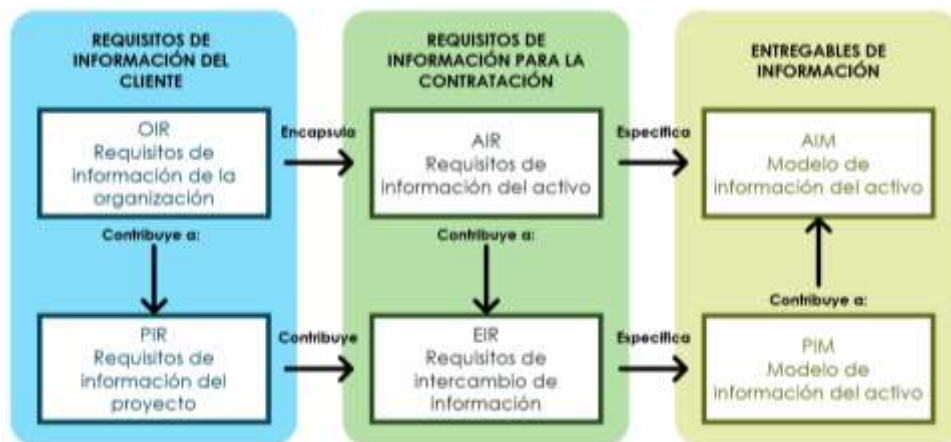
En la sección 5 de la NTC-ISO 19650.1 se definen los documentos BIM que establecen los requerimientos de información y los modelos de información resultantes de estos, los cuales se

muestran en la Figura 2. A continuación, se amplía la explicación de los cuatro documentos de requerimientos BIM:

- *Requerimientos de información de la organización (OIR)*: describe la información necesaria para cumplir con los objetivos estratégicos de alto nivel de una organización con relación a un proyecto o activo construido. Se enfoca en los requisitos de información que deben ser cumplidos para lograr una gestión y operación eficiente del activo una vez construido, por lo que la información definida en este documento puede ser requerida tanto durante el proyecto (diseño y construcción) como durante la operación y mantenimiento del activo.
- *Requerimientos de información de del proyecto (PIR)*: describe la información necesaria para responder o informar objetivos estratégicos de alto nivel dentro de la parte que designa en relación con un proyecto en particular.
- *Requerimientos de información de los activos (AIR)*: establece los requisitos de información necesarios para el funcionamiento y mantenimiento del activo construido después de la entrega del proyecto. El AIR establece aspectos administrativos, comerciales y técnicos del activo para la operación y/o mantenimiento del proyecto.
- *Requerimientos de intercambio de información (EIR)*: establece los requisitos de información que la organización requiere durante todo el ciclo de vida del proyecto. El EIR establece los aspectos administrativos, comerciales y técnicos incluyendo estándares, métodos y procedimientos de producción de información del proyecto.

Figura 2

Documentos de requerimientos de información BIM y modelos de información



Elaboración propia basada en ISO 19650.1

Documentos respuesta a los requerimientos de información BIM

Tanto el Plan de Ejecución BIM precontractual (Pre-BEP) como el Plan de Ejecución BIM de desarrollo (BEP) son documentos que dan respuesta a los requerimientos de intercambio de información definidos en el EIR; el Pre-BEP es aportado por cada proponente durante la etapa de presentación de ofertas del proceso licitatorio. En cambio, el BEP es presentado por el contratista una vez se ha formalizado la adjudicación y definido el alcance puntual del proyecto. El BEP describe de manera detallada las pautas, estándares, métodos y procedimientos necesarios para la gestión del proyecto BIM, asegurando que se cumplan los objetivos y requerimientos definidos por la parte contratante.

Adicionalmente, es necesaria la creación de la *Matriz de Responsabilidades de Alto Nivel (MRA)*, la cual identifica a los actores/participantes del proyecto, sus responsabilidades en términos de alcance, actividades y entregables en cada fase e hito. Este documento de gestión se basa en la NTC-ISO 19650-1;2021 y forma parte del BEP. De igual forma, los documentos que deben ser diligenciados por el contratista incluyen:

- *Plan de Movilización (PDM)*, que comprueba y revisa que todos los recursos (humanos y técnicos) estén listos para ser empleados en el proyecto antes de iniciar las actividades.
- *Matriz Detallada de Responsabilidades (MDR)*, que define el nivel de información necesaria (nivel de información, nivel alfanumérico, nivel de información vinculada, etc) requerida para cada elemento a modelar en cada hito de entrega, junto con el responsable.
- *Plan Maestro de Entrega de Información (MIDP)* y el *Plan de Entrega de Información de Tareas (TIDP)*, los cuales se utilizan para administrar la entrega de información en el cierre de cada hito durante el ciclo de vida del proyecto, especificando cada uno de los entregables con su nombre, fecha y responsable de entrega. El contratista debe desarrollar el MIDP en colaboración con los equipos de tareas para monitorear las entregas de información según lo establecido en la NTC-ISO 19650-2;2021.

Procesos BIM

Los procesos BIM para Succar (2009) son un conjunto específico de actividades con insumos y productos, un inicio y un fin claramente especificados con un objetivo determinado; por lo cual, es equiparable referirse a procesos BIM como Usos BIM, un Uso BIM se define como: “Un método de aplicar BIM durante el ciclo de vida de un activo para lograr uno o más objetivos específicos” (Kreider & Messner, 2013); este concepto surge de las investigaciones realizadas por la

Universidad Estatal de Pensilvania (Penn State), en donde se establece un listado de 24 ~ 26 Usos BIM (depende de la versión) siguiendo los lineamientos del *BIM Project Execution Planning Guide* (The Computer Integrated Construction Research Program, 2010). Varios autores han mencionado los Usos BIM con otros términos tales como “*aplicaciones BIM*” (Azhar et al., 2012), “*herramientas BIM*” (Fazli et al., 2014), “*Aspectos técnicos BIM*” (Rokooei, 2015), “*capacidades BIM*” (Wang & Chen, 2023). Los usos se pueden clasificar según cuál es su propósito, o, dicho de otra manera, porque se implementa este Uso BIM a través del ciclo de vida del activo (Kreider & Messner, 2013), como lo muestra la Tabla 3.

Dado que un Uso BIM es la aplicación de estas metodologías al cumplimiento de algún objetivo del proyecto, la definición que estos tengan, su propósito y objetivo a cumplir son claves para el desarrollo exitoso del proyecto y son la base que fundamenta sistemas de medición basados en BIM como el SLAM BIM (Won & Lee, 2016). Es importante aclarar que, si bien se han definido un conjunto de Usos BIM de manera “estándar” debido a la influencia que ha tenido la obra de la Penn State, es posible establecer Usos BIM diferentes a ellos, en tanto se basen en la aplicación de metodologías BIM al desarrollo de un proyecto. Por lo anterior, Kreider & Messner (2013) definieron unas características que todo Uso BIM contiene, las cuales se muestran en la Tabla 4. Estas características determinan donde se aplicará BIM, en qué momento del ciclo de vida del activo será aplicado, quienes son los responsables de aplicar el Uso BIM, y cuál será el nivel de detalle con respecto a la cantidad de información que será requerida para realizar dicho uso:

- Elemento del activo: hace referencia sobre cual elemento del activo será ejecutado un Uso BIM, dado que estos pueden aplicarse tanto al proyecto integral (ejemplo, la estimación de costos se puede realizar en todos los elementos del activo) como a un conjunto de partes específicos (ejemplo, el análisis estructural solo aplica para los elementos con responsabilidad estructural del activo, ignorando otros como cerramientos o acabados), e incluso a un único elemento (ejemplo, la fabricación de productos se puede centrar exclusivamente en un único elemento que deba ser desarrollado para ese proyecto específico, como un equipo especial o un mobiliario de diseñador).

Tabla 3

Usos BIM en la literatura agrupados según su propósito						
Propósitos Usos BIM	Azhar (2012)	Penn State (2013)	Fazli (2014)	Rokoool (2015)	Borrmann (2018)	Wang (2023)
Analisis	Clashes Análisis Estimación tiempo Constructibilidad	Coordinación Análisis* Estimación tiempo	Clashes Análisis Estimación tiempo	Clashes Análisis Estimación tiempo Constructibilidad Integración	Coordinación Análisis Estimación tiempo	Clashes
	Sostenibilidad				Simulación progreso costos	Sostenibilidad Gestión seguridad
Comunicar	Logística de sitio	Logística de sitio Revisión de diseños Sistemas constructivos temporales				
	Visualización			Colaboración Comunicación	Gestión de incidencias visualización técnica	Construcción off site
Ejecutar	Gestión del edificio	Operación y mantenimiento*			Monitoreo progreso Control de pagos Operación y mantenimiento	
				Modelos basados en elementos		Modularización
Generar	Opciones de diseño	Diseño técnico Fabricación de productos Modelo récord			Desarrollo planimetría	
	Estimación costos Cantidades	Estimación costos Condiciones existentes	Estimación costos	Estimación costos Cantidades de obra	Estimación costos Cantidades de obra	Gestión costos

Nota: los usos BIM marcados al final con un (*) indican que hay varios usos relacionados que se agruparon bajo el mismo nombre, el Penn State lista 25 usos BIM.

Tabla 4

Características de los Usos BIM

Características	Descripción
Elemento del activo	El sistema del activo en el que se implementará el Uso BIM
Fase del Activo	El punto en el ciclo de vida del activo en el que se implementará el Uso de BIM
Disciplina	La parte por la cual se implementará el Uso BIM
Nivel de Desarrollo (LOD)	El grado de granularidad al cual se implementará el Uso BIM

Tabla adaptada de Kreider & Messner (2013)

- Fase del activo: hace referencia al momento dentro del ciclo de vida del activo durante el cual se deberá implementar el Uso BIM definido. Los Usos BIM pueden aplicarse a más de una fase del ciclo de vida (ejemplo, la coordinación de especialidades técnicas puede desarrollarse durante las etapas de diseño y también durante las etapas de construcción), debido a lo cual es relevante no solo determinar la fase, sino además el nivel de desarrollo requerido en ese momento particular, concepto conocido como LoIN (*Level of Information Need*), el cual se desarrollará más adelante.
- Disciplina: hace referencia a la parte responsable de ejecutar el Uso BIM en el proyecto o activo. Esta definición aclara que no todos los participantes del proyecto actúan en todos los Usos BIM, y que es posible que varios participantes tengan responsabilidades sobre un mismo Uso BIM. Establecer claramente los distintos roles y responsabilidades es clave para disminuir ambigüedades y desarrollar correctamente los Usos BIM.
- Nivel de Desarrollo: El Nivel de Desarrollo o LOD por sus siglas en inglés (*Level Of Development*) es un concepto que aparece en el BIMForum USA, y sirve para describir y clasificar el nivel de detalle y granularidad de la información que contiene un elemento que será usado y/o es producto de un Uso BIM determinado.

Los Usos BIM, en tanto representan acciones sobre los procesos de un proyecto, son fundamentales para determinar el alcance de la aplicación de esta metodología, por lo cual se convierten en la base sobre la que se realizará la medición de desempeño de los proyectos.

2.3.4 Datos e información de los modelos BIM

Para poder usar los modelos BIM como fuente de información para la medición del desempeño es necesario entender que información puede aportar los modelos y procesos BIM. La metodología BIM utiliza modelos de información los cuales son una representación digital rica en datos de un proyecto, activo o edificio. Estos modelos digitales contienen la información geométrica tridimensional de los componentes constructivos, así como también contiene objetos abstractos y no-físicos como espacios, zonas o niveles (Eastman et al., 2011). Si bien esta es una de las características principales de los modelos BIM, es importante notar que por sí sola, la geometría 3D es insuficiente para proveer una representación digital idónea de un activo o proyecto (Borrmann et al., 2018), por lo tanto, es necesario resaltar que una de las principales características de los modelos de información BIM es su capacidad de transmitir semántica, esto indica que todos los objetos poseen un significado intrínseco, es decir, son ejemplares de tipos de objetos tales como una pared, columna, ventana, puerta, entre otros. Estos objetos combinan una representación geométrica 3D parametrizada con propiedades descriptivas adicionales y sus relaciones con otros elementos en el modelo (Borrmann et al., 2018). Por lo tanto, el modelo BIM se presenta como un conjunto de objetos digitales que contienen información geométrica y propiedades, estos objetos a su vez presentan múltiples relaciones entre ellos, las cuales están restringidas a través de parámetros que las definen.

Tipos de información

Según se indica en el PlanBIM Chile “los Tipos de Información, o TDI, son quince grupos de datos que pueden estar contenidos en las entidades de los modelos. Estos datos están organizados según la utilización que se le puede dar a la información durante el ciclo de vida del proyecto.” (Planbim, 2019). Estos tipos de información se basan en la guía BIM de Veterans Affairs de 2010, la cual menciona los mismos tipos de información en una matriz de objetos y elementos; los tipos de información se explican en la Tabla 5.

Estos datos estarán contenidos en los objetos y los modelos BIM, y son fundamentales para el desarrollo de los procesos y Usos BIM. Por lo tanto, PlanBIM Chile presenta también una matriz donde se relacionan los tipos de información aplicables a cada uso BIM.

Tabla 5

Tipos de información

Código	Nombre PlanBIM Chile	Nombre Veterans Affairs	Descripción
TDI_A	Información general del proyecto	Building program & project meta data	Información básica de identificación del proyecto como el tipo de edificio o infraestructura.
TDI_B	Propiedades físicas y geométricas	Physical Properties of BIM Objects & Elements	Información de las características y propiedades físicas de las entidades tales como anchos, largos, altos, área, volumen, masa, etc.
TDI_C	Propiedades geográficas y de localización	GeoSpatial and Spatial Location of Objects & Elements	Información de las propiedades de ubicación espacial y geográficas de las entidades, tal como la latitud y longitud para la georreferencia del proyecto, el número y nombre de piso, el número y nombre del espacio o zona.
TDI_D	Requerimientos para el fabricante y/o constructor	Manufacturer Specific Information Requirements	Información específica para la fabricación y/o construcción, como el tipo de elemento (muro, pilar, puerta, etc.), su materialidad, nombre de sus componentes - en caso de existir-, identificación del producto, estructura de desglose de trabajo (WBS), entre otros.
TDI_E	Especificaciones técnicas	Specifications	Información de la especificación técnica de la entidad, como peso de transporte, nivel de ruido, etc.
TDI_F	Requerimientos y estimación de costos	Estimating, TCO, and Value Engineering Requirements	Información básica para la estimación del costo total del activo, como, por ejemplo, el costo unitario referencial, costo base de ensamblaje, costo de transporte, entre otros.
TDI_G	Requerimientos energéticos	Energy Analysis Requirements	Información de características energéticas de las entidades, como requerimientos de humedad, valor U, consumo de servicios, low E glazing, entre otros.
TDI_H	Estándar sostenible	Sustainable Material LEED or Other Requirements	Información sobre condiciones de sustentabilidad, requerimientos de calidad de iluminación, especificaciones de materiales sustentables y contenido reciclado, entre otros

TDI_I	Condiciones de sitio y medioambientales	Project Environmental & Site Conditions	Es información de las características generales del sitio y su entorno tales como, condiciones sísmicas, uso del terreno, de suelo y niveles de riesgo a las personas, entre otras.
TDI_J	Validación de cumplimiento de programa	Program/Space Compliance or Validation	Información clave para realizar una validación del cumplimiento del programa funcional del proyecto, como áreas planificadas, requisitos de áreas vidriadas, volumetría espacial y servicios requeridos, entre otros.
TDI_K	Cumplimiento normativo	Code Compliance/ Occupant Safety Requirements	Información que permita revisar el cumplimiento normativo y los requerimientos de seguridad de los ocupantes del proyecto
TDI_L	Requerimientos de fases, secuencia de tiempo	Phases Time Sequencing & Schedule Requirements	Información que permita revisar fases, secuencias de tiempo y planificación de áreas o partes de un proyecto
TDI_M	Logística y secuencia de construcción	Construction Logistics & Sequencing	Información clave para revisar la logística de la construcción y su secuencia, como, por ejemplo, ID del material e ID de instalación, número de serie del componente instalado, entre otros.
TDI_N	Entrega para la operación	Building Commissioning Requirements	Información clave para apoyar el funcionamiento de la entrega de la construcción como, por ejemplo, nombre de las empresas o compañías participantes del proyecto, sus contactos, nombre de la disciplina y áreas de trabajo, entre otras.
TDI_O	Gestión de activos	Facilities/Asset Management	Información para la gestión del activo como, tipos de productos, tipos de repuestos, fechas de inicio y fin de garantías, entre otros.

Nivel de información necesaria (LOIN)

El concepto de niveles de información surge de la necesidad de establecer la cantidad de información, tanto gráfica como no gráfica, que deben contener los objetos BIM. Así, aparece el concepto de “*Level Of Development LOD*” (Nivel de definición/desarrollo) en el AIA, *American Institute of Architects*, el cual posteriormente pasaría a estandarizarse bajo la organización BIMForum USA, los cuales mantienen la documentación, cuyo “LEVEL OF DEVELOPMENT (LOD) SPECIFICATION 2023” es el último publicado a la fecha. El LOD es la base de la propuesta de Niveles de Información establecido en el PlanBIM Chile, el cual se define como “los

grados de profundidad que puede tener tanto la información geométrica como no geométrica contenida en las entidades de los modelos BIM” (Planbim, 2019). En la Tabla 6 se muestra una comparativa de distintos estándares para los niveles de información en los elementos.

Tabla 6

Comparativa entre estándares de Niveles de Información de elementos del modelo BIM

LOD (BIMForum USA)	LOD (NBS UK)	NDI (PlanBIM Chile)	Descripción
100	***	NDI-1	Información inicial estimativa y/o conceptual, indicada de manera representativa, acerca de las dimensiones y localización de los elementos generales.
200	2	NDI-2	Información básica y genérica del tamaño, forma, localización y cantidad de los elementos del modelo.
300	3	NDI-3	Información detallada del tamaño, forma, localización y cantidad de los elementos del modelo, precisa y útil para procesos de coordinación.
350	4	NDI-4	Información detallada y coordinada del tamaño, forma, localización e interacción de los elementos con los demás sistemas constructivos.
400	5	NDI-5	Información precisa y detallada, requerida para la fabricación y la instalación o construcción de los elementos del modelo.
500	6	NDI-6	Información exacta de los elementos construidos a través de una combinación de observación, verificación en campo o interpolación de datos.

El concepto de nivel de desarrollo (LOD) de la información se compone, a su vez, de dos niveles de información, el LoD (Nivel de detalle gráfico) y el LOI (Nivel de información) (BIM FORUM USA, 2023), la cual describe igualmente en una escala que tan detallada es la granularidad de la información contenida en un elemento BIM. Así, un elemento que se define como LOD 300 cumple con una información gráfica (LoD) precisa en cuanto a dimensiones y forma, y contiene información (LOI) como materiales, que permite usar ese elemento en procesos de coordinación y representación.

Sin embargo, el concepto de LOD se enfoca principalmente en temas de geometría y detalle gráfico, disminuyendo la importancia de la información (Plan BIM Perú, 2023), por lo tanto, la

ISO contempla el concepto de *Nivel de Información Necesaria* (LOIN por sus siglas en inglés), la cual aborda un enfoque parcialmente diferente, la cual considera la información que se necesita por parte de un actor del proyecto, para un intercambio de información en un momento (hito) determinado (UNE, 2021). De esta forma, los elementos poseen un crecimiento constante de la información según se avanza en las distintas fases del proyecto, tanto de manera geométrica y gráfica, como de datos e información del elemento. El nivel de información necesaria implica una mayor implicación de todas las partes interesadas en el proyecto, tanto cliente como consultores, debido a que requiere definir claramente que información es necesaria para un momento determinado, evitando así la sobreproducción o, por el contrario, la falta de información, de un elemento y/o entregable para un determinado hito. Así, el LOIN contempla unos prerrequisitos y tres tipos de información, descritos en la Figura 3, los cuales buscan para un objeto específico (que), en un momento dado (cuando), desarrollado por un responsable particular (quien), con un propósito claro (porque) definir claramente la granularidad de la información (como).

Figura 3

Diagrama de relación sobre el nivel de necesidad de información



Elaboración propia basada en UNE EN 17412-1

El LOIN es un concepto que, por sí mismo, no contiene escala, debido a que está compuesto por varios tipos de información que pueden tener distintos niveles de detalle según se requiera en el hito determinado, y de igual manera se debe evitar hacer uso de alguna escala para no caer en simplificar el nivel de información necesaria según lo describe la propia UNE EN 17412-1 (UNE, 2021). Por lo tanto, el LOIN forma parte de los requerimientos de intercambio de información EIR.

En distintos estándares BIM como el PlanBIM Chile y el estándar BIM de Perú se plantea una matriz de nivel de información necesaria, de tal manera que en las columnas se organiza un conjunto de hitos o momentos del proyecto determinados, y en las filas los objetos del modelo, para definir el nivel de desarrollo de la información para el objeto según el momento determinado.

2.3.5 Integración entre BIM y Business Intelligence

Es necesario definir el concepto de *Business Intelligence BI* (Inteligencia empresarial), la cual es un conjunto de estrategias, tecnologías y herramientas que se utilizan para recolectar, analizar, integrar y presentar datos e información relevante que ayuda en la toma de decisiones empresariales. El objetivo principal de la Inteligencia Empresarial es convertir datos brutos en información significativa y útil para permitir a las organizaciones tomar decisiones informadas y estratégicas. (Rioja, 2022) definen BI como "un término amplio que abarca una amplia gama de aplicaciones y tecnologías para reunir, almacenar, analizar y proporcionar acceso a datos con el propósito de ayudar a los usuarios de negocios a tomar mejores decisiones". El proceso de BI implica la recopilación de datos desde diversas fuentes, su posterior limpieza, transformación y almacenamiento en un almacén de datos (Data Warehouse) o en una base de datos específicamente diseñada para facilitar el análisis. Luego, estos datos se procesan utilizando herramientas y técnicas de análisis para generar informes, *dashboards* interactivos, gráficos y otras representaciones visuales que ayuden a los usuarios a comprender patrones, tendencias y relaciones dentro de la información.

Integración con tecnologías BIM

Debido a que los modelos BIM son una sumatoria de objetos digitales que tienen representados elementos como "puertas" o "columnas", esto indica que son objetos que poseen propiedades semánticas debido a los datos que contienen (Borrmann et al., 2018; Succar, 2009). Estos datos que se encuentran al interior de los modelos BIM pueden ser de varios tipos, datos estructurados (ej. Archivos CSV), datos semiestructurados (ej. Archivos XML), o datos no estructurados (ej. Imágenes) (Succar, 2009). Dada la cantidad, diversidad y complejidad de los datos involucrados en la gestión de proyectos de construcción en general, y la necesidad constante de la gerencia de información, el análisis rápido y confiable de datos se convierte en un proceso difícil (Rodriguez et al., 2022). Y pese a que los modelos BIM son contenedores de datos altamente estructurados, la extracción de información de los modelos BIM es una tarea engorrosa y está sujeta a muchos

errores de interpretación, especialmente cuando los datos no están bien representados (Kadcha et al., 2022). Por lo tanto, el objetivo es poder extraer los datos necesarios del modelo por parte del usuario y presentarlos en el formato adecuado (Kang & Choi, 2015). Las herramientas BIM pueden extraer la información al interior de los modelos de información y compartirla en formatos tales como hojas de cálculo, archivos CSV o archivos XML, todos estos legibles para las herramientas de BI (Kadcha et al., 2022; Rodrigues et al., 2022) permitiendo así integrar los datos sin procesar (Raw data) de los modelos BIM en una aplicación de BI y presentarlo para la toma de decisiones. De esta forma se concluye que esta metodología proporciona un análisis integrado (BIM con BI), confiable y en tiempo real de los datos, lo cual es esencial para la gestión sostenible de la construcción y la toma de decisiones (Rodrigues et al., 2022).

2.4 Conclusiones del marco teórico

A continuación, se presentan las conclusiones del marco teórico en la Tabla 7; estas se organizan en forma de tabla y de manera secuenciada debido a que serán los lineamientos que servirán de base para el desarrollo de las siguientes partes de la investigación, por lo que serán referenciadas de manera constante a lo largo del documento según sea necesario.

Tabla 7

<i>Conclusiones del marco teórico</i>		
Numero	Conclusión	Fuentes
Gestión de proyectos de construcción		
C01	El enfoque de gestión de proyectos más ampliamente utilizado para los proyectos de construcción, incluyendo los proyectos de vivienda de interés social (VIS), es el enfoque "predictivo" o tradicional.	
C02	La aplicación de otros enfoques de gestión de proyectos, como SCRUM o PRINCE2, tienen un uso incipiente en la industria de la construcción en general.	
C03	Se recomiendan los modelos híbridos que permitan enlazar enfoques de gestión tradicionales junto a métodos ágiles para adaptarlos a la industria de la construcción.	

C04 El éxito de un proyecto tiene muchas variables, además de los tradicionales costes, tiempos, calidad (triángulo de hierro), tales como aspectos no financieros, satisfacción del cliente, desempeño ambiental, comunicación entre los miembros del proyecto, entre otros. Estas variables que definen el éxito de un proyecto se llaman "criterios de éxito"

Medición del desempeño en el proyecto y en procesos

C05 El éxito del proyecto depende del cumplimiento de los objetivos definidos por los criterios de éxito. Para proyectos basados en BIM es igual a la medida de los efectos del desempeño en la aplicación de BIM en los criterios de éxito del proyecto

C06 Los sistemas de medición del desempeño usan indicadores que se pueden clasificar de dos tipos, KPI (Indicadores que miden el desempeño actual y brindan oportunidad de cambio) y KPO (Indicadores que miden el resultado y verifican el cumplimiento de los objetivos).

C07 Los principales sistemas de medición están basados en KPOs, los cuales no permiten controlar el estado actual del proyecto ni realizar acciones correctivas para lograr el cumplimiento de los objetivos trazados.

C08 Se recomienda el uso conjunto de indicadores de resultados KPOs e indicadores predictivos KPIs para tener un esquema holístico y una visión integral del estado del proyecto.

C09 El conjunto de indicadores seleccionados debe aportar valor y ser de utilidad para el proyecto y sus participantes, no se debe medir todo lo medible, se debe medir lo necesario para asegurar el cumplimiento de los criterios de éxito.

C10 Es necesario controlar el número de indicadores para evitar malgastar recursos en la medición, así como también debe automatizarse en gran medida el proceso de recolección de datos y cálculo de indicadores.

C11 No existe una práctica extensiva de la medición del desempeño en la etapa de diseño, debido a que la medición se suele concentrar en el proceso de construcción o directamente en los resultados finales del proyecto. Es necesario controlar los procesos en cada etapa para garantizar el cumplimiento de los objetivos.

- C12 La aplicación de BIM potencia las capacidades en la gestión de proyectos y puede considerarse como un "Project Management System" debido a la utilidad de sus herramientas y procesos para la planificación, seguimiento y control de proyectos de construcción.
- C13 Las mediciones del desempeño actuales basadas en BIM se orientan a indicadores de resultados KPOs, desaprovechando las capacidades que ofrece BIM para el control de los procesos del proyecto.
- C14 Los procesos BIM son todas aquellas actividades, con un inicio, final, insumos y entregables claramente definidos, realizados por el equipo responsable del proyecto. Se consideran equivalentes a los Usos BIM. La medición de un Uso BIM sirve como base para la medición de los procesos de diseño.
- C15 Las políticas BIM son un conjunto de lineamientos que definen la gestión de la información de un proyecto basado en BIM y la toma de decisión. Esto incluye:
Objetivos de la organización
Requerimientos y estándar de información
Fases e hitos del proyecto
Responsabilidades, Actividades y Entregables
Usos BIM (procesos) definidos para el proyecto
Selección de herramientas digitales (Software) e infraestructura tecnológica
Protocolo para la creación de modelos BIM
Estrategia de comunicación y colaboración.
Indicadores y proceso de medición
- C16 La tecnología BIM hace referencia tanto a la infraestructura tecnológica como hardware, servidores y redes, como a las herramientas de software para la creación de modelos de información 3D, y también los servicios y plataformas Cloud como el CDE.
- C17 Los modelos BIM contienen principalmente dos tipos de datos, datos geométricos y datos de propiedades de los elementos. Dentro de la información contenida en el modelo se encuentra:
Clasificación de los elementos (WBS)
Dimensiones y cantidades de elementos
Materiales de elementos
Propiedades de identificación de elementos
Ubicación y posicionamiento de elementos
Propiedades estructurales, energéticos, consumo, comportamiento, presiones y demás.

C18 En la medida de que los modelos contengan información desarrollada con mayor precisión, las medidas de los indicadores serán más precisas. A mayor nivel de información, mayor precisión en los indicadores, es una relación directamente proporcional.

C19 Los modelos BIM irán aumentando su nivel de desarrollo (LOD) según avanza el tiempo, cumpliendo con lo requerido en el LoIN definido en el estándar de información.

Business Intelligence

C20 La integración entre BIM y BI proporciona un análisis integrado y confiable de datos en tiempo real, esencial para la gestión sostenible de la construcción y la toma de decisiones empresariales en ese campo

C21 Los modelos BIM contienen datos altamente estructurados que representan elementos de construcción y pueden contener datos estructurados, semiestructurados y no estructurados.

C22 la información de los modelos BIM se conecta a herramientas de BI mediante formatos legibles como hojas de cálculo, archivos CSV o XML.

::

3. Metodología

Para el desarrollo del diseño o metodología de investigación se tomó como referencia los postulados propuestos por Creswell y Hernández Sampieri, de esta manera se plantea un diseño de investigación de métodos mixtos. Los métodos mixtos de investigación implican la recolección y análisis de información tanto cuantitativa como cualitativa, con el fin de obtener las ventajas del uso de ambos enfoques y tener una visión más holística y completa de problema de investigación o fenómeno a observar (Creswell, 2014; Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018).

La decisión de usar un diseño de métodos mixtos se basó principalmente en la complejidad del problema central de estudio, el análisis y la medición de indicadores de desempeño debido a que los procesos de desarrollo de proyectos no solo tienen aspectos de orden económico-financiero, sino que cuentan con otras variables para la medición en otras facetas que aportan al concepto de “éxito” en un proyecto de construcción (Beatham et al., 2004; A. P. C. Chan & Chan, 2004). El recurso humano es fundamental para el desarrollo de los procesos de producción de proyectos residenciales, razón por la cual es de gran importancia recolectar y analizar la información respecto a las opiniones, experiencias y reflexiones de las personas involucradas en estos procesos, así como entender la perspectiva de los líderes y gerentes y su visión organizacional y de negocio. Sumado a esto, el componente tecnológico producto de la introducción de metodologías BIM al proceso de medición del desempeño a través de indicadores plantea el análisis desde una perspectiva técnica y funcional, que añade una capa de complejidad adicional que debe ser atendida por el diseño de investigación seleccionado.

Dicho lo anterior, es evidente que plantear esta investigación bajo un enfoque monometódico sería insuficiente para abarcar tal complejidad (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018) en consecuencia, se ha planteado un enfoque descrito por Creswell (2014) como *embedded mixed methods desing* (diseño de métodos mixtos incrustado), considerado a su vez por Hernández-

Sampieri & Mendoza (2018) como un Diseño incrustado concurrente de modelo dominante (DIAC); son el mismo diseño y poseen las siguientes características:

- Recolección simultanea de datos cualitativos y cuantitativos (concurrente).
- Un enfoque es predominante, siendo el otro enfoque “incrustado” en el predominante.
- Los datos recolectados de ambos enfoques son mezclados en la fase de análisis.
- Al recoger los datos de manera simultánea se genera una visión más completa y holística del problema o fenómeno.
- El mayor reto consiste en la transformación de los datos para su análisis conjunto.

La investigación planteada posee un diseño en tres fases claramente diferenciadas como se muestra en la Figura 4.

Fase 0: Se realizó una revisión integral de literatura para construir un marco teórico sólido sobre la gestión de proyectos (Project Management) y los indicadores de desempeño usados en el desarrollo de diseño para los proyectos de construcción, así como los requerimientos de información para su análisis y levantamiento usando tecnologías BIM.

Fase 1: Se validaron los resultados de la revisión de literatura a través de las percepciones de los líderes de proyectos, mediante el desarrollo de entrevistas estructuradas. Esta primera fase de investigación se basó en el método mixto descrito anteriormente, en el cual la recopilación de datos e información de carácter cuantitativo y cualitativo se realizan de manera simultánea siendo predominante, en este caso, el enfoque cuantitativo para la búsqueda e identificación de indicadores y el uso del enfoque cualitativo buscó complementar y contextualizar los resultados mediante la realización de un análisis conjunto de ambos datos, metainferencias, las cuales: “integran las inferencias y conclusiones de los datos y resultados cuantitativos y cualitativos realizadas de manera independiente” (Hernandez Sampieri et al., 2010, p.559).

Fase 2: Se realizó la propuesta para la medición de indicadores de desempeño en los procesos de diseño de proyectos residenciales, la cual está basada en las metainferencias desarrolladas a partir del resultado de la revisión de literatura, el levantamiento de información y datos, y las percepciones cualitativas de distintos actores de los procesos. En esta segunda fase se realizó, de manera paralela a la formulación de la estrategia, el desarrollo de una solución tecnológica que

permita la visualización y análisis de los datos producto de las mediciones de indicadores, para determinar su utilidad e impacto en la productividad y éxito de proyectos residenciales.

Figura 4
Diseño de la investigación por fases



3.1 Revisión de literatura

La revisión de literatura desarrollada para esta investigación tiene los siguientes objetivos:

1. Proporcionar la base teórica y contextual durante la Fase 0 que sirve para el desarrollo posterior de la investigación.
2. Identificar indicadores que permitan medir el desempeño en los procesos de diseño de vivienda usando metodologías BIM.
3. Determinar cuáles son los procesos de diseño que son objeto de una medición del desempeño.

Con este fin, se realizó una consulta en las bases de datos listadas en la Tabla 8, usando los siguientes términos de búsqueda y/o *keywords*: “Key Performance Indicators”, “Design Process”, “Design Performance”, “Construction Performance”, “Construction Performance Measurement”, “Building Project Performance”, “Construction Project Management”, “BIM”, “BIM Data Analysis”, “BIM Collaboration”, “BIM Implementation”. En primera instancia se seleccionaron 169 artículos, libros y documentos que se encuentran dentro de las temáticas generales de medición de indicadores, desempeño, metodologías BIM, gestión de proyectos de construcción y procesos de diseño.

Tabla 8

Bases de datos consultadas para la revisión de literatura

Nombre	Cantidad de documentos
Science Direct (Elsevier)	50
Google Scholar	43
Libros	26
Repositorios Institucionales	21
Emerald Insight	12
Taylor & Francis	7
Springer International	7
ASCE	3
Total	169

Posteriormente, se filtraron los documentos que cumplían únicamente con los temas de *Project Management, Project Success* y *Performance Measurement*, así, el listado fue de 105 documentos, los cuales muestran un comportamiento de aumento de las publicaciones en el tiempo según se observa en la Figura 5. De estos, se seleccionaron 15 documentos que cumplen con el criterio de tener definido un conjunto de indicadores para medir el desempeño en proyectos de construcción. La importancia de este criterio de selección radica en poder establecer cuáles son las temáticas, los procesos y, de existir, los indicadores puntuales y sus formas de medición aplicables en el contexto de proyectos de construcción.

Figura 5



Estos 15 documentos proporcionaron un conjunto de criterios para la medición del desempeño los cuales se estructuraron en la Tabla 9, clasificados por conceptos que permitan agrupar los criterios que comparten características o definiciones similares, de tal manera que se obtuviese un conjunto claro y soportado por la revisión de literatura, debido a que serán estos criterios lo que se usarán como base para la elaboración de la propuesta de medición del desempeño. Así, un total de 12 categorías de criterios se identificaron. Como se mencionó en el marco teórico, la mayoría de los indicadores encontrados corresponden a indicadores de resultados o KPOs.

Tabla 9

Autores y criterios de éxito encontrados en la revisión de literatura

Criterios de Éxito	Costo	Tiempo	Calidad	Salud y seguridad	Ambiental	Satisfacción cliente	Satisfacción equipo de trabajo	Rentabilidad	Productividad	Comunicación	Social	Interesados del proyecto
Alarcon (2001)	x	x	x	x			x					
Chan (2004)	x	x	x	x	x	x	x	x				
Beatham (2004)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
Costa (2006)	x	x	x	x			x	x	x			
Botero (2007)	x	x	x	x	x	x						
Radujković (2010)	x	x	x			x	x	x	x			x
Toor (2010)	x	x	x	x								
Demirkesen (2017)	x	x	x	x	x					x		x
Orihuela (2018)	x	x	x		x						x	
Tripathi (2018)	x	x		x	x	x			x		x	
Herrera (2019)	x	x	x									
Salvatierra (2019)	x	x	x									
Khanzadi (2020)	x	x	x	x	x							
Olugboyega (2021)	x	x	x	x		x	x					
Moradi (2022)	x	x	x	x	x	x	x	x	x			

De igual manera, la revisión halló 6 artículos con indicadores que pudiesen aplicar a procesos de diseño, validando lo que menciona Herrera et al. (2019) con respecto a la ausencia de una práctica

extendida de la medición de desempeño en etapas y procesos de diseño. Los indicadores hallados fueron filtrados usando dos criterios fundamentales, el primero, que fuesen indicadores predictivos o “*leading*”, de tal manera que pudiesen ser medidos de manera constante para controlar los procesos de diseño, y el segundo criterio, que pudiesen ser medidos de manera semiautomática utilizando tecnologías y herramientas BIM, dadas las ventajas de usar estas herramientas en la gestión de proyectos y la medición del desempeño (A. Chan et al., 2018; Fazli et al., 2014; Olugboyega et al., 2021), de esta manera, se halló un conjunto de indicadores predictivos para medir el desempeño en el diseño que pudiesen ser aplicados usando BIM, los cuales se clasificaron según los criterios de éxito hallados anteriormente, presentados en la Tabla 10.

Tabla 10

Indicadores hallados en la literatura para la medición del desempeño en diseño usando herramientas BIM

Criterios de Éxito	Indicador	Formula	Tipo de indicador (KPI - KPO)	Fuente
Costo	Meta de costo de construcción	Costos construcción reales / Costos construcción presupuestados	KPO	Orihuela (2018) Moradi (2022) Salvatierra (2019)
	Costo sistema estructural	---	KPI	Orihuela (2018)
	Costo sistemas MEP	---	KPI	Orihuela (2018)
	Costo de acabados	---	KPI	Orihuela (2018)
Tiempo	Tiempo de producción del diseño	Tiempo diseño real / Tiempo diseño contratado	KPO	Orihuela (2018) Moradi (2022) Salvatierra (2019)
	Desarrollo de diseño y planos	---	KPI	Orihuela (2018)
Calidad	Cantidad de RFI	---	KPI	Herrera (2019)
	Cantidad de interferencias detectadas	---	KPI	Khanzadi (2020)
Ambiental	Eficiencia energética	---	KPO	Orihuela (2018) Moradi (2022) Salvatierra (2019)
BIM	Tamaño del paquete de información	---	KPI	Manziona (2011)

Comunicación	Latencia entre consultas	---	KPI	Orihuela (2018) Manziona (2011) Demirkesen (2017) Herrera (2019)
--------------	--------------------------	-----	-----	---

Se realizó una revisión de tesis de posgrado que abordaran las mismas temáticas descritas anteriormente, pero con el componente adicional del contexto nacional y de proyectos de vivienda de interés social. Esta búsqueda se completó en distintos repositorios institucionales de universidades colombianas, los cuales se encuentran listados en la Tabla 11. Así, se recopilaron 21 tesis que abordan las temáticas de interés del estudio. El objeto de esta revisión era entender cómo se encuentra el contexto nacional colombiano de investigación y publicación tanto en las temáticas de gestión de proyectos y su aplicación en proyectos constructivos, así como la aplicación de metodologías BIM en los proyectos. Como resultado se puede observar el liderazgo de dos instituciones, la Universidad Nacional de Colombia y la Universidad de los Andes, entre las dos suman 10 tesis, lo que equivale a aproximadamente la mitad de las tesis de posgrado consultadas.

Tabla 11

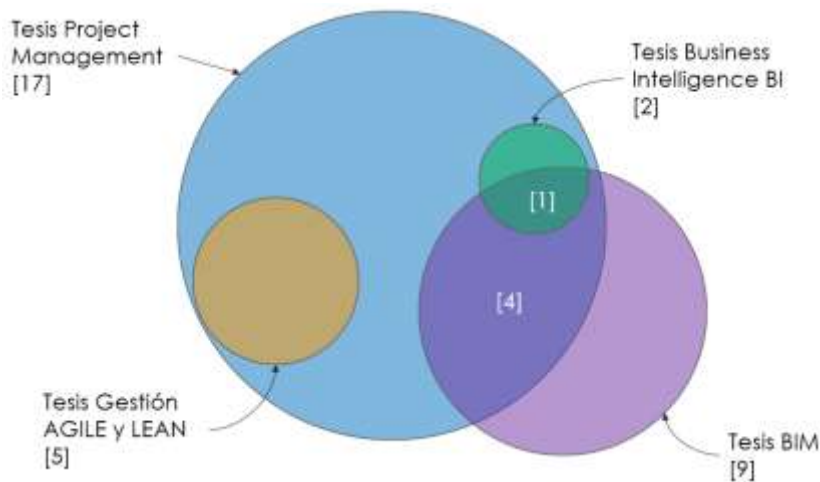
Repositorios institucionales de universidades colombianas para consulta de tesis

Nombre	Cantidad de tesis
Universidad Nacional de Colombia	6
Universidad de Los Andes (Séneca)	4
Universidad EAN	2
Pontificia Universidad Javeriana	2
Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito	1
Universidad Militar Nueva Granada	1
Universidad Piloto de Colombia	1
Universidad de la Costa	1
Universidad Católica de Colombia	1
Universidad Santo Tomás	1
Universidad Tecnológica de Bolívar	1
Total	21

De las tesis encontradas, 17 tesis tratan temas relacionados con gestión de proyectos, y 9 tesis tienen por tema principal BIM. Así mismo, se pudo identificar subtemas como la gestión AGILE y el uso de tecnologías de *business intelligence BI*, los cuales se explican en el diagrama de venn de la Figura 6, encontrando así 5 tesis relacionadas con temas AGILE y 2 tesis de BI. Si bien el comportamiento de las publicaciones en torno a BIM ha aumentado, la gestión de proyectos sigue siendo una de las principales preocupaciones en la elaboración de tesis de posgrados, en donde se observa que la gestión tradicional o predictiva es el estándar en la industria de construcción de vivienda VIS para la gestión de proyectos, si bien cada vez existen más propuestas de aplicación de enfoques AGILE en proyectos de construcción. Pese a lo anterior, ninguna de las tesis encontradas proporcionaba un marco de referencia para la medición del desempeño en los proyectos durante las etapas de diseño, más allá de recomendar la medición de indicadores para los costos y retrasos del proyecto, indicadores que son KPOs al centrarse en los resultados finales del proyecto.

Figura 6

Relaciones entre las temáticas de las tesis consultadas



3.1.1 Conclusiones revisión de literatura

De todo el proceso de revisión de literatura quedan las siguientes conclusiones:

1. Existe una amplia actividad de medición del desempeño en la industria de la construcción junto con estrategias de *benchmarking*, sin embargo, esta medición se focaliza principalmente en los conjuntos de indicadores relacionados con la ejecución constructiva del proyecto, o con los indicadores del “triángulo de hierro” (Calidad, Costo y Tiempo).

Por lo tanto, no es habitual la práctica de medir el desempeño de los procesos de diseño, siendo principalmente medido a través del cumplimiento en la entrega de los distintos entregables, la variación de los costos del diseño y la satisfacción del cliente final. El tipo de indicador usado principalmente es el de resultado o “*lagging*” (rezago) debido a que son indicadores que se calculan al finalizar los proyectos. Esto impide tener un control adecuado durante el desarrollo de los procesos.

2. Se hallaron varios criterios de éxito que son habituales en la medición del éxito del proyecto, los cuales son: *Costo, Tiempo, Calidad, Salud y seguridad, Ambiental, Satisfacción del cliente, Satisfacción del equipo de trabajo, Rentabilidad, Productividad, Comunicación, Social, Interesados del proyecto*, entre otros hallados en menor medida. Los indicadores hallados se clasifican bajo estos criterios de éxito, de tal manera que la medición se encuentra alineada con los objetivos del proyecto.
3. El uso de metodologías de gestión de proyectos tradicionales o de cascada son lo habitual en los proyectos de construcción desarrollados por todo el mundo y en el contexto colombiano. Existe poca implementación de marcos de trabajo AGILE, los cuales se han concentrado principalmente en gestionar el desperdicio de la etapa de construcción a través de metodologías LEAN, pero su implementación a nivel de etapas de diseño no se ha establecido.
4. La revisión de literatura cumplió con los objetivos definidos al inicio del capítulo, por una parte, se estableció la documentación base para poder desarrollar el marco teórico y sentar los principios técnicos sobre los cuales desarrollar la investigación. Y de igual manera, se identificaron un conjunto de criterios de éxito e indicadores que permitiesen realizar una medición del desempeño apalancados en herramientas BIM.

3.2 Entrevistas a panel de expertos

Durante la Fase 1 se desarrolló un levantamiento de información respecto a los indicadores para la medición del desempeño en el diseño de proyectos residenciales VIS, este levantamiento incluye la identificación de categorías y/o temáticas de medición que se encuentran ampliamente documentadas y tienen mayor relevancia. Adicionalmente, se establecieron unas conclusiones en el marco teórico, las cuales concentran el producto de la revisión de literatura y son el soporte sobre el cual se elabora la presente investigación. Estos resultados fueron obtenidos a través de la medición estadística de los distintos artículos y proveen una base cuantitativa para el desarrollo del estudio.

De manera paralela a este levantamiento de información cuantitativa, se desarrolló una entrevista semi estructurada siguiendo la definición de Hernández-Sampieri & Mendoza (2018) a un panel seleccionado de expertos provenientes de empresas constructoras de vivienda VIS con el objetivo de obtener información de fuentes primarias respecto a las temáticas relacionadas con el estudio, con independencia a lo indicado en la revisión de literatura. La elección de este tipo de entrevistas se debe a la flexibilidad que permite para abordar en profundidad aspectos relacionados con la experiencia y visión de los perfiles seleccionados dentro del panel de expertos entrevistados. Así, se plantearon un conjunto de preguntas específicas descritas en la Tabla 12, las cuales permite obtener datos tanto cualitativos como cuantitativos y mixtos, cumpliendo un orden determinado a partir de una lógica deductiva, la cual empieza por una temática más general y cada vez se hace más específica.

Tabla 12

Preguntas de la entrevista a Panel de expertos

Temática	Numero	Pregunta	Clase
Éxito de proyecto y Criterios de Éxito	1	¿Qué es para usted un "proyecto exitoso" desde la perspectiva de la gestión del diseño?	CUAL
	2	¿Cuáles son los principales criterios u objetivos que definen un proyecto exitoso desde el diseño?	CUAL
Gestión de proyectos	3	¿Usted aplica metodologías de gestión de proyectos (<i>Project Management</i>) durante el desarrollo de los diseños de los proyectos de vivienda VIS?	CUAN
	4	¿Usted conoce las metodologías de gestión AGILE (<i>SCRUM, PRINCE2, LEAN</i>)? ¿En su organización utilizan procesos ágiles en el desarrollo del diseño de viviendas VIS?	MIX
Medición del desempeño	5	¿Cómo miden el desempeño de los procesos de diseño en los proyectos de vivienda VIS? ¿Usan alguna metodología y/o sistema de medición del desempeño específica?	MIX
	6	¿La organización posee un conjunto de indicadores (KPI) para medir el desempeño de los procesos de diseño?	CUAN

Procesos de diseño	7	Adjunto se comparte una imagen de las fases de diseño correspondientes a la Tabla 31 de OmniClass ¿Cuál es su opinión de esta propuesta de fases de OmniClass? ¿Cambiaría o agregaría alguna fase?	CUAL
	8	¿En su organización realizan los siguientes subprocesos o actividades relacionados con el diseño? ¿Cambiaría o agregaría alguno?	CUAN
	9	¿Cómo se controla el desarrollo y avance de los diseños, la ejecución de procesos y actividades y el cumplimiento de los objetivos, definidos para el proyecto durante el diseño? <i>Por ejemplo, mediante reuniones de seguimiento, informes de revisión, auditorías.</i>	MIX
Necesidades	10	¿Qué proceso, actividad u objetivo le gustaría poder controlar y/o medir en sus funciones diarias?	MIX

3.2.1 Resultados de las entrevistas

Caracterización panel de expertos

La caracterización se realizó previo al proceso de entrevistas, de esta manera, el panel de expertos seleccionado se compuso de un total de 8 personas, las cuales ocupan cargos de directores y/o líderes de diseño y coordinadores técnicos como se observa en la Figura 7, estos perfiles forman parte de 6 de las principales empresas constructoras de vivienda VIS del país descritas en la Tabla 13.

Figura 7

Rol actual en la organización



Tabla 13

Organizaciones participantes en las entrevistas

Organización	Rol participante en la encuesta
Constructora Colpatria S.A.S	Director de diseño
	Coordinador de proyecto
Coninsa S.A.S	Director de diseño
Prodesa y cía. S.A.	Coordinador de proyecto
Marval S.A.S	Arquitecto Senior
Deeb Asociados S.A.S	Director de diseño
Conaltura Construcción y Vivienda S.A.S	Coordinador de proyecto
Triada S.A.S	Director de diseño

Preguntas 1 y 2 - Éxito de proyecto y Criterios de Éxito

Estas dos preguntas tienen como objetivo explorar el concepto de “proyecto exitoso” en la perspectiva de quienes dirigen y/o gestionan el desarrollo de los diseños de proyectos, por lo tanto, los datos recopilados son de carácter cualitativo, orientado a la importancia que tienen según la experiencia de los participantes.

Una condición común en todas las respuestas obtenidas fue la importancia de los aspectos correspondientes a los costos y/o presupuestos del proyecto, los tiempos de desarrollo y ejecución, y el alcance definido para el proyecto, lo que se conoce como el triángulo de hierro o triple restricción (Atkinson, 1999). Estos tres aspectos primaron en las respuestas de todos los participantes, siendo condicionantes claves de estos para considerar un proyecto como exitoso. A nivel de roles, se observa que los directores de diseño suelen tener una preocupación mayor por el alcance del proyecto y atender las necesidades del cliente, así como también un fuerte interés en que se cumplan los objetivos definidos en la etapa de estructuración del proyecto para considerar este como exitoso. Por otro lado, las respuestas brindadas por los coordinadores técnicos enfocan su atención principalmente en el correcto manejo de recursos, la culminación de los diseños y, en general, la viabilidad técnica y económica del proyecto. Todos los participantes asumieron el

cumplimiento de objetivos como la condición principal que determina el éxito del proyecto, por eso, cuando se les preguntó cuáles eran los principales criterios u objetivos para definir un proyecto como exitoso (pregunta 2) muchos respondieron que los mencionados antes en la primera pregunta. Sin embargo, dos directores de diseño añadieron otros criterios a consideración, como la optimización de diseños y la sostenibilidad. Así mismo, un coordinador técnico mencionó la importancia de la coordinación de diseños técnicos. De esta manera, se extrae un listado de criterios de éxito a partir de las respuestas brindadas por parte de los participantes (Tabla 14) la cual se organiza según la importancia percibida por parte de estos.

Tabla 14

Listado de criterios de éxito concluidos de las preguntas 1 y 2

Cumplimiento con los costos

Cumplimiento con el tiempo

Correcta definición del alcance

Cumplimiento de objetivos definidos en la etapa anterior

Atención a las necesidades del cliente

Manejo de recursos

Culminación de diseños

Optimización de diseños

Sostenibilidad

Preguntas 3 y 4 - Gestión de proyectos

Estas preguntas tienen por objetivo entender cuál es la perspectiva de gestión que tienen los participantes en el desarrollo de diseños para los proyectos de vivienda. Al ser puntuales las preguntas, las respuestas sirvieron como recopilación de datos cuantitativos; sin embargo, dado que se tuvo la oportunidad de extenderse con algunos de los participantes en estas respuestas, se obtuvo una apreciación cualitativa, teniendo así una perspectiva mixta de los resultados indicados.

Todos los participantes indicaron conocer y aplicar metodologías de gestión de proyectos (*Project Management*) durante el desarrollo de los diseños de vivienda VIS. En general, los participantes manifestaron que los proyectos se rigen bajo principios del PMBOK®, sin embargo, la apreciación general obtenida es de lejanía con la gestión general del proyecto, debido a que en varias de estas

empresas existe una área de estructuración de negocios o planeación que se encarga de esta gestión, usualmente con un Project Manager o una PMO, por lo que la preocupación principal de los participantes se centra en el cumplimiento del alcance y los objetivos definidos por esta área para la fase de diseño con respecto al proyecto, así como el desarrollo de los entregables a tiempo, apareciendo nuevamente la triple restricción (costo, tiempo, alcance) como aspectos críticos a gestionar del producto desarrollado (la vivienda VIS). Con respecto al conocimiento de metodologías de gestión AGILE e híbridas, el 87.5% de los participantes (siete de los ocho entrevistados) mencionaron reconocerlas, y el 50% (cuatro de los ocho entrevistados) mencionaron que las utilizan en sus procesos de diseño. Al profundizar sobre el tema, ningún participante usa procesos traídos de marcos de trabajo tales como PRINCE2 o SCRUM, a excepción de uno de los directores de diseño que mencionó el uso de “Sprints” de diseño, sin embargo, estos sprints se encuentran más orientados a los periodos de pago de los consultores, que propiamente al desarrollo de propuestas iterativas y cumplimientos de alcances y comunicación rápida que son características de SCRUM. La metodología LEAN es la que más se reconoció por parte de los participantes, sin embargo, su aplicación en diseño se encuentra bastante limitada, siendo esta aplicada durante la construcción del proyecto, principalmente con el objetivo de reducir desperdicios, y el cumplimiento de ciertas actividades críticas mediante la aplicación de *Last Planner System*.

Preguntas 5 y 6 – Medición del desempeño

Estas preguntas tienen como objetivo identificar los procesos de medición del desempeño realizados al interior de las organizaciones entrevistadas. Las respuestas brindadas por los participantes aportarán datos cuantitativos, principalmente, respecto a los indicadores de medición utilizados, dado que las preguntas realizadas tienen un carácter más exploratorio.

Todos los participantes manifestaron utilizar indicadores para medir el desempeño de los distintos procesos de diseño, sin embargo, no es común el uso de alguna metodología o sistema particular para esta medición del desempeño. Solo uno de los directores de diseño mencionó una herramienta específica, el *Project Definition Rating Index, PDRI*, esta es una herramienta desarrollada por la CII para evaluar la calidad de la definición de proyectos en sus etapas iniciales. La idea detrás del PDRI es identificar y abordar problemas potenciales antes de que se inicien las fases de diseño y construcción, ayudando así a mejorar la planificación y reducir los riesgos asociados con la falta de claridad en la definición del proyecto (Construction Industry Institute (CII), 2024); sin embargo, al

interior de la organización se utiliza esta herramienta para indicar el estado de madurez del proyecto y entender si se cumple con lo requerido en cada fase. Por lo demás, no se identificó ninguna otra metodología particular para la medición del desempeño en procesos de diseño, siendo la experiencia de los participantes el criterio principal utilizado para la definición de los indicadores a utilizar. Con respecto al uso de indicadores, el 62.5 % de los participantes (seis de los ocho entrevistados) compartieron información de los indicadores usados, los cuales se listan en la Tabla 15 sin ningún orden de importancia. Al igual que con los criterios de éxito, los indicadores están orientados al cumplimiento de la triple restricción, con los costos, principalmente el cumplimiento con el presupuesto del proyecto, y los tiempos, relacionado en general con las entregas de información y la calidad de esta.

Tabla 15

Listado de indicadores extraído de las preguntas 5 y 6

Porcentaje de diseños ejecutados

SPI - Schedule Performance Index - Índice de Rendimiento de Cronograma

Entregas dentro del cronograma

PAC (PPC) "Percent Plan Complete"

Tiempos de diseño

CPI - Cost Performance Index - Índice de Rendimiento de Costos

Cumplimiento de presupuestos

Tasa de error en diseños

Retrabajos

Calidad BIM

Preguntas 7, 8 y 9 – Procesos de diseño

Estas preguntas tienen como objetivo identificar los procesos de diseño que forman parte de esta etapa del proyecto, así como las actividades realizadas para controlar el avance y el cumplimiento de objetivos. Dado que las preguntas abarcan un amplio espectro, desde cuales son las opiniones y perspectivas de los participantes sobre ciertos temas, hasta selección de opciones, los datos recopilados serán tanto cualitativos como cuantitativos y mixtos.

La pregunta 7 presentó a los participantes la propuesta de fases de proyecto realizada por la Construction Specifications Institute (CSI) en su tabla 31 de OmniClass™, que incluyen las siguientes fases: Fase de inicio, Fase de Conceptualización, Fase de definición de criterios, Fase de diseño, Fase de coordinación (para más información, consulte la Tabla 19 de este documento). Se les preguntó a los participantes que opinaban de esta propuesta de fases y si la modificarían, a lo cual la respuesta generalizada fue un desconocimiento sobre la tabla 31 de OmniClass™, y respecto a las fases planteadas, la mayoría de las respuestas mencionaron que sería necesaria una adaptación a los requerimientos específicos de cada organización, debido a que las líneas de tiempo de cada organización y la distribución de las actividades a realizar en los proyectos de vivienda varían sustancialmente con la propuesta de OmniClass™, la cual es generalizada para cualquier proyecto de construcción. Uno de los coordinadores de proyecto mencionó que, en su opinión, se podrían unificar las fases de inicio y conceptualización para tener un mejor manejo de los contratos del proyecto, así como pensar en una fase adicional orientada a la optimización de diseños y pre-construcción del proyecto.

La pregunta 8 mencionó un conjunto de siete actividades o subprocesos que se realizan durante la etapa de diseño, el objetivo era cuantificar cuales de estas actividades se realizaban en la organización, así como cuales otras son realizadas por parte de los equipos de diseño y no habían sido identificadas. La respuesta obtenida es que todas las actividades mencionadas en la Tabla 16 son realizadas por todas las organizaciones entrevistadas.

Tabla 16

Pregunta 8 - Listado de subprocesos o actividades relacionados con el diseño

Subproceso	Porcentaje de realización
Desarrollo de diseños	100%
Revisión de diseños	100%
Coordinación técnica de diseños	100%
Estimación de cantidades y costos	100%
Desarrollo de entregables	100%
Radicación y obtención de permisos y licencias	100%
Análisis bioclimáticos y de sostenibilidad	100%

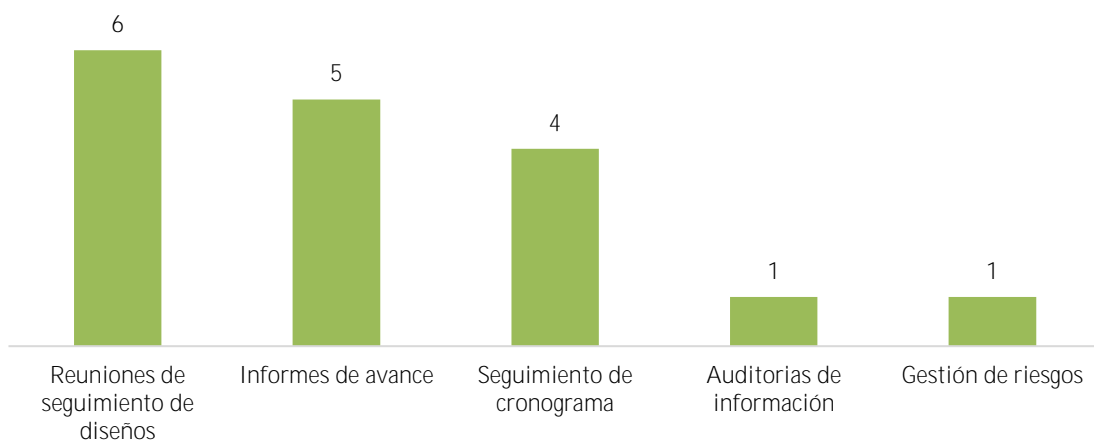
Los participantes entrevistados mencionaron las actividades listadas en la Tabla 17 como actividades adicionales a las presentadas, las cuales se deben realizar durante el diseño.

Tabla 17
Listado de subprocesos propuestos por los participantes

Aprobación de diseños técnicos
Optimización de diseños
Diseño Inclusivo y sostenible
Acompañamiento de construcción
Planeación de logística de obra
Análisis factibilidad
Gestión licencias

La pregunta 9 busca identificar las acciones y/o herramientas que los participantes usan para realizar el control de los procesos de diseño y los equipos de trabajo, las respuestas fueron sistematizadas y unificadas en la Figura 8, la cual muestra una tendencia importante a la realización de reuniones para llevar el control y seguimiento de los diseños.

Figura 8
Actividades para el control de los procesos de diseño



Pregunta 10 – Propuesta

Esta pregunta abierta tiene como objetivo explorar cuales son los procesos o actividades en las cuales se ha detectado la necesidad de controlar y/o medir por parte de los participantes de la entrevista. Las respuestas fueron sistematizadas y listadas en la Tabla 18. Estas respuestas muestran una preocupación por controlar aspectos del desarrollo diario del proyecto, más allá del cumplimiento de los objetivos generales, lo que discrepa de los indicadores y procesos descritos anteriormente por los participantes durante la realización de la entrevista. Dentro de los roles, son los coordinadores de proyecto los que propusieron mayor cantidad de procesos a controlar, lo cual muestra una relación entre su rol como figura que ordena y garantiza que el proyecto se realice, a diferente de los directores de diseño, lo cuales mostraron preocupación principalmente por los tiempos, tanto el dedicado a atender los requerimientos de las obras, como los tiempos de respuesta por parte de otros equipos de diseñadores del proyecto.

Tabla 18

Listado de procesos con necesidad de control y medición según los entrevistados

Seguimiento de tramites
Control de avances con relación a los hitos
Coordinación técnica de proyecto
Gestión de recursos asignados a los proyectos
Tiempo dedicado a atender RFI
Lecciones aprendidas de obra a diseño
Tiempos de respuesta por parte de los diseñadores
Gestión de cambios en los diseños
Control de la colaboración y comunicación

3.3 Metainferencias

Una vez realizados los levantamientos de datos, tanto de carácter cuantitativo como cualitativo, se procede a elaborar las metainferencias. Siguiendo la definición de Creswell (2014) y Hernández-Sampieri & Mendoza (2018), las metainferencias son una técnica utilizada en la investigación mixta y buscar patrones, relaciones y convergencias que proporcionen una comprensión más

profunda del fenómeno que se está estudiando. Así, se escogió el método de análisis descrito por Creswell (2014), denominado *side-by-side*, en el cual se presentan un conjunto de datos primero y luego se contrasta con el otro conjunto de datos. Dado que el diseño de investigación mixto escogido es un diseño embebido, se presentan los resultados cuantitativos extraídos de la revisión de literatura y la definición del marco teórico, y se contrastan con los datos cualitativos obtenidos de las entrevistas realizadas a panel de expertos. De esta manera, se construyeron las metainferencias por contenidos temáticos, los cuales son: *Éxito de proyecto*, *Gestión de proyectos*, *Medición del desempeño* y *Procesos de diseño*.

3.3.1 Éxito de proyecto

Durante de la revisión de literatura, se llegó a la conclusión (C04) de que el éxito de un proyecto depende de variables multidimensionales, llamadas criterios de éxito, las cuales van más allá de las tradicionales tiempo, costo y calidad, incluyendo aspectos más amplios como la seguridad, ambiental, satisfacción de cliente, productividad y etc., los cuales se mencionan en la tabla 9. Los datos encontrados mencionan que los criterios más importantes con respecto a los artículos revisados son: Costo y Tiempo mencionados como un criterio de éxito en el 100% de los artículos, Calidad en un 93% de los artículos, Salud y seguridad en un 73%, Ambiental en un 53%, Satisfacción del cliente y Satisfacción del trabajo realizado en un 47%, Rentabilidad y Productividad en un 33%, Comunicación, Social y Gestión de interesados del proyecto en un 13% de los artículos consultados, más allá los criterios encontrados comienzan a aparecer esporádicamente en artículos individuales. Al contrastar esta información con los datos cualitativos obtenidos de las entrevistas, podemos observar que la definición de “proyecto exitoso” coincide con la obtenida por la revisión de literatura, de tal manera que **se refuerza la idea del éxito de un proyecto como el cumplimiento de unos criterios u objetivos dados**. Estos criterios también se pudieron extraer en los datos cualitativos, obteniendo un listado presentado en la tabla 19, con respecto a los cuales hay una coincidencia del 55% con los criterios de éxito hallados en la revisión de literatura, particularmente en los criterios relacionados con el “triángulo de hierro”, junto a la satisfacción del cliente y a la sostenibilidad. Los criterios restantes encontrados en las entrevistas se orientan más a la gestión y cumplimiento de los objetivos del proyecto y la ejecución de procesos en la etapa del desarrollo de diseños, acá es donde se marca la diferencia con los criterios hallados en la revisión de literatura, los cuales se orientan más a los objetivos generales del proyecto de manera holística, abarcando todo el ciclo de vida de la edificación. Esta diferencia en los criterios obtenidos entre la literatura y las entrevistas se explica debido a que existen menos

estudios que investiguen el interés de los diseñadores, a diferencia de los estudios enfocados a entender y obtener el éxito del proyecto, y dado que los directores de diseño y coordinadores tienen unas preocupaciones particulares debido a su participación en la etapa de diseño, su percepción respecto a los criterios que definen el éxito difiere parcialmente con lo expresado por la revisión de literatura.

3.3.2 Gestión de proyectos

Durante de la revisión de literatura se concluyó que la gestión de proyectos de construcción ha sido desarrollada en su mayoría usando enfoques y metodologías tradicionales o “predictivo”, de tal manera que los enfoques ágiles como Scrum o PRINCE2 se encuentran poco usados en el sector de la construcción (C01, C02). Al contrastar con los datos levantados en las entrevistas, los participantes señalan que utilizan procesos de gestión basados en el enfoque tradicional, usando los lineamientos de PMBoK para la administración de los proyectos en las etapas de diseño, confirmando los datos cuantitativos obtenidos en la revisión de literatura. De igual manera, aunque los participantes señalaron haber escuchado respecto a los enfoques ágiles, ninguno de estos aplica este tipo de procesos en el desarrollo de los proyectos, reforzando las ideas obtenidas durante la revisión de literatura. Sin embargo, la visión general de los participantes respecto a estos enfoques ágiles es que poseen mucho interés, manifestado con intentos de implementar procesos más ágiles en la etapa de diseño debido a las presiones de la gerencia del proyecto, pero desarticulados de los procesos de gestión integral.

3.3.3 Medición del desempeño

Durante la revisión de literatura se definieron siete conclusiones relacionadas con la medición del desempeño (C05, C06, C07, C08, C09, C10, C11), así, una de las conclusiones indica que no existe una práctica habitual en la industria para la medición de indicadores de desempeño que permitan el control del avance del proyecto. Esta conclusión se encuentra validada por los resultados de la entrevista, en la cual los participantes del panel de expertos mencionaron que, si bien utilizan indicadores para medir su desempeño, estos indicadores no se encuentran relacionados con ninguna metodología de medición establecida. Esto muestra un interés por parte de los participantes de medir los proyectos y tener control, pero también la falta de conocimiento por parte de las organizaciones para realizar una medición efectiva. De igual manera, la revisión de literatura halló 10 indicadores para la medición del desempeño aplicables a procesos de diseño,

descritos en la tabla 10, al compararlos con los datos cualitativos de las entrevistas, se observa que el mayor interés del panel seleccionado gira en torno al cumplimiento con los plazos de entregas y cumplimientos de presupuestos y costos. Esto demuestra que el interés de medición y control se centra en los criterios de costos y tiempos, dejando de lado otros criterios de éxito de los proyectos.

∴

4. Sistema de medición del desempeño basado en indicadores para procesos de diseño

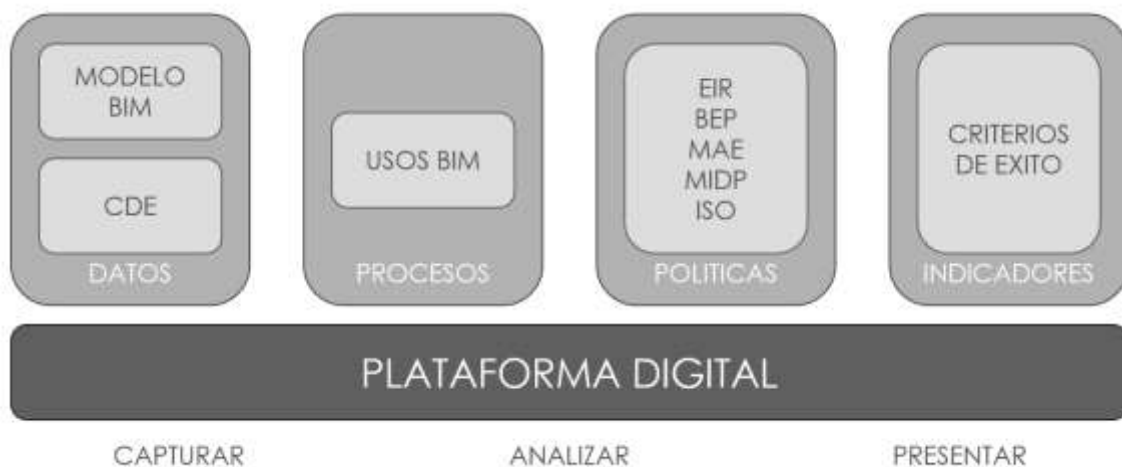
Basado en la información descrita en los capítulos anteriores, los resultados de las metainferencias y las conclusiones del marco técnico, se elabora la siguiente propuesta de indicadores para medir el desempeño de los procesos elaborados durante las etapas de diseño para proyectos de vivienda VIS, buscando atender uno de los objetivos específicos de la presente tesis de maestría.

4.1 Componentes del sistema de medición de indicadores

El sistema desarrollado se compone de cinco partes, las cuales trabajan de manera integrada en la medición del desempeño, como se indica en la Figura 9.

Figura 9

Esquema conceptual del sistema de indicadores



Datos:

Según la norma ISO/IEC 2382-1:1993, un dato es "una representación simbólica de hechos, conceptos o instrucciones en una forma adecuada para su comunicación, interpretación o procesamiento por seres humanos o por sistemas automáticos". Dentro del contexto BIM los datos se pueden obtener de dos fuentes, los modelos BIM y el ambiente común de datos (CDE):

Modelo BIM:

En ese contenedor de información, los datos refieren a los elementos individuales y brutos que se recopilan, como las dimensiones, características geométricas, propiedades físicas, materiales, etc., de los elementos que componen un modelo BIM. Estos datos son la base sobre la cual se construye toda la información del proyecto.

Ambientes comunes de datos (CDE):

Estas plataformas permiten la creación de otro tipo de datos asociados con la operación, gestión y manejo de los modelos y entregables, los cuales aparecen mediante formularios que pueden estructurarse en bases de datos exportables y manipulables por otras herramientas.

Dentro de la presente propuesta, los datos "crudos" o sin procesar (*raw data*) que se encuentran al interior del modelo y las bases de datos son el principal sustento de la medición, debido a que son los insumos que alimentan el sistema de medición del desempeño, su manipulación e interpretación se explicará más adelante durante la estructuración de los diferentes indicadores.

Procesos:

Los procesos incluyen las distintas actividades que serán desarrolladas por los equipos de trabajo durante la etapa de diseño, estas actividades están alineadas con las tareas que se listan y definen en el MIDP y el MAE y su objetivo es, entre otros, el desarrollo de los diseños técnicos del proyecto cumpliendo con el alcance descrito en los términos de contratación, así como la producción de los distintos entregables necesarios para el desarrollo satisfactorio del proyecto en esta etapa. La estructuración de procesos de diseño en proyectos basados en BIM se hará mediante la utilización de los denominados Usos BIM.

En la presente propuesta, los procesos cumplen la función de crear los datos usados para la medición, debido a que el desarrollo de los diseños del proyecto implica necesariamente la

aplicación de Usos BIM para la realización de las diferentes actividades y tareas, trabajando sobre contenedores de información, sean estos Modelos BIM o ambientes comunes de datos (CDE).

Políticas:

Las políticas se definen como los lineamientos o reglas bajo con las cuales se establece un marco de trabajo común para todos los participantes, de tal manera que se puedan desarrollar los procesos y actividades del proyecto de acuerdo con los requerimientos de los interesados. Las políticas tienen un carácter contractual, de tal manera que suelen ser objeto de obligatorio cumplimiento por parte de los participantes, esto hace que los lineamientos definidos sean críticos pues determinan como serán desarrollados los procesos e influirán en la creación, y por consiguiente a la calidad, de los datos al interior de los contenedores. Dentro de la metodología BIM y descrito al interior de la NTC-ISO 19650.1 2020, se establece un conjunto de políticas concluidas en la **C15**, que incluyen los requerimientos de información de varios niveles (OIR, PIR, AIR, EIR), así como el **plan de ejecución BIM (BEP)**, y otros documentos adicionales como el MIDP, TIDP y MAE. La presente propuesta se ajusta las políticas que deben estar definidas en una empresa constructora de vivienda VIS con respecto a la contratación de los diseños técnicos, teniendo en cuenta que esta empresa debe contar con un nivel de madurez BIM que le permita tener desarrollados, en gran medida, la documentación de marco técnico BIM necesaria para el desarrollo de proyecto basados en BIM. La existencia de estas políticas define la estructura base sobre la que se establece la relación entre Datos, Procesos, Tecnología e Indicadores del presente sistema de medición, definiendo entre otros los objetivos, las etapas, los roles y responsabilidades y los requerimientos de información que se deben atender durante el desarrollo del proyecto.

Indicadores:

Los indicadores son una medida cuantitativa o cualitativa que proporciona información sobre el rendimiento, el progreso o el estado de un proyecto, proceso o actividad específica en relación con los objetivos establecidos (Kerzner, 2011). Estos indicadores sirven para evaluar y medir el desempeño, permitiendo a los gerentes y responsables tomar decisiones informadas basadas en datos con el fin de mejorar la eficiencia, la efectividad y el logro de los resultados deseados. La presente propuesta es un sistema de medición del desempeño mediante indicadores, para lo cual se definen un conjunto de criterios de éxito de los proyectos de construcción basados en metodologías BIM. Estos criterios fueron seleccionados a través del proceso de metainferencias que analizó los resultados específicos de la revisión de literatura a nivel estadístico y las entrevistas realizadas al

panel de expertos con el fin de determinar los criterios más relevantes para el proyecto, los cuales puedan apalancarse en una medición sobre metodologías BIM. Cada criterio de éxito contiene a su vez un conjunto de indicadores, los cuales serán medidos sobre los procesos definidos, utilizando para su medición los datos provenientes de los contenedores de información del proyecto.

4.2 Estructura del sistema de medición de indicadores

La idea central detrás de la propuesta de medición de indicadores es brindar una herramienta que permita el control del estado actual del proyecto, a través de indicadores de proceso que muestren el desempeño de los distintos procesos según los criterios de éxito que sean definidos. Estos indicadores de proceso toman los datos provenientes de contenedores de información BIM, tales como los modelos BIM y la base de datos proveniente de ambientes comunes de datos (CDE), y usan esa información para calcular el desempeño a través de un desarrollo formulado, donde cada dato es procesado y utilizado en los distintos indicadores. A continuación, se presenta la estructura base que define el sistema de medición del desempeño, la cual se representa conceptualmente como una matriz, en cuyo eje X se encuentra la variable del tiempo expresadas como las fases del proyecto; y en su eje Y se encuentra la variable de los distintos procesos que serán desarrollados durante el diseño.

4.2.1 Fases de proyecto

Con el objetivo de desarrollar un sistema de medición que permita controlar el estado actual del proyecto, es necesario definir las fases en las que el proyecto se desarrolla, puesto que las necesidades de información, los procesos, tareas y actividades son diferentes según la fase del proyecto en la que se encuentre. Por lo anterior, se consultaron y evaluaron 2 propuestas de fases para proyectos de construcción, la tabla 31 de OmniClass® y el plan de trabajo RIBA® 2020. La Tabla 19 muestra la comparación entre ambas propuestas, su estructura y objetivos en cada fase.

Tabla 19

Comparativa de estándares de fases OmniClass® y RIBA®

Fase	OmniClass®			RIBA Plan Of Work 2020®		
	Código	Nombre	Descripción	Código	Nombre	Descripción
Planeación	31-10 00 00	Fase de inicio	La fase inicial establece la visión del proyecto y los recursos esenciales para satisfacer las necesidades del cliente, incluyendo ubicación, planificación, plazos, presupuesto y recursos necesarios.	0	Definición estratégica	El objetivo principal de la Etapa 0 es estratégico: ratificar que un proyecto de construcción, o de otra manera, es el mejor medio para alcanzar los Requerimientos del Cliente.

Diseño	31-20 00 00	Fase de concepto	La fase busca ideas clave de diseño considerando objetivos, rendimiento y actividad para definir espacios e iniciar elementos del proyecto.	1	Preparación	Los Requerimientos del Cliente para el proyecto se consideran con más detalle, en relación con un sitio o sitios específicos, y los resultados se registran en el Brief del Proyecto.
	31-30 00 00	Fase de definición de criterios	Elaboración de diagramas esenciales del proyecto: subestructura, envolvente, interiores, equipos, servicios, mobiliario, construcción especial y demolición. Definen criterios del proyecto y Base del Diseño.	2	Diseño Conceptual	La Etapa 2 define el Concepto Arquitectónico. Propuestas se alinean con el Sitio, Brief y Requerimientos Espaciales. Revisiones regulares con comentarios de clientes y otros interesados guían modificaciones en el diseño.
	31-40 00 00	Fase de diseño	Se establecen medios para cumplir requisitos de la Base del Diseño, evalúa alternativas mediante análisis de valor u otros métodos similares, y completa documentación inicial del proyecto con planos y resultados de trabajo especificados.	3	Coordinación espacial	La Etapa 3 valida el Concepto Arquitectónico, garantizando la coordinación espacial de la información arquitectónica e ingenieril preparada en la Etapa 2 antes de la información detallada para la fabricación y construcción en la Etapa 4
Construcción	31-50 00 00	Fase de coordinación	Fase que evalúa constructibilidad y viabilidad para desarrollar espacios, elementos, productos y materiales necesarios para adquisición y ejecución, sin importar el método de entrega.	4	Diseño Técnico	Preparación de información para construcción. Documentos clave incluyen Matriz de Responsabilidades, Requerimientos de Información y Programa de Diseño influenciado por Estrategia de Adquisiciones.
	31-60 00 00	Fase de Implementación	Fase que ejecuta diseño coordinado con planificación de construcción, prefabricación y ejecución en terreno. Se centra en los "medios y métodos" del constructor y estrategias de construcción, con protocolos de aseguramiento y control de calidad	5	Producción y construcción	Fabricación y construcción de Sistemas del Edificio según Programa de Construcción en Contrato. Uso creciente de tecnologías digitales permite simular actividades constructivas, agilizando y asegurando la Etapa 5
Operación y mantenimiento	31-70 00 00	Fase de entrega	Fase de evaluación del trabajo mediante pruebas, inspecciones y puesta en marcha, garantizando cumplimiento de criterios de diseño/rendimiento y ajuste a códigos y estándares correspondientes, incluyendo equipos del propietario.	6	Entrega	La Etapa 6 comienza con la entrega del edificio al cliente, con el inicio del servicio postventa y la conclusión del Contrato de Construcción.
	31-80 00 00	Fase de Operación	Fase de ocupación, gestión y mantenimiento por el propietario o agente designado, incluyendo renovaciones, reparaciones o remodelaciones como parte del ciclo de vida del proyecto.	7	Uso	Etapa en la que se usa, gestiona y administra la instalación y el activo por parte del propietario. Inicia al mismo tiempo que la etapa 6.

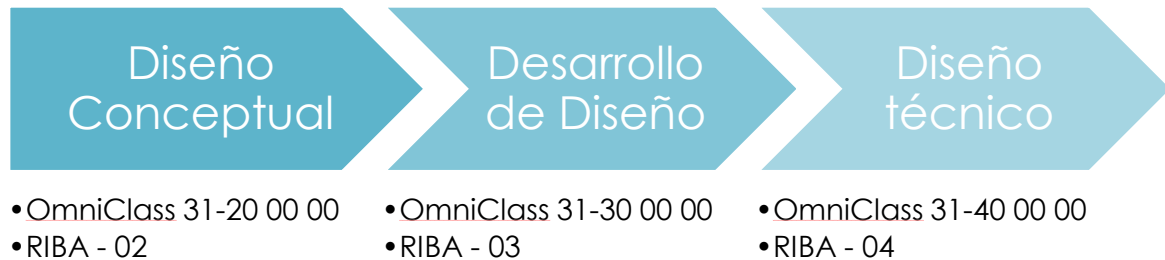
31-90 00 00	Fase de cierre	Preparación para un futuro desconocido, demolición total o parcial, venta u otras acciones similares cuando la instalación ya no cumple con las necesidades del propietario y no puede reconfigurarse para un uso continuo.
----------------	----------------	---

El alcance de la presente propuesta pretende medir y controlar el desempeño de los procesos durante las fases de diseño en proyectos de vivienda VIS, así, al tomar los resultados de las entrevistas y las metainferencias respecto a las fases de un proyecto durante las etapas de diseño, se seleccionan 3 fases para la estructura del sistema de medición, tal como lo indica la Figura 10, las fases son:

- **Diseño Conceptual:** Equivalente a las fases “31-20 00 00 Concepto” de OmniClass y “2 – Diseño Conceptual” de RIBA, esta fase toma el alcance del proyecto establecido en las fases previas de “planeación y estrategia”, y principalmente la definición del producto, que será el insumo inicial para el desarrollo de los diseños técnicos del proyecto. Se verifica el cumplimiento de las necesidades del cliente, específicamente las relacionadas con requisitos espaciales y de programa, así como la implantación en el sitio, definiendo los criterios de diseño generales.
- **Desarrollo de diseño:** Equivalente a las fases “31-30 00 00 Definición de criterios” de OmniClass y “3 – Coordinación espacial” de RIBA, en esta fase se desarrolla y valida el concepto arquitectónico, así como se elaboran los esquemas base de los elementos esenciales de diseños técnicos y se realiza la correcta integración y coordinación técnica de las disciplinas involucradas en el proyecto. En el desarrollo específico de proyectos de vivienda VIS en Colombia, en esta fase usualmente se desarrolla la documentación de radicación para licencias de construcción, así como la información para salida a ventas del proyecto.
- **Diseño Técnico:** Equivalente a las fases “31-40 00 00 Diseño” de OmniClass y “4 – Diseño técnico” de RIBA, en esta fase se busca finalizar los requerimientos y el desarrollo de los diseños establecidos, así como la elaboración de la documentación necesaria para la construcción, incluyendo planos, especificaciones y resultados de trabajo. Durante esta fase se corrigen las observaciones de las entidades aprobatorias para la licencia de construcción.

Figura 10

Fases del sistema de medición

**Hitos de proyecto**

Para el sistema de medición del desempeño se definieron los siguientes hitos, los cuales son puntos clave dentro del desarrollo de los diseños del proyecto que determinan el inicio y fin de las distintas etapas:

- **Aprobación de diseño conceptual:** se da con la aprobación del producto (la vivienda VIS) dada la validación tanto técnica como económica (factibilidad) del proyecto. Usualmente esta aprobación queda registrada en un acta firmada por varios de los responsables e interesados del proyecto, finalizando las actividades relacionadas con la fase de diseño conceptual, e iniciando la fase de desarrollo de diseño.
- **Radicación de diseños para licencia de construcción:** es un hito clave en el desarrollo del proyecto, y particularmente en el cumplimiento de los tiempos y requerimientos normativos necesarios para la realización de este, pues uno de los aspectos críticos de todo proyecto de vivienda VIS es la aprobación de la licencia de construcción por parte de la entidad correspondiente que habilita la posibilidad de ejecutar (construir) el proyecto, por lo que es necesario realizar todo el proceso de radicación y corrección de observaciones con el fin de obtener la licencia. La radicación de diseños es la presentación formal ante la entidad correspondiente y el primer paso para la obtención de la licencia de construcción, por lo que es un hito clave de la etapa de diseño de todo proyecto.
- **Entrega de diseños a construcciones:** indica el final de la etapa de diseño en general, cuando el proyecto se ha desarrollado al nivel requerido para su ejecución en la fase de construcción. Para este momento, se debe haber finalizado todos los diseños técnicos requeridos para la ejecución, con sus respectivas especificaciones técnicas y documentación adicional, así como la coordinación e integración entre las distintas disciplinas para evitar reprocesos durante la obra. También, para este momento se ha

finalizado la presupuestación, o se ha avanzado en gran medida, el cual es requerido para iniciar los procesos de construcción.

Las fases definidas se encuentran alineadas con los procesos que se efectúan al interior de las empresas de construcción entrevistadas, proporcionando un marco de trabajo coherente para establecer los indicadores, sin embargo, es importante aclarar que esta propuesta de fases debe ajustarse según la necesidad propia de cada organización, en las cuales pueden existir distintas fases con distintos objetivos. Las fases deben encontrarse definidas en las políticas BIM y estándares de la organización según la conclusión **C15**, esto incluye el PIR y el EIR, y específicamente para cada proyecto debe establecerse en el Plan de Ejecución BIM (BEP), el cual establece el cronograma, las fases y los hitos correspondientes al proyecto.

4.2.2 Procesos de proyecto

Como se mencionó anteriormente, los procesos forman parte de los componentes del sistema de medición del desempeño, debido a que son las actividades que se desarrollaran por parte del equipo del proyecto para cumplir con los objetivos definidos inicialmente. Para los proyectos basados en BIM, los procesos hacen referencia a los Usos BIM que se decidan aplicar al desarrollo del proyecto según la conclusión **C14** dada en el marco teórico. Así, al retomar los resultados de las entrevistas realizadas al panel de expertos y alineando esas respuestas con los Usos BIM definidos por la Penn State, se construye el listado de Usos BIM descrito en la Tabla 20, el cual se constituye como el eje Y de la matriz que define la estructura del sistema de medición del desempeño.

Tabla 20

Usos BIM seleccionados para el sistema de medición

Nombre	Descripción	Fuente
Autoría de diseños	Proceso en el que el software de creación de contenido se utiliza para desarrollar un modelo de información del proyecto constructivo basado en criterios que son importantes para la comunicación del diseño.	Penn State BIM KIT Camacol

Revisión de diseños	Proceso en el que las partes interesadas ven un modelo BIM y otros entregables para proporcionan sus comentarios y validar múltiples aspectos de diseño.	Penn State BIM KIT Camacol
Coordinación 3D	Proceso en el que se utiliza un software de coordinación 3D para determinar la identificación de conflictos geométricos mediante la comparación de modelos de sistemas de construcción.	Penn State BIM KIT Camacol
Estimación de Costos	Proceso en el que se utilizan modelos y software BIM para la generación de cuantificaciones precisas y estimaciones de costos a lo largo del ciclo de vida de un proyecto	Penn State BIM KIT Camacol
Análisis de desempeño de especialidades	Proceso en el cual se utiliza software especial para realizar las distintas validaciones necesarias en cada disciplina, como el cálculo estructural, el desempeño energético, lumínico, etc.	Penn State

La selección de estos Usos BIM particulares se debe a su amplia aplicación en los procesos actuales de diseño de vivienda VIS, y su importancia en la producción de los entregables y la definición de la idoneidad del producto final previo a su ejecución. Es importante resaltar que la aplicación de los usos depende de las políticas definidas en cada empresa, por lo que no todas las empresas realizan los mismos Usos BIM, así como sus procesos y tareas internas pueden variar entre organizaciones. Debido a lo anterior, para su estandarización en la presente propuesta, se usarán las definiciones dadas por la Penn State (The Computer Integrated Construction Research Program, 2010) y el BIM KIT desarrollado por Camacol (BIM Forum Colombia, 2020), de tal manera que se establece como un marco común de actuación en cada proceso, apegándonos a los mínimos definidos por estos documentos como políticas del sistema de medición, en que la aplicación puntual en cada organización dependerá de sus propias políticas.

Entregables de proyecto

Los procesos anteriormente descritos producen varios entregables, tanto los entregables claves del proyecto tales como la planimetría de radicación para licencia de construcción o el presupuesto del proyecto; así como entregables que forman parte de los procesos como informes de coordinación y reportes de entregas. Los entregables se establecen en el MIDP como se definió en el marco teórico, los cuales serán utilizados en el sistema de medición para determinar el avance de los procesos de diseño y, a su vez, el avance del proyecto en la fase de diseño. Se propone un listado

de entregables de ejemplo para el sistema, con el cual se define la estructura de medición de la propuesta, sin embargo, en cada organización se debe ajustar según los entregables propios, así como los hitos en los cuales se deben producir y entregar estos.

4.2.3 Criterios de éxito para la medición del desempeño

El éxito del proyecto depende del cumplimiento de los objetivos definidos por los criterios de éxito, como se mencionó en las conclusiones **C04** y **C05** dadas en el marco teórico, de tal manera que el sistema de medición debe enfocarse en medir y controlar el desempeño de los procesos que buscan el cumplimiento de estos objetivos. El conjunto de criterios de éxito seleccionados para el sistema de medición es: Costo, Tiempo, Calidad, Ambiental, Comunicación, BIM, tal como aparecen en la Figura 11. Esta selección se realizó basado en los criterios hallados durante la revisión de literatura que fueron sometidos al proceso de metainferencias, de ahí se extrajeron estos criterios que se determinaron relevantes para el desarrollo de los proyectos de vivienda VIS, adicionalmente se añadió un criterio relacionado con la implementación de BIM, dado que al ser proyectos basados en BIM, el desempeño está directamente relacionado con la aplicación de BIM en los procesos, como se indica en la conclusión **C05**. Cada criterio seleccionado será medido en los procesos donde aplique, a través del uso conjunto de indicadores predictivos o *leading*, e indicadores de resultados o *lagging*, con el fin de tener una visión más completa y holística del desempeño del proyecto en general, como se menciona en la conclusión **C08**. La selección y creación de estos indicadores se basaron en los resultados de la revisión de literatura, los cuales además deben tener la capacidad de ser medidos a través de los datos proporcionados por las herramientas BIM, para aprovechar el potencial de estas, según se explica en la conclusión **C13**.

Figura 11

Criterios de éxito seleccionados para el sistema de medición



Costo

Es uno de los principales criterios de éxito, pues se encuentra mencionado en todos los artículos revisados, así como fue mencionado por todos los entrevistados, siendo una preocupación

fundamental y parte del “triángulo de hierro” de la gestión de proyectos (Beatham et al., 2004; Toor & Ogunlana, 2010) Este criterio es clave debido a que se encuentra relacionado directamente con la rentabilidad y la viabilidad del proyecto como tal, por lo que llevar una correcta gestión de los costos es de suma importancia a través de todo su ciclo de vida. Los costos de un proyecto de construcción se dividen en costos directos e indirectos, siendo los costos directos aquellos que se pueden asociar directamente a las actividades o tareas del proyecto, como los costos de materiales de construcción o la mano de obra involucrada en las actividades. Por el contrario, los costos indirectos no se asocian directamente con ninguna actividad específica, sino que forma parte de aquellos costos que son necesarios para el desarrollo del proyecto como los costos generales de la construcción, salarios de ciertos roles de la compañía que participan en el proyecto o herramientas y andamios. Las mediciones relacionadas con el desempeño en términos de costo se realizarán únicamente sobre costos directos, los cuales están involucrados con el proyecto como tal, debido a que se pueden extraer de la información BIM desarrollada en los modelos. Los indicadores definidos para este criterio de éxito se usan para determinar los costos directos de los materiales, elementos y actividades del proyecto, y constatar su valor con una línea base definida previamente. Estos indicadores se pueden usar durante todas las fases del proyecto, pero específicamente se plantea su uso para las fases de la etapa de diseño, con el objetivo de controlar los costos con una mayor frecuencia para evitar desfases excesivos entre los valores presupuestados y los resultantes del proyecto.

Tiempo

Al igual que el costo, el tiempo también fue uno de los criterios mencionado por todos los artículos consultados y seleccionados para la definición de los criterios de éxito de un proyecto de construcción, y también pertenece al ya mencionado “triángulo de hierro”. El tiempo es uno de los criterios más importantes a considerar debido a estar profundamente ligado con los intereses de todos los participantes de los proyectos, pues determinar aspectos como la rentabilidad, la productividad y eficiencia, e incluso la viabilidad y la oportunidad de negocio. Para proyectos como la vivienda VIS el tiempo es un aspecto crucial, pues son proyectos que cuentan con una línea de tiempo bastante ajustada tanto para su planeación y desarrollo como para su ejecución. La medición del tiempo se hará con base en las fases de proyecto definidas anteriormente, esto a través de indicadores que miden el porcentaje de avance y el cumplimiento de los hitos y entregables definidos en la planificación, con el objetivo de medir el desfase entre los tiempos

planificados y los tiempos reales del proyecto durante las etapas de diseño y poder evitar y/o minimizar retrasos.

Calidad

La calidad es el tercer criterio que forma parte del “Triángulo de hierro” junto con el tiempo y el costo, la cual se determina en las condiciones iniciales de la contratación del proyecto, aunque también se puede encontrar su definición en documentos adicionales. Estos requerimientos de calidad buscan obtener el mejor producto que cumpla con la expectativa del cliente respecto al bien inmueble que está adquiriendo bajo una perspectiva de usuario, y de igual manera se busca el cumplimiento de las normativas y estándares que son requerimientos estatales, asegurando además la viabilidad técnica del proyecto, su constructibilidad y durabilidad en el tiempo. Un desempeño excelente de la calidad puede generar una mayor satisfacción del cliente, lo cual repercute directamente sobre la imagen y reputación de la organización, facilitando la posibilidad de nuevos negocios; así como también puede identificar los problemas que surgen en el desarrollo del proyecto y tomarse acciones para mitigar su impacto, previniendo y disminuyendo el re-trabajo y mejorando la eficiencia de la construcción. La medición de la calidad se realizará basado en los entregables del proyecto, mediante indicadores que identificaran problemáticas de carácter técnico y constructivo, además de verificar el cumplimiento de los requerimientos normativos, con el objetivo de cuantificar la cantidad de problemas y/o asuntos que aparezcan durante el desarrollo del diseño y determinar si los entregables cumplen con un nivel idóneo de calidad.

Ambiental

Es innegable que existe, a nivel global, un interés creciente por aspectos medioambientales debido a la actual crisis climática. Debido a esto industrias como la construcción, que es una de las industrias más contaminantes (Presley & Meade, 2010). se encuentran cada vez más involucradas con acciones que permitan mitigar su impacto medioambiental. En el desarrollo de proyectos de construcción de vivienda VIS estos aspectos han tomado mayor relevancia, incluyendo el interés en los beneficios económicos presentes en el crédito constructor para proyectos sostenibles, de tal manera que sirvan para promover cambios que permitan disminuir el impacto medioambiental que tienen estas edificaciones. La medición de criterios ambientales se realizará basada en la información presente en los modelos, la cual servirá para realizar los análisis energéticos y de consumo de agua, así como también se hará un seguimiento al cumplimiento de los entregables para la certificación de sostenibilidad EDGE, CASA o el solicitado por parte de la organización.

Comunicación

Del conjunto de criterios hallados en la revisión de literatura, se identificó la comunicación y colaboración entre los distintos miembros como un criterio clave para el correcto control y gestión del proyecto. Su importancia es cada vez mayor en la medida que existen más participantes y actores en los procesos de desarrollo, por lo que la coordinación entre todos los miembros resulta fundamental en la consecución de los distintos objetivos del proyecto. En las fases de diseño, una adecuada comunicación permite una mayor integración tanto de las disciplinas del proyecto como de las personas y el componente humano. Dada la implementación de metodologías y herramientas BIM, se busca la mejora de las capacidades colaborativas al establecer claramente procesos de intercambio de información mediante la definición de políticas como el Plan de Ejecución BIM (BEP) y tecnologías como los ambientes comunes de datos (CDE) que permiten centralizar la información y la comunicación del proyecto. La medición de la comunicación se hará basada en el ambiente común de datos como espacio donde se realizan las principales comunicaciones del proyecto, dado que en esta plataforma se establecen los procesos de intercambio de información y se podrá medir la cantidad y frecuencia en la que se comparte entre los miembros, las distintas entregas definidas en los hitos y la planificación, la cantidad de requerimientos de información y/o solicitudes de cambio, junto con la velocidad de respuesta por parte de los miembros participantes, con el objetivo de determinar la integración entre los miembros y el cumplimiento con los requerimientos de comunicación.

BIM

Este criterio de medición no fue levantado durante el proceso de revisión de literatura, sino que forma parte integral de la propuesta del sistema de medición del desempeño debido a que se encuentra basada en metodologías, procesos y tecnologías BIM. En consecuencia, se observa la necesidad de establecer indicadores que garanticen no solo una correcta implementación BIM, sino que también garantice que se tenga un nivel de madurez adecuado. De la misma manera se debe garantizar que los modelos y el ambiente común de datos se encuentren estructurados y con la información idónea, con el objetivo de que la información almacenada en estos modelos y plataformas permitan la medición de los demás criterios definidos en esta propuesta de manera correcta.

4.3 Medición del desempeño en procesos de diseño mediante indicadores

Esta sección describe los distintos procesos de diseño que serán medidos, una vez ha sido definida la estructura y los componentes del sistema de medición del desempeño. La Tabla 21 presenta el listado completo de indicadores que forman parte de este sistema, cada indicador se encuentra asociado a un criterio de éxito, y de igual manera cada indicador se mide para un proceso de diseño (Uso BIM) definido según lo descrito en la conclusión C14. En total, se definieron 17 indicadores para la medición de los procesos para todo el sistema.

Tabla 21

Indicadores del sistema de medición del desempeño en diseño usando herramientas BIM

Proceso (Uso BIM)	Indicador	Criterios de Éxito	Tipo de indicador (KPI - KPO)	Fuente de información
Autoría de diseño	Tiempo de producción del diseño	Tiempo	KPO	CDE
	Desarrollo de diseño y planos	Tiempo	KPI	CDE
	% Cumplimiento de estándares	BIM	KPI	Modelo
	% Cumplimiento de políticas	BIM	KPI	Modelo
	Tamaño del paquete de información metadatos	BIM	KPI	Modelo
	Índice de validación de elementos geométricos	BIM	KPI	Modelo
Revisión de diseño	Latencia entre consultas	Comunicación	KPI	CDE
	% de RFI vencidos	Comunicación	KPI	CDE
	Cantidad de RFI	Calidad	KPI	CDE
	% de RFI resueltas	Calidad	KPI	CDE

Coordinación técnica	Cantidad de interferencias detectadas	Calidad	KPI	Modelo
	% de Interferencias resueltas	Calidad	KPI	Modelo
Estimación de costo	Meta de costo de construcción	Costo	KPO	Modelo
	Costo sistema estructural	Costo	KPI	Modelo
	Costo sistemas MEP	Costo	KPI	Modelo
	Costo de acabados	Costo	KPI	Modelo
Análisis técnico de diseños	Cumplimiento de certificación EDGE	Ambiental	KPO	CDE
	Eficiencia energética	Ambiental	KPI	Modelo
	Eficiencia consumo agua	Ambiental	KPI	Modelo

Para el desarrollo del sistema de medición del desempeño se establecieron unas características que forman parte de todos los indicadores, estas características serán presentadas a modo de ficha técnica explicando cada uno de los indicadores para cada uso BIM:

- **Nombre del indicador:** Define el nombre asignado para cada indicador.
- **Tipo de indicador:** Determina si el indicador es un indicador de proceso (que se mide frecuentemente y/o en tiempo real) o un indicador de resultado (solo se mide una vez o en el cumplimiento de cada hito).
- **Objetivo:** Indica para que se va a realizar la medición, que se espera medir y mostrar con ese indicador.
- **Criterio:** Indica a que criterio de éxito esta alineado el indicador.
- **Insumos para el cálculo:** Describen cuales son los datos que requiere el indicador para medir y/o realizar los cálculos necesarios para mostrar.
- **Obtención de datos:** Describe, de manera resumida, de que fuente de información provienen los datos y, de ser necesario, como puede extraerse esa información.
- **Fórmula:** Dado que los indicadores usualmente se presentan como porcentajes, índices, sumatorias o cocientes que muestran las relaciones entre los datos, es necesario definir la fórmula matemática que se utiliza para calcular el indicador.
- **Tipo de dato de indicador:** Relacionado con el punto anterior, define el tipo de dato resultante posterior al cálculo, que puede ser un numero entero que indica cantidades, porcentajes, o índices que suelen ser decimales.

- **Automatización:** Describe que tan automatizado es el proceso de medición, obtención de datos y cálculo del indicador, según la siguiente escala:
 - N0 - No está automatizado, hay que introducir manualmente los datos para realizar la medición.
 - N1 - Levemente automatizado, el usuario tiene que añadir datos faltantes para realizar la medición.
 - N2 - Ampliamente automatizado, el usuario tiene que realizar actividades como ejecutar un script para extraer la información necesaria de la medición.
 - N3 - Completamente automatizado, no requiere intervención del usuario para obtener los datos y realizar la medición.

4.3.1 Medición de la autoría de diseños

La autoría de diseños se define como el proceso en el que el software de creación de contenido se utiliza para desarrollar un modelo de información del proyecto constructivo basado en criterios que son importantes para la comunicación del diseño (BIM Forum Colombia, 2020; Planbim, 2019). De esta manera, el objetivo principal de este Uso BIM es desarrollar los diseños de las distintas especialidades o disciplinas que conforman un proyecto, junto al conjunto de entregables correspondientes para su uso en fases posteriores, principalmente el desarrollo de la planimetría y especificaciones técnicas para la ejecución (construcción) del proyecto. Para lograrlo, se realiza un modelo BIM del proyecto o parte de este, la cual contendrá la información geométrica y de datos de los elementos del proyecto, así como también permitirá el desarrollo de la documentación planimétrica en ese mismo modelo (Eastman et al., 2011). Debido a lo anterior, el control del proceso de autoría de diseño es clave para lograr cumplir con los criterios de éxitos del proyecto. A continuación, se describen los distintos indicadores definidos para la medición de este proceso.

Meta de tiempo para la producción del diseño

Nombre del indicador	Meta de tiempo para la producción del diseño
Tipo de indicador	Indicador de resultado
Frecuencia	Una vez al finalizar la etapa de diseño
Objetivo	Calcular el porcentaje de la variación entre los tiempos para el desarrollo de los diseños definidos en los contratos, con respecto al tiempo real del desarrollo de diseño. Un valor positivo indica un retraso con respecto al tiempo originalmente definido para el desarrollo del proceso.

Criterio	Tiempo
Insumos para el calculo	1) Tiempo definido en el contrato para el desarrollo de los diseños (TC) 2) Tiempo real del desarrollo de los diseños (TR)
Obtención de datos	TC se obtiene a partir de la información del contrato y la definición de fechas de los entregables. TR se obtiene de las transmisiones de información realizadas en la plataforma y el visto bueno por parte del responsable
Formula	$TD = (TR - TC / TC) \times 100$
Tipo de dato de indicador	Porcentaje
Automatización	N0

El objetivo de este indicador es calcular la variación entre el tiempo establecido para el desarrollo de los distintos diseños del proyecto, lo cuales fueron definidos en el contrato celebrado entre el cliente y cada consultor, y el tiempo real en el que se realizaron los diseños y se logró el cumplimiento de lo estipulado en el contrato. Para calcularlo, la información se extrae del plan de ejecución BIM BEP, el cual tiene definidas las fechas de inicio y fin de la etapa de diseño, las cuales deben coincidir con las fechas estipuladas en los contratos. Sin embargo, dado que el desarrollo de contrataciones responde a dinámicas que van más allá de la definición técnica, se plantea la captura de la información dentro de una **matriz general de datos**, en la cual se asignaran los tiempos contractuales exactos correspondientes a cada consultor. Para obtener el dato del tiempo real de desarrollo, se revisan las transmisiones realizadas en el ambiente común de datos CDE con la entrega final de los diseños que estén aprobados por parte del coordinador del proyecto o la parte responsable de recibir la información.

Cumplimiento de entregables por hito

Nombre del indicador	Cumplimiento de entregables por hito
Tipo de indicador	Indicador de resultado
Frecuencia	En cada hito del proyecto
Objetivo	Calcular el porcentaje de cumplimiento de los entregables proporcionados por los diseñadores para un hito determinado en relación con una cantidad de entregables requeridos
Criterio	Tiempo
Insumos para el calculo	1) Cantidad de entregables requeridos por hito (ERh) 2) Cantidad de entregables proporcionados por hito (EPh)

Obtención de datos	El dato ERh se obtiene en la definición del MIDP de las políticas BIM El dato EPh se obtiene de la entrega realizada a través de informes de transmisión en el CDE por cada hito
Formula	$CEnt = \frac{EPh * 100}{ERh}$
Tipo de dato de indicador	Porcentaje
Automatización	N1

El objetivo de este indicador es calcular el porcentaje de cumplimiento en la entrega de la información establecida para un hito específico por parte de los consultores. Cada hito tiene definido un conjunto de entregables que deben ser entregados utilizando el ambiente común de datos (CDE). Dado que la producción de información y entregables son resultados del proceso de autoría y desarrollo de diseños, medir el cumplimiento de las entregas forma parte de sus responsabilidades. Para calcular este indicador, es necesario obtener el listado completo de entregables definidos en el Plan maestro de entrega de información (MIDP), en este plan se especifica la cantidad y tipo de entregables que deben ser desarrollados por los consultores para cada hito determinado. El MIDP se encuentra definido dentro del BEP, cargando esa información en la **matriz general de datos** del proyecto, en donde se usará esa información como base para la medición del indicador. La cantidad de entregables proporcionados será obtenida de la información de transmisiones extraídas del CDE, con estos dos datos, se podrá medir el cumplimiento de los entregables para un determinado hito. Al ser un indicador que se mide posterior a la entrega de la información correspondiente para cada hito, se considera un indicador de resultado.

Porcentaje de cumplimiento de estándares BIM

Nombre del indicador	Porcentaje de cumplimiento de estándares BIM
Tipo de indicador	Indicador de proceso
Frecuencia	Tiempo real
Objetivo	Determinar el cumplimiento del modelo con los estándares BIM definidos en las políticas, principalmente en el BEP del proyecto
Criterio	BIM
Insumos para el calculo	1) Porcentaje cumplimiento de políticas 2) Porcentaje contenido paquete de información 3) Porcentaje validación elementos geométricos

Obtención de datos	Son indicadores que forman parte del sistema de medición, por lo que son calculados de forma independiente.
Formula	$\%CumBIM = \frac{\%CumPol + \%PaqInf + \%ValGeo}{3}$
Tipo de dato de indicador	Porcentaje
Automatización	N3

El objetivo de este indicador es tener un valor general de cumplimiento de los estándares BIM definidos para el proyecto, basado en otros indicadores que se encargan de medir distintos aspectos de la gestión BIM en el proyecto. El hecho de que estos indicadores se midan de manera independiente busca poder medir y controlar estos aspectos de forma particular, para poder intervenir y realizar correcciones según sea necesario. Para el cálculo de este indicador se utiliza un promedio aritmético, dado que los tres datos que son insumos para este indicador tienen los mismos pesos relativos o importancia en el dato. Este indicador forma parte del proceso de autoría de diseño debido a que son los consultores y/o diseñadores los responsables de garantizar el cumplimiento de los estándares y requerimientos establecidos en las políticas BIM, principalmente el BEP del proyecto.

Porcentaje cumplimiento de políticas

Nombre del indicador	Porcentaje cumplimiento de políticas
Tipo de indicador	Indicador de proceso
Frecuencia	Semanal
Objetivo	Determinar el cumplimiento del modelo con los estándares BIM definidos en las políticas, principalmente en el BEP del proyecto
Criterio	BIM
Insumos para el calculo	<ol style="list-style-type: none"> 1) Verificación nomenclatura del modelo 2) Verificación nomenclatura de planos y vistas del modelo 3) Verificación sistema de coordenadas 4) Verificación segregación de modelos
Obtención de datos	Se obtienen directamente del modelo BIM correspondiente, usando una herramienta para extracción y evaluación de datos y cumplimiento de estándares.
Formula	$\%CumPol = \frac{Vnom + Vent + Vcor + Vseg}{4}$

Tipo de dato de indicador	Porcentaje
Automatización	N2

El objetivo de este indicador es verificar el cumplimiento que se ha hecho de las distintas políticas relacionadas con los modelos BIM, buscando garantizar su correcta gestión y manejo por parte de los consultores responsables del proceso de autoría de diseño. Para su cálculo se requieren cuatro datos:

1. Verificación nomenclatura del modelo: El BEP de cada proyecto debe definir un estándar para nombrar los archivos BIM; para la presente propuesta se usa el estándar de nomenclatura definido en la norma NTC-ISO 19650.1-2020, de tal manera que se verifica que el nombre del archivo cumpla con los campos descritos en este estándar.
2. Verificación nomenclatura planos y vistas del modelo: De igual manera, el BEP del proyecto define que los distintos entregables, sean planos, modelos, vistas, tablas, documentos y etc., deben presentar unas reglas de nomenclaturas; así, se verifica que el nombre de los entregables y las vistas del modelo cumplan con las reglas descritas en este estándar.
3. Verificación sistema de coordenadas: El BEP del proyecto debe indicar una estrategia de georreferenciación de los modelos BIM, determinando cual va a ser el sistema de coordenadas del sitio y la ubicación del modelo en este. Por lo tanto, se verifica que el modelo contenga el sistema de coordenadas definido y que los valores de la ubicación sean correctos.
4. Verificación segregación de modelos: El BEP determina una estrategia de segregación y federación, en la cual se define como será subdividido el proyecto en distintas partes para el desarrollo de los modelos BIM correspondientes. De esta manera, se verifica que el modelo cumpla con la segregación descrita.

Las verificaciones descritas anteriormente pueden realizarse de manera manual, revisando uno a uno los distintos entregables de información BIM, en todas ellas el cálculo es el mismo, la cantidad de elementos que cumplen correctamente con el requerimiento dividido en la cantidad de elementos totales, como se expresa en el siguiente ejemplo de la verificación de nomenclatura de los modelos:

$$\%Vnom = \frac{\text{Cantidad de modelos que cumplen con la nomenclatura}}{\text{Total de modelos}} * 100$$

Sin embargo, debido al volumen de la información, estos procesos se suelen realizar a través de herramientas digitales que permitan hacer más eficiente la verificación. Dado que todas las verificaciones tienen la misma importancia para el cálculo del indicador, se usa un promedio aritmético que suma los resultados de todas las verificaciones y lo divide entre el total de verificaciones realizadas.

Porcentaje contenido de paquete de información

Nombre del indicador	Porcentaje contenido de paquete de información
Tipo de indicador	Indicador de proceso
Frecuencia	Semanal
Objetivo	Determinar el cumplimiento del modelo con los requerimientos de información, en forma de metadatos, definidos en el BEP
Criterio	BIM
Insumos para el calculo	1) Verificación Información del proyecto 2) Verificación datos de sistemas de clasificación 3) Verificación Identificación de elementos 4) Verificación otros datos requeridos en el BEP
Obtención de datos	Se obtienen directamente del modelo BIM correspondiente, usando una herramienta para extracción y evaluación de datos y cumplimiento de estándares
Formula	$\%PaqInf = \frac{Vpro + Vscl + Vide + Vdat}{4}$
Tipo de dato de indicador	Porcentaje
Automatización	N2

El objetivo de este indicador es determinar el cumplimiento del modelo BIM, y los elementos al interior de este, con los requerimientos de información solicitados en el EIR y trasladados al BEP del proyecto. Los consultores deben atender estos requerimientos de información al interior de los modelos BIM desarrollados, por lo tanto, forman parte de las actividades que corresponden al uso BIM de Autoría de diseño. Para su cálculo se requieren cuatro datos:

1. Verificación de información del proyecto: El BEP define información básica de un proyecto como el nombre, código, localización, dirección, cliente, etc. La verificación

busca determinar si esta información se encuentra diligenciada al interior de los modelos BIM.

2. Verificación de datos del sistema de clasificación: Dentro de los requerimientos de información que forman parte del BEP, se establece la necesidad de clasificar los elementos del modelo mediante una *Work Breakdown Structure* (Estructura de desglose del trabajo) WBS, la cual debe ser definida por la organización. De esta manera, se busca verificar que los elementos del modelo cuenten con los datos y la clasificación correspondiente según la WBS seleccionada.
3. Verificación de identificación de elementos: Los distintos elementos de los proyectos cuentan con datos requeridos para su identificación, por ejemplo, identificar una columna como C-01, o identificar una puerta como P-02; esta identificación es clave para realizar la documentación y los procesos de presupuestación, compras y ejecución del proyecto, por lo cual es necesario verificar que los elementos del modelo BIM contengan la información necesaria para su identificación en cumplimiento con lo requerido por el BEP del proyecto.
4. Verificación de otros datos requeridos en el BEP: Dado que cada organización es única, los requerimientos de información necesarios para cada proyecto pueden variar, por lo tanto, el BEP de cada proyecto define los requerimientos de información adicional que es requerida para el desarrollo de los proyectos, esto incluye principalmente datos que pueden ser usados en otras etapas del proyecto como construcción u operación y mantenimiento. Según el listado definido de datos e información requerida en los modelos, se realiza una verificación de que los elementos del modelo contengan efectivamente esa información.

Las verificaciones descritas anteriormente no pueden realizarse de manera manual dado el alto volumen de elementos que forman parte de un proyecto, esto hace que el proceso de verificación uno a uno sea ineficiente, por ellos es necesario apalancarse en herramientas tecnológicas que realicen esta revisión automáticamente, sin embargo, en todas ellas el cálculo es el mismo, la cantidad de elementos que cumplen correctamente con el requerimiento dividido en la cantidad de elementos totales, como se expresa en el siguiente ejemplo de la verificación de datos sistema de clasificación:

$$\%Vscl = \frac{\text{Cantidad de elementos con sistema de clasificación asignado}}{\text{Total de elementos del modelo}} * 100$$

Dado que todas las verificaciones tienen la misma importancia para el cálculo del indicador, se usa un promedio aritmético que suma los resultados de todas las verificaciones y lo divide entre el total de verificaciones realizadas.

Porcentaje de validación de elementos geométricos

Nombre del indicador	Porcentaje de validación elementos geométricos del modelo
Tipo de indicador	Indicador de proceso
Frecuencia	Semanal
Objetivo	Determinar el cumplimiento del modelo con los requerimientos geométricos y de modelado definidos en el BEP del proyecto
Criterio	BIM
Insumos para el calculo	1) Elementos en categoría correcta 2) Elementos ubicados correctamente 3) Conteo de elementos duplicados 4) Conteo de alertas por problemas en el modelo
Obtención de datos	Se obtienen directamente del modelo BIM correspondiente, usando una herramienta para extracción y evaluación de datos y cumplimiento de estándares.
Formula	No hay formula
Tipo de dato de indicador	Porcentaje
Automatización	N2

El objetivo de este indicador es medir el cumplimiento de los elementos del modelo BIM con los requerimientos de modelación y nivel de detalle gráfico y geométrico. Estos requerimientos son mencionados en el BEP de cada proyecto, formando parte del estándar de la organización, la cual suele tener una guía o estrategia de modelación. Esto se debe a que los modelos BIM contienen elementos geométricos que deben expresar con precisión las dimensiones, localización y demás aspectos necesarios para la cuantificación, presupuestación y construcción del proyecto. Debido a esto, la responsabilidad de garantizar una correcta definición geométrica radica en los consultores quienes realizan estos diseños y, por lo tanto, los modelos BIM, durante el proceso de autoría de diseño. Para calcular este indicador se requiere realizar cuatro verificaciones:

1. Elementos en la categoría correspondiente: en el proceso de modelación de elementos BIM es necesario asegurarse de que los elementos estén clasificados dentro de la categoría de

modelación correspondiente, lo cual es de vital importancia para evitar problemas de información como cuantificaciones incorrectas. Debido a esto, se realiza una verificación de los elementos para detectar aquellos que estén en categorías incorrectas y así poder asignarlos a una categoría correcta.

2. Elementos ubicados correctamente: Debido a que el modelo es un conjunto de objetos tridimensionales, la correcta ubicación de estos es crítica en el desarrollo de los diseños. Es necesario garantizar que los elementos se encuentren asignados a los niveles y espacios determinados, evitando errores y malinterpretaciones de los datos. Para esto, se realiza una verificación que busca determinar si un elemento se encuentra en la ubicación correcta.
3. Conteo de elementos duplicados: El desarrollo de modelos BIM puede generar errores como la duplicación de elementos del modelo, lo cual conllevaría a problemáticas relacionadas con la estimación de cantidades para compras, o la presupuestación de materiales. Por lo tanto, se realiza una verificación que permita identificar la cantidad de elementos duplicados en el modelo.
4. Conteo de alertas por problemas en el modelo: El desarrollo de modelos BIM puede generar errores que las distintas herramientas de modelado detectan, por ejemplo, elementos solapados, problemas de modelación geométrica o falta de información; estas alertas las almacena el software de modelado y deben ser corregidas para lograr un modelo de alta calidad.

Las verificaciones descritas anteriormente no pueden realizarse de manera manual dado el alto volumen de elementos que forman parte de un proyecto, esto hace que el proceso de verificación uno a uno sea ineficiente, por ellos es necesario apalancarse en herramientas tecnológicas que realicen esta revisión automáticamente, sin embargo, en todas ellas el cálculo es el mismo, la cantidad de elementos que cumplen correctamente con el requerimiento dividido en la cantidad de elementos totales, como se expresa en el siguiente ejemplo de la verificación de elementos en la categoría correcta:

$$Catg = \frac{\text{Cantidad de elementos asignados a la categoría correcta}}{\text{Total de elementos del modelo}} * 100$$

Dado que todas las verificaciones tienen la misma importancia para el cálculo del indicador, se usa un promedio aritmético que suma los resultados de todas las verificaciones y lo divide entre el total de verificaciones realizadas.

Velocidad de intercambio de información

Nombre del indicador	Velocidad de intercambio de información
Tipo de indicador	Indicador de proceso
Frecuencia	Semanal
Objetivo	Determinar la frecuencia en la que se comparten los modelos en el ambiente común de datos (CDE)
Criterio	Comunicación
Insumos para el calculo	1) Fecha actual 2) Fechas de publicación de la última versión del modelo
Obtención de datos	La cantidad de archivos y versiones se puede obtener exportando la información del CDE
Formula	Se miden los días entre la última publicación del modelo con la fecha actual.
Tipo de dato de indicador	Número entero
Automatización	N2

El objetivo de este indicador es medir la velocidad con la que los distintos consultores comparten información, principalmente modelos BIM, con el resto del equipo del proyecto, a través del ambiente común de datos CDE, según los requerimientos definidos en la estrategia de comunicación dentro del BEP del proyecto. Esta estrategia busca que la información se mantenga constantemente actualizada, por lo que se determina una frecuencia mínima de intercambio de información durante el desarrollo de los diseños, adicional a las entregas estipuladas en el MIDP. Para calcular este indicador se necesitan dos datos, la fecha del día que se realiza la medición, y la fecha de la última vez que se cargó el modelo, con estos dos datos se calcula la diferencia de días entre ambas fechas. Generalmente, las políticas BIM establecen una frecuencia mínima de un intercambio de información a la semana, para evitar que los diseños avancen demasiado con información que pueda ser obsoleta.

4.3.2 Medición de la revisión de diseño

La revisión de diseños se define como el proceso en el que las partes interesadas ven un modelo BIM y otros entregables para proporcionan sus comentarios y validar múltiples aspectos de diseño

(BIM Forum Colombia, 2020; Planbim, 2019). De esta forma, el objetivo principal de este Uso BIM es garantizar la idoneidad y calidad de los diseños del proyecto mediante la revisión de estos por parte de otros miembros del equipo, encargados de validar y aprobar o rechazar estos diseños. Para lograrlo, los entregables y la información del proyecto como modelos se comparte en el ambiente común de datos CDE de la organización, donde se efectúa el proceso de revisión de diseños, a través del uso de la herramienta “incidencias” (*issues, task, etc.*), esta herramienta permite gestionar y comunicar los distintos asuntos que resultan de la revisión de diseños, como comentarios, observaciones, solicitudes de cambio, de información, errores, problemas, etc.; las incidencias son unos formularios virtuales que se almacenan en el CDE, de tal manera que contienen información estructurada como la siguiente:

- Título de la incidencia: Título que un usuario le da a la incidencia creada.
- Descripción de la incidencia: Campo de texto largo que permite describir la problemática, comentario u observación correspondiente.
- Estado: Indica el estado actual de la incidencia, por ejemplo, si esta se encuentra abierta, respondida, cerrada, por revisar, etc.
- Responsable: Indica el responsable de atender la incidencia, sea este un usuario, una empresa o un rol determinado.
- Fecha de vencimiento: Indica la fecha límite que se definió para atender la incidencia, la cual debe cumplir con lo definido en las políticas BIM en el BEP del proyecto.

Debido a lo anterior, el control del proceso de revisión de diseños es clave para lograr cumplir con los criterios de éxitos del proyecto, especialmente la calidad. A continuación, se describen los distintos indicadores definidos para la medición de este proceso.

Cantidad de Incidencias y Solicitudes de información en el proyecto

Nombre del indicador	Cantidad de RFI
Tipo de indicador	Indicador de proceso
Frecuencia	Tiempo real
Objetivo	Cuantificar la cantidad total de incidencias existentes en el proyecto.
Criterio	Calidad

Insumos para el calculo	1) Cantidad de incidencias en el CDE
Obtención de datos	La cantidad de incidencias se puede obtener exportando la información de CDE
Formula	No hay formula
Tipo de dato de indicador	Número entero
Automatización	N3

El objetivo de este indicador es medir la cantidad total de incidencias creadas en un proyecto. Para calcularlo es necesario revisar la información dentro del ambiente común de datos CDE, el cual proporciona la cantidad de incidencias creadas. El valor de este indicador radica en dos puntos, el primero, sirve de base para el cálculo de los otros indicadores relacionados con las incidencias en el CDE, y segundo, a pesar de ser un indicador de proceso que se encuentra medido en tiempo real, al finalizar el proyecto sirve para crear un levantamiento de históricos que permita comparar y establecer líneas base para futuros indicadores y procesos de medición.

Porcentaje de incidencias y solicitudes de información solucionados

Nombre del indicador	Porcentaje de RFI solucionados
Tipo de indicador	Indicador de proceso
Frecuencia	Semanal
Objetivo	Cuantificar la cantidad total de incidencias que se han resuelto en el proyecto.
Criterio	Calidad
Insumos para el calculo	1) Cantidad de incidencias en el CDE (Trfi) 2) Cantidad de incidencias resueltas en el CDE (Rrfi)
Obtención de datos	La cantidad de incidencias se puede obtener exportando la información de CDE.
Formula	$\%SRFI = \frac{Rrfi * 100}{Trfi}$
Tipo de dato de indicador	Porcentaje
Automatización	N3

El objetivo de este indicador es medir la cantidad de incidencias que se han resuelto con relación a la cantidad total de incidencias del proyecto, con el fin de lograr un cumplimiento cercano al 100%, debido a que toda incidencia creada debe atenderse según lo estipulado en el BEP del

proyecto. Este indicador permite hacer un seguimiento de la atención a las observaciones y asuntos encontrados en el proyecto, el cual puede medirse bien sea por disciplina, consultor o por parte del proyecto. Para realizar el cálculo es necesario extraer dos datos del ambiente común de datos, el total de incidencias creadas, y la cantidad de incidencias que se han solucionado de la plataforma. Debido a que directamente en la plataforma se puede obtener el dato, se considera altamente automatizado, únicamente es necesario extraer el dato y presentarlo en formato de porcentaje como lo indica la fórmula definida.

Porcentaje de incidencias y solicitudes de información vencidas

Nombre del indicador	Porcentaje de RFI vencidos
Tipo de indicador	Indicador de proceso
Frecuencia	Semanal
Objetivo	Cuantificar la cantidad total de incidencias que están vencidas en el proyecto
Criterio	Comunicación
Insumos para el calculo	1) Cantidad de incidencias en el CDE (Trfi) 2) Cantidad de incidencias vencidas en el CDE (Brfi)
Obtención de datos	La cantidad de incidencias se puede obtener exportando la información de CDE
Formula	$\%VRFI = \frac{Brfi * 100}{Trfi}$
Tipo de dato de indicador	Porcentaje
Automatización	N3

El objetivo de este indicador es medir la cantidad de incidencias que se encuentran vencidas con relación a la cantidad total de incidencias del proyecto, con el fin de controlar la velocidad de respuesta por parte de los diseñadores, la cual está estipulada en el BEP del proyecto. Para realizar el cálculo se necesitan dos datos que provienen del ambiente común de datos, la cantidad de incidencias en el proyecto, y la cantidad de incidencias vencidas en el proyecto. Dado que en cada incidencia se establece una fecha de vencimiento, el indicador nos permite controlar que consultores están tardando más tiempo en atender las observaciones, cosa que puede ocasionar retrasos y problemáticas en el desarrollo de diseños.

4.3.3 Medición de la coordinación técnica de diseños

La coordinación técnica de diseños es definida como un proceso en el que se utiliza un software de coordinación 3D para determinar la identificación de conflictos geométricos mediante la comparación de modelos BIM de sistemas de construcción (BIM Forum Colombia, 2020; Planbim, 2019). El objetivo principal de este proceso es asegurar una correcta integración de las distintas disciplinas técnicas en el proyecto, detectando las potenciales interferencias entre los diseños técnicos en la etapa de diseño, evitando que estos problemas aparezcan en la construcción del proyecto y produzcan retrasos y sobrecostos (Bockstael & Issa, 2016; Bryde et al., 2013). Para lograrlo, se utilizan los modelos BIM creados en el proceso de autoría de diseño y, a través de un software de coordinación 3D, se crean modelos federados que contienen la información conjunta de varias especialidades técnicas del proyecto, el cual sirve de insumo para la detección de interferencias. Debido a lo anterior, el control del proceso de coordinación técnica es clave para lograr cumplir con los criterios de éxitos del proyecto, especialmente la calidad. A continuación, se describen los distintos indicadores definidos para la medición de este proceso.

Cantidad de interferencias detectadas

Nombre del indicador	Cantidad de Interferencias
Tipo de indicador	Indicador de proceso
Frecuencia	Semanal (Durante el periodo de coordinación)
Objetivo	Cuantificar la cantidad total de interferencias existentes en el proyecto.
Criterio	Calidad
Insumos para el calculo	1) Cantidad de interferencias detectadas
Obtención de datos	La cantidad de interferencias se obtiene mediante los reportes extraídos de los modelos de coordinación técnica
Formula	No hay formula
Tipo de dato de indicador	Cantidad
Automatización	N2

El objetivo de este indicador es medir la cantidad total de interferencias creadas en un proyecto. Para calcularlo es necesario realizar el proceso de coordinación técnica en un software de gestión BIM, este identificará la cantidad de interferencias y se podrá exportar el dato. El valor de este indicador radica en dos puntos, el primero, sirve de base para el cálculo de otro indicador

relacionados con las interferencias, y segundo, a pesar de ser un indicador de proceso que se encuentra medido en tiempo real, al finalizar el proyecto sirve para crear un levantamiento de históricos que permita comparar y establecer líneas base para futuros indicadores y procesos de medición.

Porcentaje de interferencias solucionadas

Nombre del indicador	Porcentaje de Interferencias solucionadas
Tipo de indicador	Indicador de proceso
Frecuencia	Semanal (Durante el periodo de coordinación)
Objetivo	Cuantificar la cantidad total de interferencias existentes en el proyecto.
Criterio	Calidad
Insumos para el calculo	1) Cantidad de interferencias detectadas (CI _t) 2) Cantidad de interferencias solucionadas (CI _s)
Obtención de datos	La cantidad de interferencias, tanto la cantidad total como las solucionadas, se obtiene mediante los reportes extraídos de los modelos de coordinación técnica
Formula	$\%Int = \frac{CI_s * 100}{CI_t}$
Tipo de dato de indicador	Porcentaje
Automatización	N2

El objetivo de este indicador es medir la cantidad de interferencias que se han resuelto con relación a la cantidad total de interferencias del proyecto, con el fin de lograr un cumplimiento cercano al 100%, debido a que toda interferencia debe atenderse según lo estipulado en el BEP del proyecto. Este indicador permite hacer un seguimiento de la atención a los conflictos encontrados en el proyecto, el cual puede medirse bien sea por disciplina, consultor o por parte del proyecto. Para realizar el cálculo es necesario extraer dos datos del reporte de coordinación exportado del software de gestión BIM, el total de interferencias creadas, y la cantidad de interferencias que se han solucionado. Al ser un indicador de proceso que se mide en cada ronda de coordinación, permite observar el estado actual de los conflictos detectados.

4.3.4 Medición de la Estimación del costo

La estimación de costos se define como el proceso en el que se utilizan modelos y software BIM para la generación de cuantificaciones precisas y estimaciones de costos a lo largo del ciclo de vida de un proyecto (BIM Forum Colombia, 2020; Planbim, 2019). El objetivo principal de este proceso es obtener una mayor precisión en el cálculo de las cantidades y la definición del presupuesto del proyecto, minimizando así el riesgo de la inversión, principalmente durante la etapa de construcción (Lu et al., 2019). Para lograrlo, se utilizan los modelos BIM creados en el proceso de autoría de diseño, extrayendo la información correspondiente a la cantidad de elementos constructivos y materiales para, posteriormente, usar bases de datos que contienen la información de insumos, análisis de precios unitarios APUs y estructura de desglose del trabajo (WBS), con el objetivo de determinar los costos del proyecto. Debido a que el modelo contiene principalmente información relacionada con los elementos constructivos, se utilizará exclusivamente para el cálculo de los costos directos de construcción. Como el proceso de estimación de cantidades es de gran importancia para la reducción del riesgo y la viabilidad del proyecto, el control del proceso es clave para lograr cumplir con el criterio de éxito de costos. A continuación, se describen los distintos indicadores definidos para la medición de este proceso.

Meta de costos de construcción

Nombre del indicador	Meta de costos de factibilidad
Tipo de indicador	Indicador de resultado
Frecuencia	Una vez al finalizar la etapa de diseño
Objetivo	Calcular la desviación de los costos de construcción que se presupuestaron al finalizar las etapas de diseño con respecto al costo planteado en la factibilidad del proyecto
Criterio	Costo
Insumos para el calculo	1) Costo definido en la factibilidad: $CosF$ 2) Costo final del presupuesto para construcción: $CosP$
Obtención de datos	$CosF$: Costo definido en una etapa anterior el cual es un insumo del proyecto para la etapa de diseño $CosP$: Costo realizado en el proceso de presupuestación enmarcado dentro del Uso BIM de estimación de costos
Formula	$MetCos = \frac{CosP - CosF}{CosF} * 100$
Tipo de dato de indicador	Porcentaje

Automatización	N0
----------------	----

El objetivo de este indicador es calcular la variación entre el costo definido durante la factibilidad como parte de la validación financiera del proyecto, en la etapa anterior de conceptualización, y el costo final presupuestado para la construcción, que es resultado del proceso de estimación de costos. Para calcular este indicador, es necesario dos datos, el costo objetivo definido en la factibilidad, el cual es un insumo de este proceso y debió establecerse en la matriz general de datos, y el costo final presupuestado para la construcción. Dado que el costo presupuestado del proyecto es un dato más complejo que requiere información adicional a la que se puede obtener a partir de modelos BIM, este indicador es un indicador de resultado que se mide una única vez, al finalizar las etapas de diseño y los procesos correspondientes al desarrollo del presupuesto.

Porcentaje de variación en la estimación de costos directos de la estructura

Nombre del indicador	Variación Estimación Costos Directos Estructura
Tipo de indicador	Indicador de proceso
Frecuencia	Mensual
Objetivo	Calcular la variación de los costos directos relacionados con los elementos estructurales con respecto a los costos definidos en la factibilidad del proyecto
Criterio	Costo
Insumos para el calculo	1) Costo estimado de la estructura calculado con base en el modelo (CMest) 2) Costo base de la estructura definido en la factibilidad (CFest)
Obtención de datos	El dato CMest se obtiene en el proceso de realizar la estimación de los costos directos de la estructura. El dato CFest se obtiene como parte de un valor definido en la factibilidad del proyecto
Formula	$\%VCDest = \frac{CMest - CFest}{CFest} * 100$
Tipo de dato de indicador	Porcentaje
Automatización	N2

El objetivo de este indicador es calcular la variación entre el costo directo para la estructura definido en la factibilidad y el costo directo estimado de la estructura para el momento de la

medición, que es resultado del proceso de estimación de costos, con el fin de visualizar y controlar este costo durante el desarrollo de los diseños estructurales. Para calcular este indicador, es necesario dos datos:

1. Costo directo base de la estructura definido en la factibilidad: durante el estudio de factibilidad del proyecto se estableció un costo objetivo de construcción para el proyecto, el cual sirve de base para extraer los costos directos e indirectos a partir de índices, que provienen de análisis estadísticos e históricos y sirven para establecer una línea base de costos en etapas tempranas (González Forero, 2011). Así, utilizando estos indicadores se establece un valor aproximado del costo directo de la estructura, que será usado en la medición de este indicador.
2. Costo directo estimado de la estructura obtenido del modelo: el desarrollo de los diseños técnicos de la estructura en un modelo BIM contiene la información precisa de los elementos constructivos, la cual sirve para estimar los costos directos de la estructura. Para obtener este costo es preciso extraer los datos de las cantidades de elementos a partir de los modelos BIM, los cuales indicarán el volumen, área y peso de estos elementos estructurales. Adicionalmente, es necesario identificar los datos de los costos propios de las APU, que serán obtenidos a través del responsable del presupuesto. Así, se definieron los siguientes insumos para el cálculo del costo estimado de la estructura:
 - a. Cantidades de elementos estructurales de concreto medidos en metros cúbicos (Conm³)
 - b. Cantidades de elementos de mampostería estructural medidos por metros cuadrados (Maem²)
 - c. Cantidades de elementos estructurales metálicos medidos por kilogramos (MetK)
 - d. Análisis de precios unitarios APU de las distintas actividades (Ccon=Costos concreto, Cmae=Costos mampostería, Cmet=Costos metálicos)

Con estos insumos se procede a calcular el costo siguiendo la fórmula:

$$\sum_{i=1}^n Ccon_i \times Conm_i^3 + \sum_{i=1}^n Cmae_i \times Maem_i^2 + \sum_{i=1}^n Cmet_i \times MetK_i$$

Esta fórmula multiplica el costo por metro cúbico (Ccon) por la cantidad de metros cúbicos (Conm³) para cada elemento de concreto y luego suma estos productos para obtener el costo total de los elementos de concreto estructurales, considerando los diferentes costos de concreto para cada elemento. Este procedimiento se repite para los elementos de

mampostería estructural y los elementos metálicos, de tal manera que la suma de estos totales da como resultado el costo directo estimado de la estructura.

Este indicador de variación permite tener un control respecto a el desarrollo del diseño estructural y su afectación a los costos previstos en la factibilidad, para de esta manera tomar las acciones correctivas necesarias. Por lo tanto, su utilidad se ve reflejada en tanto sirve como indicador de proceso.

Porcentaje de variación en la estimación de costos directos de los diseños técnicos MEP

Nombre del indicador	Variación Estimación Costos Directos MEP
Tipo de indicador	Indicador de proceso
Frecuencia	Mensual
Objetivo	Calcular la variación de los costos directos relacionados con los elementos MEP con respecto a los costos definidos en la factibilidad del proyecto
Criterio	Costo
Insumos para el calculo	1) Costo estimado de los diseños MEP calculado con base en el modelo (CM _{mep}) 2) Costo base de diseños MEP definido en la factibilidad (CF _{mep})
Obtención de datos	El dato CM _{mep} se obtiene en el proceso de realizar la estimación de los costos directos de la estructura. El dato CF _{mep} se obtiene como parte de un valor definido en la factibilidad del proyecto
Formula	$\%VCD_{mep} = \frac{CM_{mep} - CF_{mep}}{CF_{mep}} * 100$
Tipo de dato de indicador	Porcentaje
Automatización	N2

El objetivo de este indicador es calcular la variación entre el costo directo para los diseños técnicos MEP (acrónimo de *Mechanical, Electrical & Plumbing*) definido en la factibilidad, y el costo directo estimado de estos diseños MEP para el momento de la medición, que es resultado del proceso de estimación de costos, con el fin de visualizar y controlar este costo durante el desarrollo de los diseños. Para calcular este indicador, es necesario dos datos:

1. Costo directo base de los diseños MEP definido en la factibilidad: durante el estudio de factibilidad del proyecto se estableció un costo objetivo de construcción para el proyecto, el cual sirve de base para extraer los costos directos e indirectos a partir de índices, que provienen de análisis estadísticos e históricos y sirven para establecer una línea base de costos en etapas tempranas (González Forero, 2011). Así, utilizando estos indicadores se establece un valor aproximado del costo directo de los diseños MEP, que será usado en la medición de este indicador.
2. Costo directo estimado de las instalaciones MEP obtenido del modelo: el desarrollo de los diseños técnicos de las instalaciones MEP en un modelo BIM contiene la información precisa de los elementos constructivos, la cual sirve para estimar los costos directos. Para obtener este costo es preciso extraer los datos de las cantidades de elementos a partir de los modelos BIM, los cuales darán las cantidades de equipos, accesorios, y cantidades de longitudes de tuberías y cableado. Adicionalmente, es necesario identificar los datos de los costos propios de las APUs, que serán obtenidos a través del responsable del presupuesto. Así, se definieron los siguientes insumos para el cálculo del costo estimado de las instalaciones MEP:
 - a. Cantidades de elementos lineales, como cables o tubería medidos en metros (Elm)
 - b. Cantidades de equipos técnicos MEP cuantificados por unidad (EqU)
 - c. Cantidades de accesorios como uniones, tees, codos y demás cuantificados por unidad (AcU)
 - d. Análisis de precios unitarios APUs de las distintas actividades (Cl=Costos elementos lineales, Ceq=Costos equipos, Cac=Costos accesorios)

Con estos insumos se procede a calcular el costo siguiendo la fórmula:

$$\sum_{i=1}^n Cl_i \times Elm_i + \sum_{i=1}^n Ceq_i \times EqU_i + \sum_{i=1}^n Cac_i \times AcU_i$$

Esta fórmula multiplica el costo por metro lineal (Cl) por la cantidad de metros lineales (Elm) para cada elemento lineal como tubería o cableado, también se multiplica el costo unitario (Ceq y Cac) de cada equipo y accesorios por la cantidad cada equipo y accesorio (EqU y AcU) y luego suma estos productos para obtener el costo directo total de los elementos MEP.

Este indicador de variación permite tener un control respecto a el desarrollo de los diseños MEP y su afectación a los costos previstos en la factibilidad, para de esta manera tomar las acciones correctivas necesarias. Por lo tanto, su utilidad se ve reflejada en tanto sirve como indicador de proceso.

Porcentaje de variación en la estimación de costos directos de los acabados arquitectónicos

Nombre del indicador	Variación Estimación Costos Directos MEP
Tipo de indicador	Indicador de proceso
Frecuencia	Mensual
Objetivo	Calcular la variación de los costos directos relacionados con los elementos arquitectónicos con respecto a los costos definidos en la factibilidad del proyecto
Criterio	Costo
Insumos para el calculo	1) Costo estimado de los diseños arquitectónicos calculado con base en el modelo (CMarq) 2) Costo base de la arquitectura definido en la factibilidad (CFarq)
Obtención de datos	El dato CMarq se obtiene en el proceso de realizar la estimación de los costos directos de la estructura. El dato CFarq se obtiene como parte de un valor definido en la factibilidad del proyecto
Formula	$\%VCDarq = \frac{CMarq - CFarq}{CFarq} * 100$
Tipo de dato de indicador	Porcentaje
Automatización	N2

El objetivo de este indicador es calcular la variación entre el costo directo para los elementos de obra gris no estructurales y acabados del proyecto (llamados diseños arquitectónicos), el cual está definido en la factibilidad, y el costo directo estimado de estos diseños arquitectónicos para el momento de la medición, que es resultado del proceso de estimación de costos, con el fin de visualizar y controlar este costo durante el desarrollo de los diseños. Para calcular este indicador, es necesario dos datos:

1. Costo directo base de los diseños arquitectónicos definido en la factibilidad: durante el estudio de factibilidad del proyecto se estableció un costo objetivo de construcción para el

proyecto, el cual sirve de base para extraer los costos directos e indirectos a partir de índices, que provienen de análisis estadísticos e históricos y sirven para establecer una línea base de costos en etapas tempranas (González Forero, 2011). Así, utilizando estos indicadores se establece un valor aproximado del costo directo de los diseños arquitectónicos, que será usado en la medición de este indicador.

2. Costo directo estimado de los diseños arquitectónicos obtenido del modelo: el desarrollo de los diseños arquitectónicos en un modelo BIM contiene la información precisa de los elementos constructivos, la cual sirve para estimar los costos directos. Para obtener este costo es preciso extraer los datos de las cantidades de elementos a partir de los modelos BIM, los cuales darán las cantidades de elementos arquitectónicos tales como puertas y ventanas, y cantidades de superficie como acabados, muros y cubiertas. Adicionalmente, es necesario identificar los datos de los costos propios de las APU, que serán obtenidos a través del responsable del presupuesto. Así, se definieron los siguientes insumos para el cálculo del costo estimado de los diseños arquitectónicos:
 - a. Cantidades de elementos de superficie, como muros, enchapes, cubiertas, etc, medidos en metros cuadrados (Am^2)
 - b. Cantidades de elementos arquitectónicos cuantificados por unidad (EaU)
 - c. Análisis de precios unitarios APU de las distintas actividades (Caq =Costos elementos arquitectónicos de superficie, Cel =Costos elementos arquitectónicos)

Con estos insumos se procede a calcular el costo siguiendo la fórmula:

$$\sum_{i=1}^n Caq_i \times Am_i^2 + \sum_{i=1}^n Cel_i \times EaU_i$$

Esta fórmula multiplica el costo por metro cuadrado (Caq) por la cantidad de metros cuadrados (Am^2) para los elementos como muros, suelos, cubiertas, techos y revestimientos, también se multiplica el costo unitario (Cel) de cada elemento por cada elemento como ventanas, puertas (EaU) y luego suma estos productos para obtener el costo directo total de los elementos arquitectónicos.

Este indicador de variación permite tener un control respecto a el desarrollo de los diseños arquitectónicos y su afectación a los costos previstos en la factibilidad, para de esta manera tomar las acciones correctivas necesarias. Por lo tanto, su utilidad se ve reflejada en tanto sirve como indicador de proceso.

4.4 Encuesta de validación del sistema de medición

El desarrollo de la presente propuesta para un sistema de medición del desempeño a partir de indicadores se realizó basado en el levantamiento de información, producto de la revisión de literatura, y las entrevistas realizadas a un panel de expertos, de las cuales se extrajeron los principios y lineamientos que le darían forma.

Dado que esta propuesta para la medición del desempeño se encuentra fundamentada en información BIM, se elabora la *encuesta de validación sobre requerimientos de información y procesos BIM en proyectos de Viviendas VIS*, la cual tiene por objetivo levantar el estado actual de políticas, procesos y tecnologías BIM al interior de varias compañías constructoras, y de esta manera determinar la aplicabilidad de los indicadores propuestos. La encuesta se desarrolló bajo una perspectiva cuantitativa, midiendo estadísticamente los aspectos mencionados. Para su ejecución, se seleccionó la herramienta “Formularios” de la suite de Google, y se diseñó para ser dirigida a los BIM Manager de distintas empresas constructoras, quienes por su cargo conocen y lideran la implementación de esta metodología en las organizaciones. De esta manera, nueve empresas participaron de la encuesta, las cuales se encuentran listadas en la Tabla 22.

Tabla 22

Organizaciones participantes en la encuesta de validación

Constructora Colpatría S.A.S

Prodesa y cía S.A.

Coninsa S.A.S

Deeb Asociados S.A.S

Inversiones Alcabama S.A.

Construcciones Planificadas S.A.

Constructora Las Galias S.A.

Amarilo S.A.S.

Marval S.A.S

La encuesta se diseñó con tres secciones, la primera orientada al estado actual de la organización en políticas BIM, la segunda orientada a los usos y procesos BIM aplicados, así como su estrategia

de comunicación e información, y la tercera orientada a un levantamiento de infraestructura tecnológica de la organización. La Tabla 23 menciona las preguntas de cada sección.

Tabla 23

Preguntas de la encuesta de validación sobre requerimientos de información y procesos BIM en proyectos de Viviendas VIS

Sección	Pregunta
Políticas	Siguiendo lo estipulado en la ISO 19650.1 para la gestión de la información y la documentación del BIMkit de Camacol ¿Cuáles de los siguientes documentos y requerimientos han sido desarrollados e implementados en la organización?
	Seleccione las fases de proyecto que forman parte del proceso de diseño desarrollado en la organización
	Seleccione los hitos de proyecto que forman parte del proceso de diseño desarrollado en la organización
	Indique ¿Cuál es el nivel de definición de los entregables del proyecto?
	Indique ¿Cuál es el nivel de madurez del estándar de información de la organización?
	¿La organización posee un protocolo de modelado de elementos BIM?
Procesos	Indique ¿Cuáles de los siguientes usos BIM desarrollan en la organización durante la etapa de diseño?
	¿El CDE de la organización maneja la estructura de carpetas y los estados de la información según lo recomendado en la ISO 19650.1 (Trabajo en progreso - Compartido - Publicado - Archivado) ?
	¿En el CDE de la organización se usan las transmisiones para la entrega de información durante la etapa de diseño?
	¿En el CDE de la organización se usan las incidencias para comunicar las observaciones y solicitudes de información del proyecto durante la etapa de diseño?
	¿Los elementos del modelo se encuentran clasificados bajo una estructura de desglose del trabajo (WBS - Work Breakdown Structure)?
	¿Los elementos del modelo contienen datos que informen respecto a las especificaciones, resultados de trabajo, actividades y/o APU's del proyecto?
	Del listado presentado seleccione ¿Qué otros datos forman parte de los requerimientos de información de la organización y son efectivamente proporcionados por los diseñadores?
Tecnología	¿Cuál es la herramienta de modelado BIM utilizada por la organización para sus procesos?
	¿Cuál es la herramienta de gestión BIM utilizada por la organización para la coordinación técnica?

¿Cuál es la plataforma de CDE seleccionada por la organización para la gestión de la información del proyecto?

¿Cuál es la herramienta de ERP seleccionada por la organización para la gestión del proyecto?

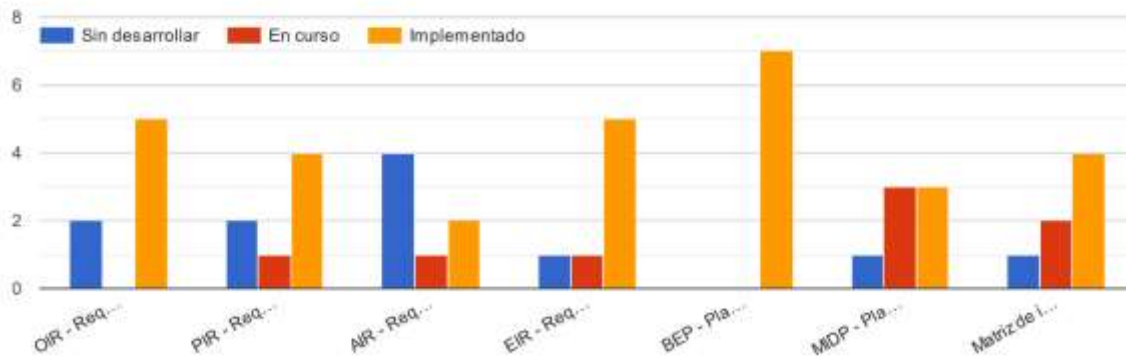
Del siguiente listado de herramientas para extracción y análisis de datos, seleccione las herramientas que están implementadas en la organización

4.4.1 Resultados de la encuesta

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la *encuesta de validación sobre requerimientos de información y procesos BIM en proyectos de Viviendas VIS*.

Políticas BIM

Siguiendo lo estipulado en la ISO 19650.1 para la gestión de la información y la documentación del BIMkit de Camacol ¿Cuales de los siguientes documentos y requer...do desarrollados e implementados en la organización?



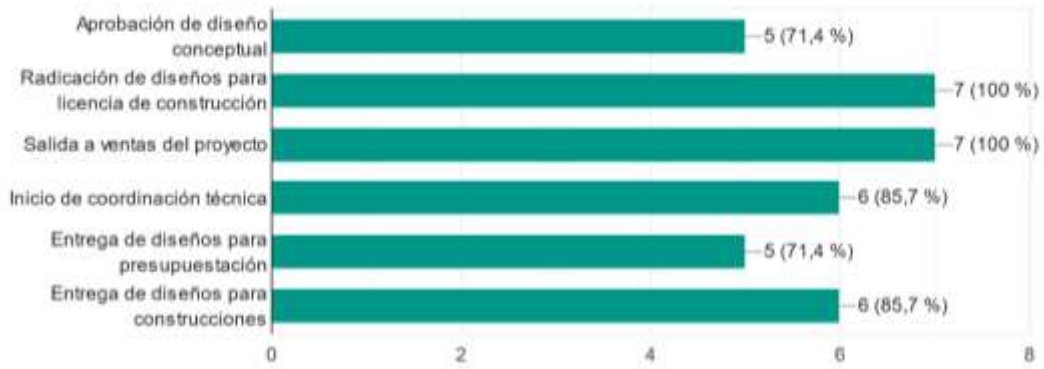
Seleccione las fases de proyecto que forman parte del proceso de diseño desarrollado en la organización

7 respuestas



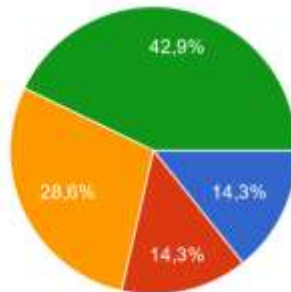
Seleccione los hitos de proyecto que forman parte del proceso de diseño desarrollado en la organización

7 respuestas



Indique ¿Cuál es el nivel de definición de los entregables del proyecto?

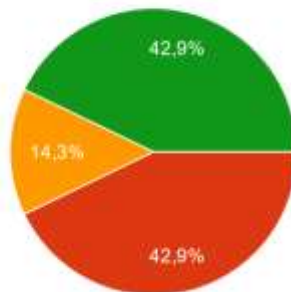
7 respuestas



- No se han definido claramente los entregables del proyecto, cada diseñador define el conjunto de entregables...
- Existe un listado de entregables generales solicitados por la organización
- Existe un listado específico de entregables que forman parte de los...
- Existe un listado preciso de entregables definidos en un MDP, m...

Indique ¿Cuál es el nivel de madurez del estándar de información de la organización?

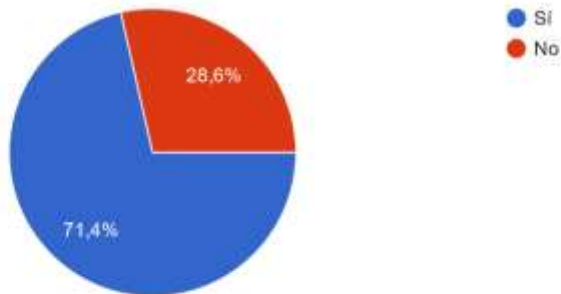
7 respuestas



- No hay estándar de información desarrollado en la organización
- El estándar de información define el LOD del modelo
- El estándar de información define los elementos del modelo y sus diferentes LOD y LOI
- El estándar de información define claramente los elementos del modelo y el nivel de información necesaria (L...

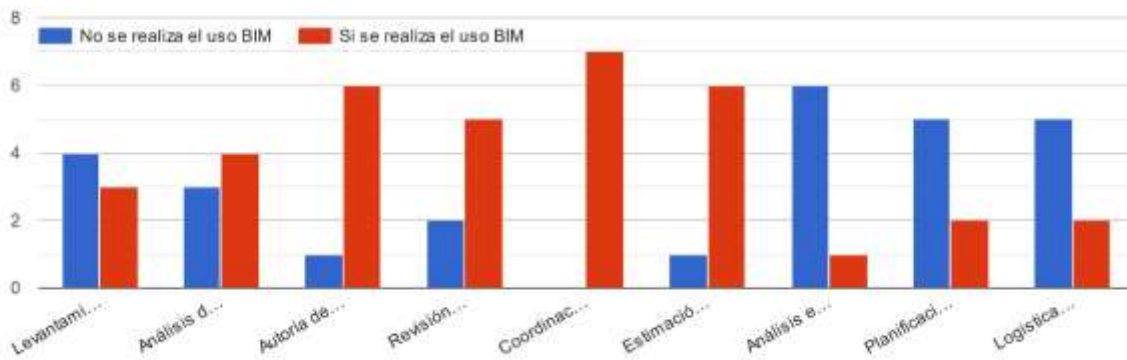
¿La organización posee un protocolo de modelado de elementos BIM?

7 respuestas



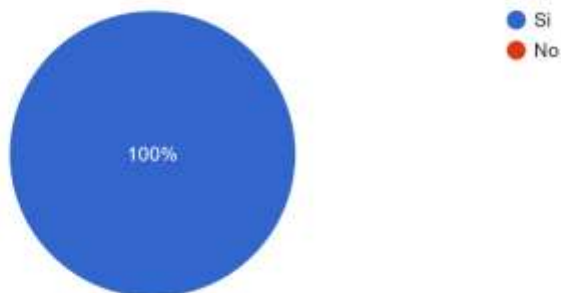
Procesos BIM

Indique ¿Cuáles de los siguientes usos BIM desarrollan en la organización durante la etapa de diseño?



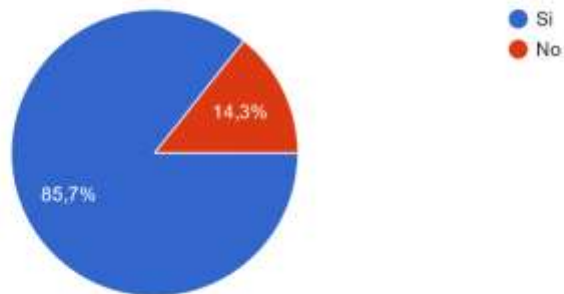
¿El CDE de la organización maneja la estructura de carpetas y los estados de la información según lo recomendado en la ISO 19650.1 (Trabajo en progreso - Compartido - Publicado - Archivado) ?

7 respuestas



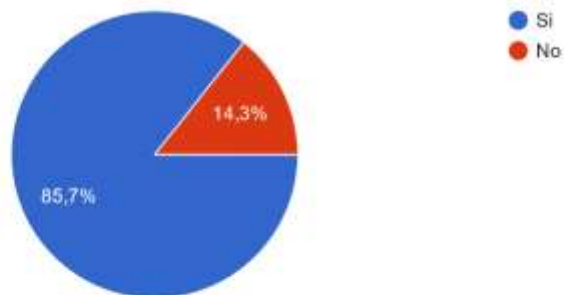
¿En el CDE de la organización se usan las transmisiones para la entrega de información durante la etapa de diseño?

7 respuestas



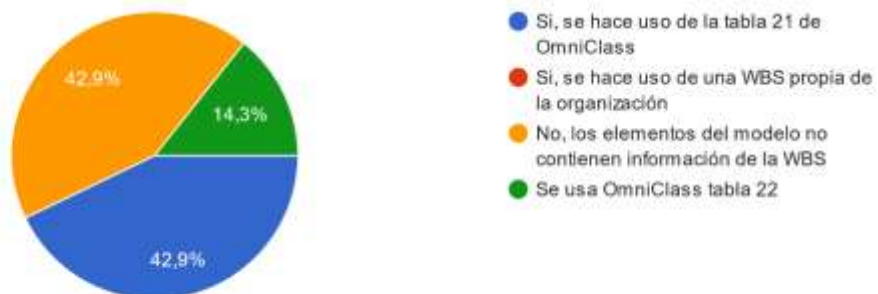
¿En el CDE de la organización se usan las incidencias para comunicar las observaciones y solicitudes de información del proyecto durante la etapa de diseño?

7 respuestas



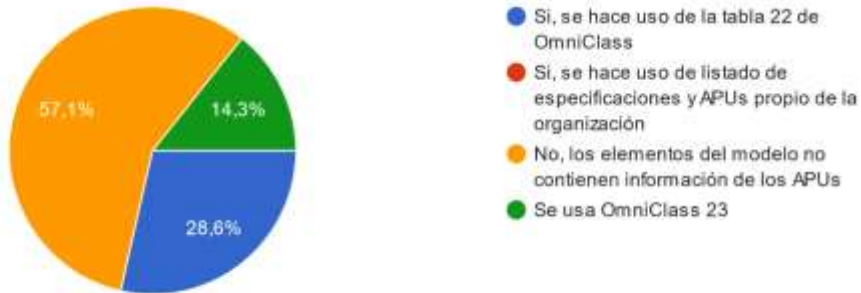
¿Los elementos del modelo se encuentran clasificados bajo una estructura de desglose del trabajo (WBS - Work Breakdown Structure)?

7 respuestas



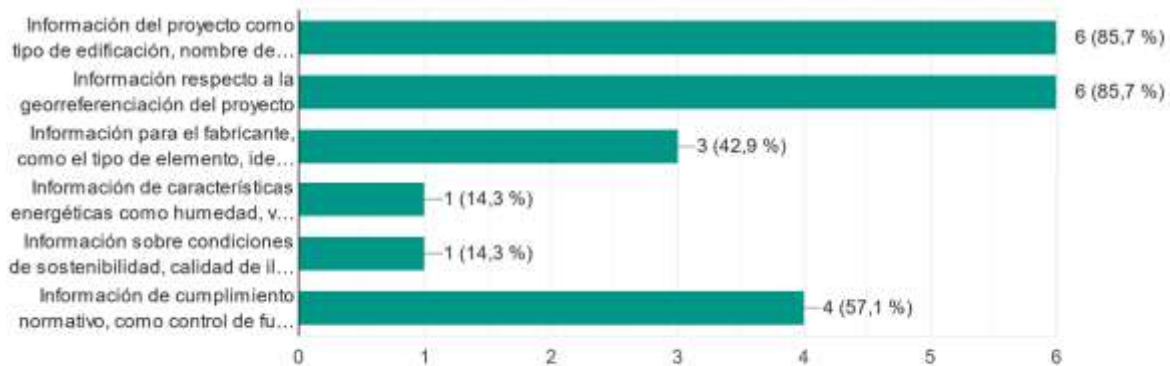
¿Los elementos del modelo contienen datos que informen respecto a las especificaciones, resultados de trabajo, actividades y/o APU's del proyecto?

7 respuestas



Del listado presentado seleccione ¿Qué otros datos forman parte de los requerimientos de información de la organización y son efectivamente proporcionados por los diseñadores?

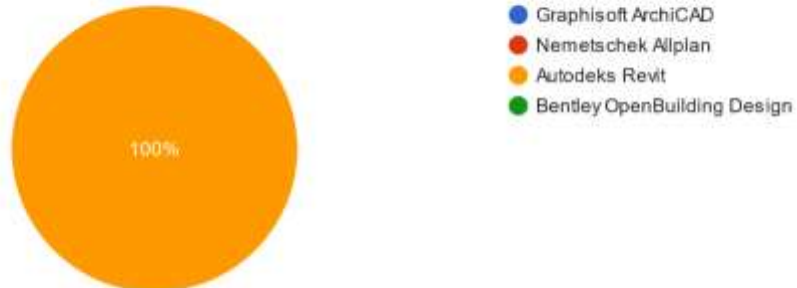
7 respuestas



Tecnologías BIM

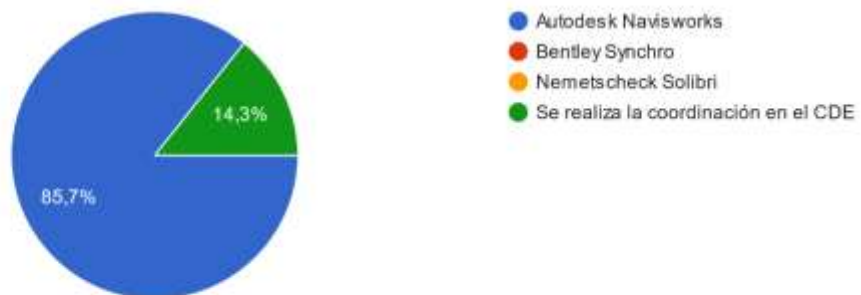
¿Cuál es la herramienta de modelado BIM utilizada por la organización para sus procesos?

7 respuestas



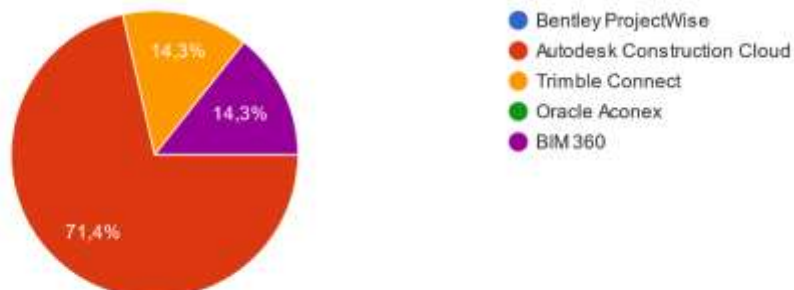
¿Cuál es la herramienta de gestión BIM utilizada por la organización para la coordinación técnica?

7 respuestas



¿Cuál es la plataforma de CDE seleccionada por la organización para la gestión de la información del proyecto?

7 respuestas



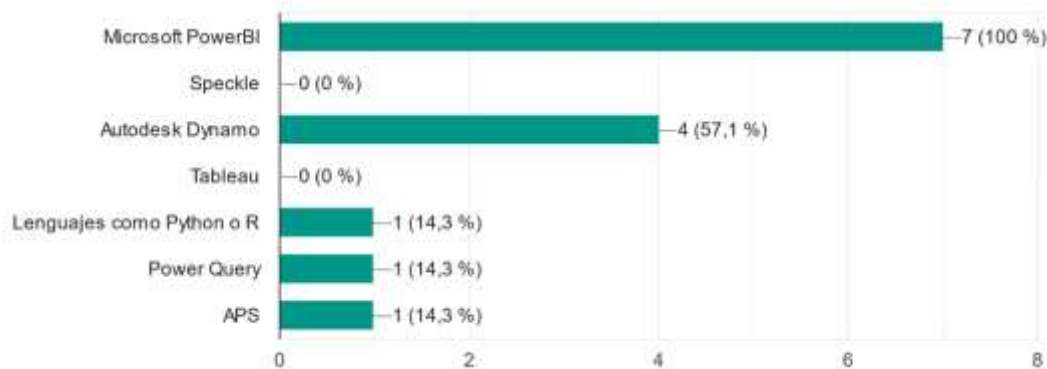
¿Cuál es la herramienta de ERP seleccionada por la organización para la gestión del proyecto?

7 respuestas



Del siguiente listado de herramientas para extracción y análisis de datos, seleccione las herramientas que están implementadas en la organización

7 respuestas



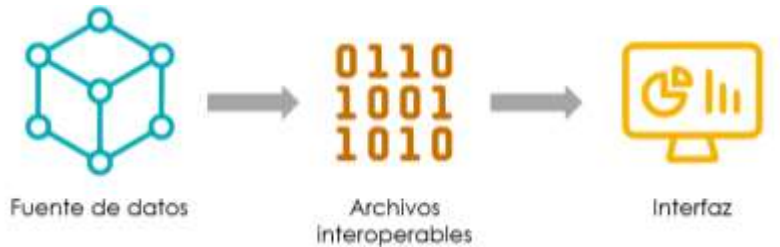
4.5 Integración de soluciones digitales usando Business Intelligence

El presente sistema de medición del desempeño está conformado por 4 componentes, a saber, datos, procesos, políticas e indicadores, tal como se explicó en la Figura 9; estos componentes se encuentran apoyados en una plataforma digital que permite su implementación efectiva y práctica. Esta plataforma es un concepto definido como la suma de soluciones tecnológicas, las cuales se relacionan entre sí para medir, calcular y presentar los indicadores de manera clara y concisa, mediante el uso de herramientas BIM y de Business Intelligence. A continuación, se presenta los componentes de esta plataforma integrada de soluciones tecnológicas desarrollada para el sistema de medición, la cual se elaboró basada en los resultados de la encuesta de validación explicada en

la sección 4.4. La plataforma digital tiene tres componentes, las fuentes de datos, los archivos de intercambio de información, y la interfaz (Figura 12).

Figura 12

Componentes y flujo de información de la plataforma digital



4.5.1 Fuentes de datos e información

El sistema de medición del desempeño contiene un componente de datos, explicado en la sección 4.1, el cual se divide en información del modelo de información BIM, y la información al interior del ambiente común de datos CDE. Estas se establecen como las fuentes de información principal de los proyectos, de la cual se desprenden la mayor parte de los datos sin procesar que serán utilizados en los indicadores propuestos en la sección 4.3. Es necesario entonces transformar esos datos sin procesar en información estructurada que sea interoperable y consultable por la interfaz. Adicionalmente, los procesos y las políticas, las cuales son conceptos que se encuentran descritos en la documentación de la organización y por lo tanto se consideran datos no estructurados, deben ser transformados en datos estructurados para su consulta. Dado que la información puede variar según la herramienta utilizada, se seleccionaron tres herramientas BIM que sirven como la fuente de datos para el sistema de medición del desempeño diseñado, los cuales se explican en la Figura 13.

Figura 13

Herramientas BIM seleccionadas para el sistema de medición del desempeño



Dado que la información puede variar según la herramienta utilizada, se seleccionó el software Autodesk Revit® como el software de creación de modelos BIM (Figura 14) de la plataforma digital desarrollada. Esta selección se justifica en los resultados de la encuesta de validación realizada, la cual nos muestra como esta es la principal herramienta de modelación al interior de las constructoras seleccionadas, argumento que se complementa con lo descrito por en la encuesta del CIBIM español realizada en 2017, en donde se indica el uso de Autodesk Revit® por parte del 63.6% de los participantes (cita). Esta herramienta nos permite la creación de modelos BIM compuestos de objetos digitales con propiedades semánticas, las cuales contienen datos que describen la función, el comportamiento, las relaciones y otros aspectos importantes del objeto, más allá de su representación visual o geométrica (Borrmann et al., 2018). Debido a que es la herramienta mediante la cual se crean los modelos y la información del proyecto, Autodesk Revit® está presente en todos los procesos de diseño, aplicada directamente en los procesos de autoría de diseño, estimación de costos y análisis de diseños técnicos, e indirectamente en la resolución de las observaciones provenientes de los procesos de revisión de diseños y coordinación técnica, tal como se indica en la Tabla 24.

Figura 14
Interfaz de Autodesk Revit® con un proyecto de vivienda

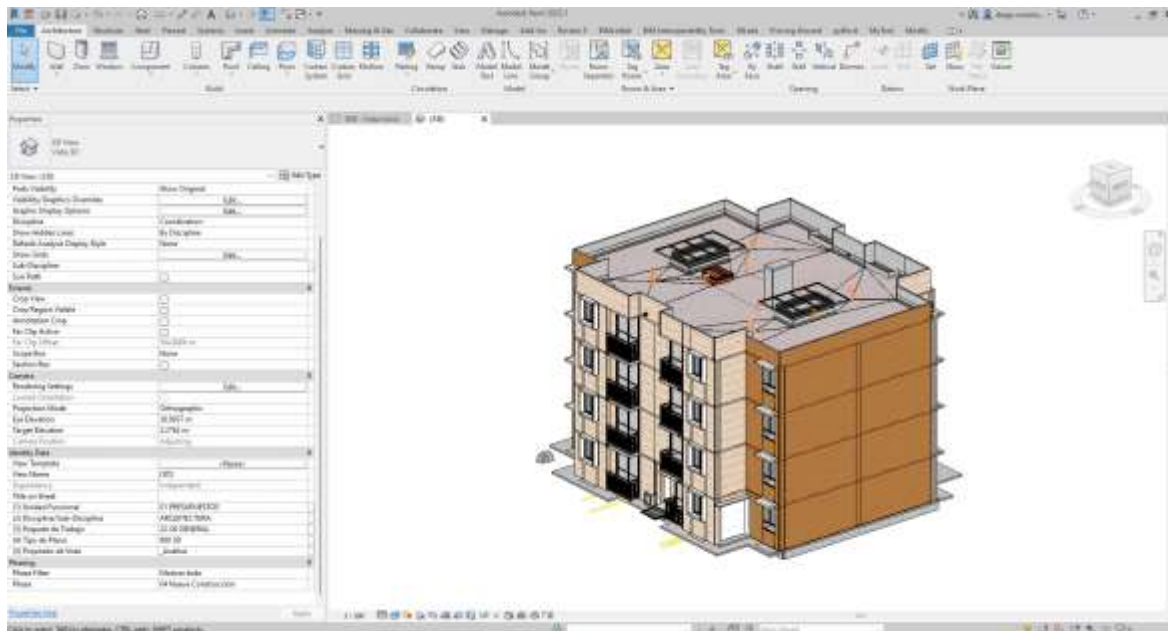


Tabla 24

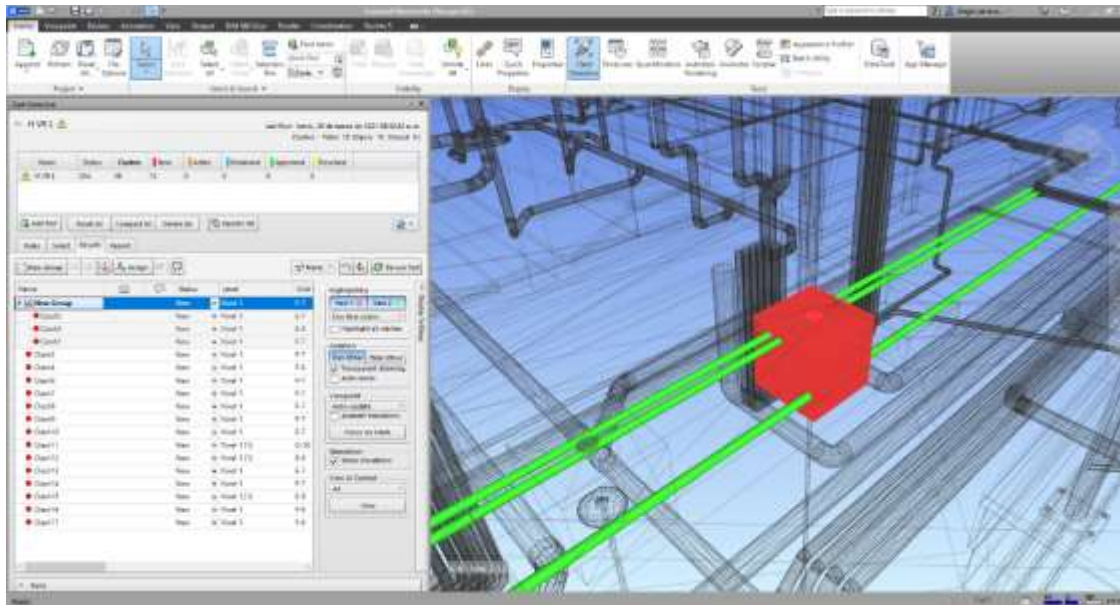
Listado de software y su respectivos Usos BIM

Software	Procesos - Usos BIM	Formato datos nativos	Archivos interoperables
Autodesk Revit	Autoría de diseños		.csv
	Estimación de Costos	.rvt	.xlsx
	Análisis de diseños técnicos		.ifc .pdf
Autodesk Navisworks Manage	Coordinación técnica	.nwc .nwf	.xml
	Revisión de diseños	.nwd	.html
Autodesk Construction Cloud	Autoría de diseños		.csv
	Revisión de diseños	***	.bcf
	Coordinación técnica		

Adicional al modelo de producción de diseños BIM, el proceso de coordinación técnica requiere la elaboración de un modelo federado, el cual es un modelo que contiene la información de varias disciplinas técnicas en un mismo elemento (Bockstael & Issa, 2016; Eastman et al., 2011). Para la creación de este modelo se seleccionó Autodesk Navisworks Manage® como la herramienta de gestión y coordinación de diseños técnicos mediante BIM Figura 15. Esta selección se justifica en los resultados de la encuesta de validación realizada, la cual nos muestra como esta es la principal herramienta de coordinación técnica al interior de las constructoras seleccionadas. Esta herramienta nos permite la creación de modelos federados integrando los modelos BIM creados en otras herramientas como Autodesk Revit® para distintos procesos, en el caso de este desarrollo será para el proceso de coordinación técnica, mediante la funcionalidad de “Clash detection” de Autodesk Navisworks Manage®, la cual detecta y enlista las distintas interferencias geométricas que existen en los modelos BIM de las disciplinas de un proyecto, brindando más información para la toma de decisión y resolución de problemas de coordinación técnica de especialidades (Bockstael & Issa, 2016), y evitando que esas interferencias lleguen a la etapa de la ejecución constructiva del proyecto, reduciendo los reprocesos producto de la falta de coordinación de disciplinas (Eastman et al., 2011). Así, esta herramienta es fundamental para el proceso de coordinación técnica y apoya, indirectamente, el proceso de revisión de diseños.

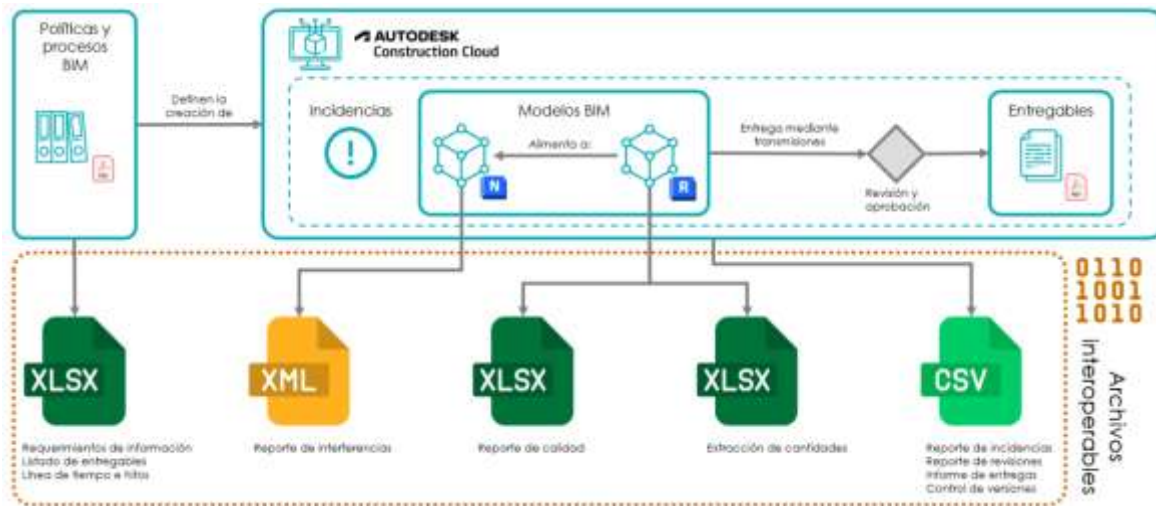
Figura 15

Interfaz de Autodesk Navisworks Manage® en una detección de interferencias



Finalmente, uno de los puntos clave en el desarrollo de proyectos basados en metodologías BIM es el ambiente común de datos o CDE, el cual permite centralizar y gestionar la información del proyecto siguiendo lo estipulado en la NTC-ISO 19650.1. El ambiente común de datos es una plataforma digital similar a un repositorio de información, la cual permite que todos los participantes tengan acceso a la información que requieren según su rol en el proyecto, habilitando la comunicación y colaboración entre los distintos profesionales. Para el desarrollo de esta investigación se escogió la plataforma Autodesk Construction Cloud®, específicamente el módulo de Document Management (de aquí en adelante Autodesk Docs®) para toda la gestión y administración de la información del proyecto Figura 16. Esta selección se justifica en los resultados de la encuesta de validación realizada, la cual nos muestra como esta es la principal plataforma de CDE utilizada al interior de las constructoras seleccionadas. Este ambiente común de datos nos permite, entre otras funcionalidades, llevar las versiones automáticas de los distintos archivos cargados, controlar el acceso a la información de los usuarios según su rol en el proyecto, llevar la trazabilidad de las actividades realizadas en la plataforma, y la entrega formal de información y documentación por parte de los usuarios. Así mismo permite la revisión de los diseños directamente en la plataforma mediante las herramientas de incidencias, y los flujos de revisión y aprobación de archivos. Por lo tanto, es una herramienta fundamental en los procesos de autoría de diseños y revisión de diseños.

Figura 16
Interfaz de Autodesk Construction Cloud®



De esta manera, se construye un conjunto de archivos que alimentan el sistema de medición del desempeño a partir de la información que desarrollan los distintos equipos de consultores en su trabajo diario, sin mayor afectación para sus procesos, debido a que la captura de información proviene bien sea de los modelos que desarrollan para cumplir con los entregables del proyecto, como también de las actividades realizadas en la plataforma de CDE. Debido a la gran cantidad de información que pueden provenir de las fuentes de datos, se define un conjunto de información la cual será extraída de estas fuentes, para evitar ineficiencias por extraer datos que no serán utilizados durante la medición del desempeño, sin demeritar su importancia en otros procesos relacionados. El conjunto de datos requeridos de los modelos BIM de producción es descrito en la Tabla 25.

Tabla 25

Listado de información requerida de los modelos BIM de producción para los indicadores

Fuente de datos	Dato requerido	Tipo de dato	Criterio de éxito
Elementos constructivos (ej. Muros, columnas, ventanas, tubería)	Cantidad de elementos (*)	Entero	Costo
	Longitud del elemento (*)	Decimal	Costo
	Área del elemento (*)	Decimal	Costo Ambiental
	Volumen del elemento (*)	Decimal	Costo
	Código de ensamblaje (Assembly Code)	Cadena de texto	Costo

	Nota Clave (Keynote)	Cadena de texto	Costo
	Id de elemento	Entero	Costo Calidad
	Material	Cadena de texto	Costo Calidad Ambiental
	Nivel	Cadena de texto	Costo Calidad
	Categoría	Cadena de texto	Costo Calidad
	Marca de tipo	Cadena de texto	Costo Calidad
	Marca	Cadena de texto	Costo Calidad
	Resistencia térmica (R)	Decimal	Ambiental
	Coefficiente de transferencia de calor (U)	Decimal	Ambiental
Información del proyecto	Nombre del archivo	Cadena de texto	Costo Calidad Comunicación
	Nombre del proyecto	Cadena de texto	Calidad Comunicación
	Número del proyecto	Cadena de texto	Calidad Comunicación
	Nombre de la organización	Cadena de texto	Calidad Comunicación
	Nombre del edificio	Cadena de texto	Costo Calidad Comunicación
	Disciplina	Cadena de texto	Costo Calidad Comunicación
	Sistema de coordenadas	Decimal	Calidad
	Cantidad de alertas del modelo	Entero	Calidad
	Cantidad de elementos duplicados	Entero	Calidad

El conjunto de datos requeridos de los modelos BIM de coordinación es descrito en la Tabla 26.

Tabla 26

Listado de información requerida de los modelos BIM de coordinación para los indicadores

Fuente de datos	Dato requerido	Tipo de dato	Criterio de éxito
Interferencias	Cantidad de interferencias	Entero	Calidad
	Estado de interferencias	Cadena de texto	Calidad
	Fecha de detección	Fecha	Calidad
	Fecha de aprobación	Fecha	Calidad
	Asignado a	Cadena de texto	Calidad
	ID del elemento	Entero	Calidad
	Descripción de interferencia	Cadena de texto	Calidad
	Comentarios de interferencia	Cadena de texto	Calidad

El conjunto de datos requeridos del ambiente común de datos (CDE) es descrito en la Tabla 27.

Tabla 27

Listado de información requerida del ambiente común de datos para los indicadores

Fuente de datos	Dato requerido	Tipo de dato	Criterio de éxito
Incidencias	Tipo de incidencia	Cadena de texto	Calidad
	Estado de incidencia	Cadena de texto	Calidad
	Cantidad de incidencias	Entero	Calidad
	Asignada a	Cadena de texto	Calidad Comunicación
	Fecha de creación de incidencia	Fecha	Calidad Comunicación
	Fecha de vencimiento de incidencia	Fecha	Calidad Comunicación
Transmisiones	Título del informe de transmisión	Cadena de texto	Tiempo
	Cantidad de elementos	Entero	Tiempo
	Fecha de creación de transmisión	Fecha	Tiempo
Gestión documental	Nombre del archivo	Cadena de texto	Calidad Comunicación
	Estado de aprobación del archivo	Cadena de texto	Calidad Comunicación

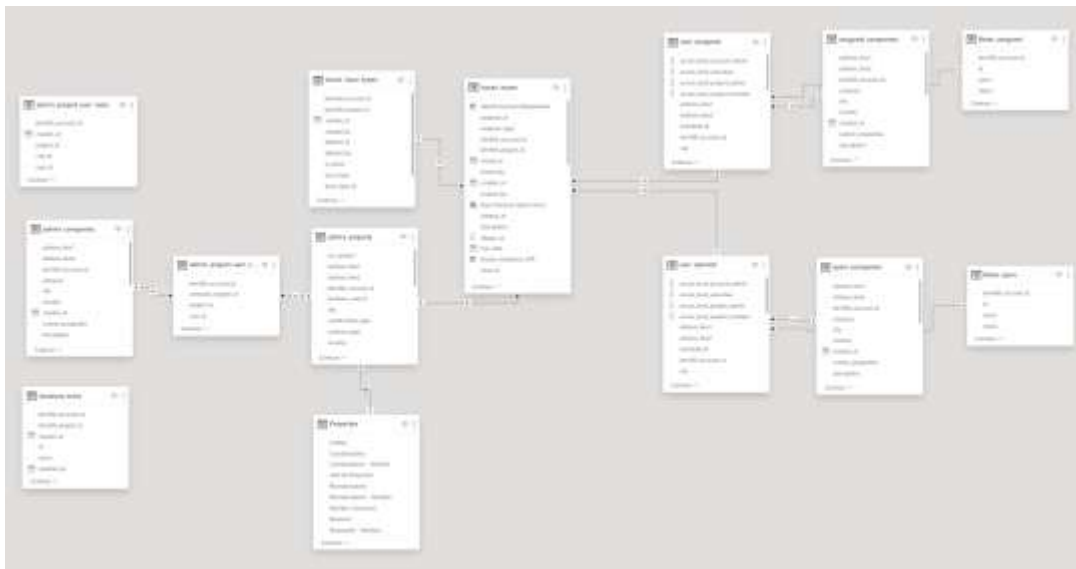
Versión del archivo	Cadena de texto	Calidad Comunicación
Fecha de carga de archivo	Fecha	Comunicación Tiempo

4.5.3 Interfaz de análisis y visualización de datos

El tercer componente de la plataforma integrada es el software de business intelligence, el cual es el encargado de conectar y transformar los datos provenientes de los archivos de intercambio de información y presentar la información mediante un *tablero de control*, el cual es una presentación visual de un conjunto de métricas, de manera que los interesados y todos los participantes del proyecto puedan ver la información necesaria de un vistazo para tomar decisiones informadas (Kerzner, 2011). Se seleccionó la solución de Microsoft Power BI debido a que es la herramienta para el análisis de datos más usada por las constructoras que participaron en la encuesta de validación de información. La Figura 18 muestra el esquema del modelo de conexión de datos elaborado en Power BI para el sistema de medición del desempeño.

Figura 18

Modelo de conexión de datos en Power BI



Así, se presenta un diseño de seis interfaces para la visualización de los distintos indicadores del sistema de medición del desempeño, una interfaz por cada proceso de diseño seleccionado y una interfaz general de resumen con los criterios de éxito definidos.

Componentes de la interfaz

Con el objetivo de manejar un lenguaje común en todas las interfaces del sistema de medición del desempeño, se definen unos componentes de cada interfaz, indicadas en la Figura 19, a continuación, se detallan cada una de las partes:

- Nombre de la interfaz: Identifica cada interfaz con respecto al proceso y Uso BIM específico que se está midiendo.
- Barra de selección por filtros: La barra de selección permite filtrar la información según el interés de los usuarios, los filtros que se pueden aplicar son:
 - Paquete de trabajo: Identifica un edificio o parte del proyecto específica, se encuentra definida en la segregación del proyecto dentro el BEP, por ejemplo, Torre 1, Edificio Zonas Comunes, Portería. De esta manera, al filtrar por paquete de trabajo se pueden ver los resultados de los indicadores que corresponden exclusivamente a esa edificación.
 - Equipo de trabajo: identifica a las empresas y consultores responsables por el desarrollo de los diseños del proyecto, por ejemplo, empresa diseñadora de arquitectura. De esta manera, al filtrar por equipo de trabajo se pueden ver los resultados de los indicadores que corresponden exclusivamente a ese consultor.
 - Disciplina técnica: Corresponde a las distintas disciplinas que conforman el proyecto, se diferencia del equipo de trabajo en que la disciplina hace referencia al diseño puntual, por ejemplo, suministro de agua potable, red de desagües sanitarios o red contra incendios, en tanto el equipo de trabajo hace referencia al consultor, en ejemplo el diseñador de redes hidrosanitarias, el cual realiza los diseños de las tres disciplinas.
- Espacio para los indicadores: Área de la interfaz en donde son ubicados los distintos indicadores del proyecto, buscando optimizar su legibilidad e identificación.
- Borrador de filtros: Herramienta que permite borrar todos los filtros seleccionados dentro de las interfaces y mostrar los valores totales generales de todos los indicadores para todo el proyecto.

Figura 19

Componentes de las interfaces



Interfaz General

La interfaz general muestra un resumen de la información con los principales indicadores que aportan valor sobre los criterios de éxito definidos en el sistema de medición, en la Figura 20 se muestra la interfaz de Power BI con los datos correspondientes.

Figura 20
Interfaz general del proyecto



Interfaz de Autoría de diseño

La interfaz de autoría de diseño, presentada en la Figura 21, se concentra en mostrar los distintos entregables requeridos en el MIDP según los hitos definidos para el proyecto. Así, el tablero de control mide el porcentaje de cumplimiento de los entregables por hito y también el porcentaje total con respecto a los entregables del proyecto. En esta interfaz también se observa el cumplimiento de los estándares BIM del proyecto, debido a que este proceso es el encargado de producir la información en los modelos BIM.

Figura 21
Interfaz de autoría de diseño



Interfaz de revisión de diseños

La interfaz de autoría de diseño, presentada en la Figura 22, muestra los indicadores relacionados con las incidencias colocadas sobre los entregables, sean estos planos, modelos o documentos, en el ambiente común de datos, por parte de los diseñadores y revisores del proyecto. Al mostrar las incidencias abierta y vencidas busca generar un sentido de urgencia sobre las actividades a realizar por parte de los consultores, a la vez que mide en cuales disciplinas se presentan más incidencias, lo cual sirve para procesos de retroalimentación.

Figura 22

Interfaz de revisión de diseños



Interfaz de coordinación técnica de diseños

La interfaz de coordinación técnica de diseños, presentada en la Figura 23, muestra los indicadores relacionados con las interferencias detectadas en los ciclos de coordinación, con el objetivo de identificar y corregir la mayor cantidad de conflictos de integración de disciplinas técnicas durante las fases de diseño.

Interfaz de estimación de costos

La interfaz de la estimación de costos, presentada en la Figura 24, se orienta exclusivamente a mostrar el costo directo objetivo del proyecto, definido en el BEP. Así, este tablero de control se concentra en mostrar los costes directos de la estructura, los diseños MEP (mecánico, eléctrico y plomería) y los acabados del proyecto, y a calcular su variación con los costos directos establecidos en la factibilidad.

Figura 23
Interfaz de coordinación técnica de diseños



Figura 24
Interfaz de coordinación técnica de diseños



5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Teniendo en cuenta la problemática identificada en la fase de diagnóstico, respecto a la carencia de la carencia de un sistema de medición claro para evaluar el desempeño y éxito de los proyectos, particularmente en etapas tempranas como la planeación o el diseño, se realiza la presente investigación la cual, mediante el diseño de investigación y el proceso realizado, obtiene los siguientes resultados dando respuesta a los objetivos planteados.

Identificar los criterios e indicadores más relevantes para la medición del éxito durante el diseño de proyectos de vivienda de interés social en empresas de construcción colombianas:

Mediante un levantamiento de información provenientes tanto de una extensa revisión de literatura, como de las entrevistas desarrolladas a un panel experto de directores de diseño y coordinadores de varias empresas constructoras de vivienda VIS, la investigación halló que los procesos de medición del desempeño en proyectos de construcción, durante la etapa de diseño, son una práctica poco frecuente en la industria. Los sistemas de medición del desempeño identificados, tales como CII Best Practices® o el EQFM® no están orientados específicamente a los procesos de diseño, midiendo principalmente el comportamiento de la organización a niveles más corporativos, pero siendo desconocidos en la industria local, pasando por alto la medición específica del desempeño de proyectos. Solo se identificó el Balance Scorecard en artículos de investigación que lo implementaban en la etapa de diseño de proyectos de construcción. Sin embargo, a nivel nacional la información fue menor, dado que la literatura no mostraba la implementación de sistemas de medición del desempeño más allá de las prácticas de control recomendadas desde la gestión de proyectos como el PMBOK®. En este aspecto, las entrevistas realizadas mostraron que, en general, los distintos directores y coordinadores de diseños cuentan con indicadores internos que aportan información respecto al avance y desarrollo de los diseños, pero estos no responden a una estrategia estructurada y sistemática para la medición del desempeño, y se rigen principalmente por la experiencia de cada profesional. Como conclusión, la revisión de literatura y las entrevistas al

panel de expertos arrojaron un conjunto de criterios de éxito: *Costo, Tiempo, Calidad, Salud y seguridad, Ambiental, Satisfacción del cliente, Satisfacción del equipo de trabajo, Rentabilidad, Productividad, Comunicación, Social, Interesados del proyecto.*

Con respecto a los indicadores, el sector de la construcción en general usa indicadores de resultado, los cuales miden el resultado obtenido al finalizar el proyecto, proceso y/o etapa, siendo útiles para determinar las ganancias y comportamiento del proyecto, pero sin aplicación en su desarrollo diario. Pese a lo anterior, se identificaron varios indicadores que permiten aumentar la frecuencia de su medición para servir en el control del proyecto, siendo aplicables a la etapa de diseño o diseñados exclusivamente para esta. Estos indicadores se encuentran referenciados en la Tabla 10 ubicada en la sección 3.1 Revisión de literatura. Con respecto a las entrevistas, los participantes mencionaron que, al igual que con los criterios de éxito, los indicadores están orientados al cumplimiento de la triple restricción, esto es los costos, principalmente en el cumplimiento con el presupuesto del proyecto, los tiempos, relacionado en general con las entregas de información y la calidad de esta, y el cumplimiento del alcance definido para el proyecto en la etapa de planeación. Los indicadores hallados de las entrevistas se pueden consultar en la Tabla 15 ubicada al interior de la sección 3.2.1 Resultados de las entrevistas.

Identificar y analizar la información desarrollada en proyectos de vivienda de interés social que utilizaron metodologías BIM en sus procesos de diseño para determinar su uso en la medición del desempeño de estos: Dada la amplia adopción de metodologías BIM en empresas constructoras de vivienda VIS, la investigación buscó definir qué información es creada durante el desarrollo de los diseños técnicos de los proyectos. Para esto, al interior del marco teórico establecido se describen los distintos tipos de datos e información BIM y su relación con la medición del desempeño, y principalmente el cumplimiento a la norma técnica NTC-ISO 19650 y otros estándares BIM nacionales e internacionales, como el BIM KIT desarrollado por BIMForum Colombia de la mano de Camacol, o el Estándar BIM desarrollado por PlanBIM Chile. Esto da un soporte conceptual sobre la información que se desarrolla en procesos de diseño basados en BIM, y permite determinar que esta información dentro de los modelos BIM se puede clasificar en información geométrica e información no geométrica (Que describe las propiedades de los elementos del modelo) de tal manera que ambos tipos de información son necesarios y útiles para el desarrollo de un sistema de medición del desempeño. Esta afirmación posteriormente sería validada mediante la elaboración de una encuesta de validación de información realizada a los BIM Manager de varias constructoras de vivienda VIS. Los resultados de esta encuesta identifican

los distintos tipos de información que son solicitadas por las empresas de construcción a los consultores de diseño para que la incluyan al interior de los modelos BIM, así como también valida el uso de ambientes comunes de datos (CDE) como una práctica habitual en el desarrollo de proyectos de vivienda VIS. De esta manera, se elaboran varias tablas (tabla 25, tabla 26 y tabla 27) ubicadas en la sección 4.5.2 Archivos interoperables para el intercambio de información, las cuales describen la información que será obtenida de distintas fuentes de información BIM, sirviendo como insumo en el cálculo de indicadores para su uso en la medición del desempeño.

Desarrollar una estrategia efectiva para utilizar datos BIM y tecnologías BI de manera conjunta en la medición del desempeño en proyectos de vivienda de interés social: El capítulo 4 describe el desarrollo de un sistema de medición del desempeño, el cual presenta una estrategia basada en la integración de datos provenientes de los proyectos de vivienda VIS desarrollados bajo metodologías BIM. De esta manera, se concibe una propuesta estructurada a partir de cinco componentes, los cuales se establecieron con el objetivo de que la información del sistema de medición del desempeño pudiera obtenerse de manera altamente automatizada, disminuyendo así una de las principales problemáticas de estos sistemas, que es la utilización de varios recursos (humanos, económicos, temporales) para la obtención de los datos necesarios para los indicadores, haciendo ineficiente el seguimiento constante de estos indicadores para medir y controlar el proyecto en etapas de diseño. De esta forma, el sistema desarrollado se basa en la información desarrollada por parte de los distintos consultores de diseño en sus procesos diarios, para utilizarla en la medición del desempeño, sin tener que pasar por transformaciones y/o captura de datos adicionales.

Así, el sistema de medición desarrollado define un total de seis criterios de éxito para el proyecto en la etapa de diseño: *Tiempo, Costos, Calidad, Comunicaciones, Ambiental y BIM*, obtenidos a partir de la revisión de literatura y las entrevistas realizadas al panel de expertos. De igual manera, se define un conjunto de 17 indicadores de desempeño distribuidos dentro de esos criterios de éxito. Estos indicadores se construyeron siguiendo cuatro criterios: 1) Aportar información para alguno de los criterios de éxito del proyecto, 2) Utilizar la información proveniente de fuentes BIM como insumo para su cálculo, 3) Medir uno de los procesos BIM definidos para el sistema de medición, y 4) La obtención de los datos necesarios debe estar altamente automatizada para evitar ser una tarea adicional del equipo de trabajo. Los indicadores construidos se pueden consultar en la tabla 21, ubicada en la sección 4.3 Medición del desempeño en procesos de diseño mediante indicadores.

Establecer un enfoque para comunicar los resultados de la medición del desempeño en proyectos de vivienda de interés social, utilizando tecnologías BIM, BI y herramientas de visualización de datos: El capítulo 5 describe el desarrollo de una plataforma digital, la cual es un conjunto de soluciones tecnológicas que se basan en la encuesta de validación de información realizada con BIM Manager, en donde se hace selección de las principales aplicaciones de software tanto para la producción de modelos BIM (Autodesk Revit®), como para la coordinación 3D (Autodesk Navisworks Manage®), y la gestión de información en un ambiente común de datos CDE (Autodesk Construction Cloud®), así como de la principal solución de análisis de datos y *Business Intelligence BI* (Microsoft Power BI) utilizada por las empresas constructoras de vivienda VIS. De esta manera se plantea una estrategia eficiente dado que usa los recursos actuales de la organización para la construcción del sistema de medición del desempeño, sin necesidad de incurrir en gastos de infraestructura tecnológica adicionales. Esta integración se logró a través de la identificación de archivos interoperables, los cuales permiten el intercambio de información entre los softwares BIM y las soluciones de análisis de datos y BI. Por lo tanto, los indicadores seleccionados se organizaron en un conjunto de tableros de control o *Dashboards*, los cuales se llamaron “interfaz” en la propuesta, debido a que dentro del sistema de medición del desempeño son los encargados de mostrar la información de manera lógica y estructurada a los usuarios. Estas interfaces se crearon con el objetivo de agrupar los indicadores según los procesos de diseño (o Uso BIM) definidos en el sistema de medición. Así, cada tablero muestra la información pertinente a un único proceso, y adicionalmente, existe un cuadro resumen con los principales indicadores de cada proceso, orientado a mostrar los indicadores según el criterio de éxito definido, de tal manera que permita una lectura rápida y eficiente de la información necesaria para la toma de decisiones durante la etapa de diseño en proyectos de vivienda VIS por parte de los usuarios.

5.2 Recomendaciones

Con el objetivo de cerrar las brechas de conocimiento y alcance existentes en la presente investigación, se realizan las siguientes recomendaciones para futuras investigaciones:

- **Validación mediante un estudio de caso:** Dado que la investigación desarrolla un sistema de medición utilizando indicadores basado en tecnologías BIM y BI, llevar a cabo un

estudio de caso en donde se realice la integración propuesta permitiría identificar posibles puntos de mejora y optimizaciones, así como un acercamiento a la realidad del sector constructivo, permitiendo validar, añadir o modificar tanto la información requerida, como los criterios de éxito y los indicadores propuestos.

- **Extrapolación a otros tipos de proyecto:** Si bien el desarrollo del sistema de medición está orientado a proyectos de vivienda de interés social, una futura investigación podría abordar su implementación en otros tipos de proyectos de construcción, debido a que la información de base y las herramientas utilizadas, tanto para la medición como el software descrito, no se limitan exclusivamente a proyectos de vivienda VIS y permitiría, en principio, extrapolarse a otros proyectos.
- **Utilización de plataformas, archivos e información OpenBIM, abierta e interoperable:** La integración de las soluciones descritas presenta el inconveniente de ser desarrolladas por software privado, sin embargo, el desarrollo del sistema de medición del desempeño no depende estrictamente del software utilizado, por lo que una futura investigación podría abordar la adaptación del sistema basándose en el uso de información abierta e interoperable, como los formatos IFC de modelos BIM y BCF de comunicación de incidencias.
- **Extensión a otras etapas del ciclo de vida de los proyectos:** El sistema de desempeño desarrollado abarca únicamente la etapa de diseño debido a que se identificó la necesidad de medir y controlar los procesos desarrollados en ese momento, sin embargo, las entrevistas mostraron el interés de medir y controlar los procesos existentes en etapas anteriores por parte de los directores y coordinadores de diseño. Por lo tanto, una futura investigación podría extender el sistema de medición del desempeño a procesos realizados en la planificación y estructuración del proyecto.

∴

Bibliografía

- Aguilar, J., Rueda, L., & Leguizamón, S. (2020). *VENTAJAS DE LA METODOLOGÍA SCRUM EN LA PLANEACIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDA EN BOGOTÁ*. Universidad EAN.
- Alarcon, L. F., Grillo, A., Freire, J., & Diethelm, S. (2001). Learning from collaborative benchmarking in the construction industry. *9th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. <https://www.researchgate.net/publication/228558967>
- Albuquerque, F., Torres, A. S., & Berssaneti, F. T. (2020). Lean product development and agile project management in the construction industry. *Revista de Gestão*, 27(2), 135–151. <https://doi.org/10.1108/REG-01-2019-0021>
- Atkinson, R. (1999). Project management: cost, time and quality, two best guesses and a phenomenon, its time to accept other success criteria. *International Journal of Project Management*, 17(6), 337–342. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(98\)00069-6](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(98)00069-6)
- Azhar, S., Khalfan, M., & Maqsood, T. (2012). Building information modelling (BIM): now and beyond. *Construction Economics and Building*, 12(4), 15–28. <https://doi.org/10.5130/ajceb.v12i4.3032>
- Beatham, S., Anumba, C., Thorpe, T., & Hedges, I. (2004). KPIs: a critical appraisal of their use in construction. *Benchmarking: An International Journal*, 11(1), 93–117. <https://doi.org/10.1108/14635770410520320>
- BIM Forum Colombia. (2020). 9. Fichas de usos BIM. En Camacol (Ed.), *Guía para la adopción BIM en las organizaciones*. https://bim.psu.edu/bim_uses/
- BIM FORUM USA. (2023). *LEVEL OF DEVELOPMENT (LOD) SPECIFICATION PART I*. www.bimforum.org/lod
- Bititci, U. S., Carrie, A. S., & McDevitt, L. (1997). Integrated performance measurement systems: a development guide. *International Journal of Operations & Production Management*, 17(5), 522–534. <https://doi.org/10.1108/01443579710167230>

- Bockstael, D., & Issa, M. H. (2016). A methodology for contractor clash detection using building information modelling on commercial construction projects. *Journal of Information Technology in Construction*, 21(July 2015), 233–249.
- Borrmann, A., König, M., Koch, C., & Beetz, J. (2018). Building information modeling: Why? What? How? En *Building Information Modeling: Technology Foundations and Industry Practice* (pp. 1–24). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92862-3_1
- Botero, L. F., Álvarez, E., & Ramírez, C. (2007). Iniciativa colombiana en la definición de indicadores de desempeño como punto de partida de un sistema de referenciación para la construcción. *Ambiente Construido*, 7, 89–102.
<https://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/download/3756/2109>
- Bradley, Ken. (1997). *Ken Bradley's understanding PRINCE 2*. SPOCE Project Management Ltd.
- Bryde, D., Broquetas, M., & Volm, J. M. (2013). The project benefits of building information modelling (BIM). *International Journal of Project Management*, 31(7), 971–980.
<https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2012.12.001>
- Bygballe, L. E., & Ingemansson, M. (2014). The logic of innovation in construction. *Industrial Marketing Management*, 43(3), 512–524. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2013.12.019>
- Caballero, S., Zambrano, B., & Ponce, E. (2018). ESTADO ACTUAL DE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA LEAN CONSTRUCTION EN LA GESTIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN EN COLOMBIA. *Ingeniare*, 25, 39–65. <https://doi.org/10.18041/1909-2458/ingeniare.25.5968>
- CAMACOL. (2020a). *Estrategia Nacional BIM*.
- CAMACOL. (2020b). *Marco Nacional de Cualificaciones*.
- CAMACOL. (2022). *Informe Económico 113*.
https://camacol.co/sites/default/files/descargables/Informe%20Econ%C3%B3mico%20113%20VF_%20Formato.pdf
- CAMACOL, & McKinsey & Co. (2018). *Informe de productividad. Sector construcción de edificaciones*. <https://camacol.co/sites/default/files/documentosinteres/INFORME PRODUCTIVIDAD VF.pdf>
- Chan, A., Ma, X., Yi, W., Zhou, X., & Xiong, F. (2018). Critical review of studies on building information modeling (BIM) in project management. *Frontiers of Engineering Management*, 5(3), 394–406. <https://doi.org/10.15302/J-FEM-2018203>

- Chan, A. P. C., & Chan, A. P. L. (2004). Key performance indicators for measuring construction success. *Benchmarking: An International Journal*, *11*(2), 203–221.
<https://doi.org/10.1108/14635770410532624>
- Ciric, D., Lalic, B., Gracanin, D., Tasic, N., Delic, M., & Medic, N. (2019). Agile vs. Traditional Approach in Project Management: Strategies, Challenges and Reasons to Introduce Agile. *Procedia Manufacturing*, *39*, 1407–1414. <https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2020.01.314>
- Clough, R., Sears, G., & Sears, K. (2008). *Construction project management : a practical guide to field construction management* (5a ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Construction Industry Institute (CII). (2024, enero 14). *Project Definition Rating Index (PDRI) Overview*. <https://www.construction-institute.org/pdri-overview>.
- Creswell, J. W. (2014). *Research Design* (4a ed.). SAGE Publications.
- DANE. (2022a). *Anexos _produccion _constantes _IV _2022*.
https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/pib/Anexos_produccion_constantes_IV_2022.xlsx
- DANE. (2022b). *Boletín Técnico Indicadores económicos alrededor de la construcción (IEAC)*.
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors* (2a ed.). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9780470261309>
- EFQM. (2021). *Modelo EFQM 2ª edición*.
- Elmualim, A., & Gilder, J. (2014). BIM: innovation in design management, influence and challenges of implementation. *Architectural Engineering & Design Management*, *10*(3/4), 183–199. <https://doi.org/10.1080/17452007.2013.821399>
- Fazli, A., Fathi, S., Enferadi, M. H., Fazli, M., & Fathi, B. (2014). Appraising Effectiveness of Building Information Management (BIM) in Project Management. *Procedia Technology*, *16*, 1116–1125. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.10.126>
- González Forero, H. (2011). *Presupuesto: su control en un proyecto arquitectónico*. ECOE ediciones.
- Hernández, G. (2022). *Análisis de la aplicabilidad del marco de trabajo Scrum en proyectos de construcción de radio bases de telecomunicaciones*. Universidad Santo Tomás.
- Hernandez Sampieri, R., Fernandez Collado, C., & Baptista Lucio, M. del P. (2010). *Metodología de la investigación* (5a ed.). McGraw-Hill.
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*.

- Herrera, R. F., Mourgues, C., Alarcon, L. F., Pellicer, E., & Alarcón, L. F. (2019). Assessing design process performance of construction projects. *CIB World Building Congress, June*, 17–21. <https://www.researchgate.net/publication/333929644>
- Jiménez, D. (2021). *Análisis de Habilidades Gerenciales en la Gestión de proyectos de Construcción Aplicado para Residentes y/o Directores de obra*. Universidad Nacional de Colombia.
- Kadcha, Y., Legmouz, D., & Hajji, R. (2022). an Integrated Bim-Power Bi Approach for Data Extraction and Visualization. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 48(4/W4-2022), 67–73. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W4-2022-67-2022>
- Kaplan, R. S., & Norton, D. P. (1992). The Balanced Scorecard-Measures that Drive Performance. *Harvard Business Review*, 70(1), 71–79.
- Kerzner, H. (2011). *PROJECT MANAGEMENT METRICS, KPIs, AND DASHBOARDS* (2a ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Khanzadi, M., Sheikhhoshkar, M., & Banihashemi, S. (2020). BIM applications toward key performance indicators of construction projects in Iran. *International Journal of Construction Management*, 20(4), 305–320. <https://doi.org/10.1080/15623599.2018.1484852>
- Kreider, R. G., & Messner, J. I. (2013). *The Uses of BIM - Classifying and Selecting BIM Uses*. <http://bim.psu.edu>.
- Kylili, A., Fokaides, P. A., & Lopez Jimenez, P. A. (2016). Key Performance Indicators (KPIs) approach in buildings renovation for the sustainability of the built environment: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 906–915. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.096>
- Lalmi, A., Fernandes, G., & Boudemagh, S. S. (2022). Synergy between Traditional, Agile and Lean management approaches in construction projects: bibliometric analysis. *Procedia Computer Science*, 196, 732–739. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.12.070>
- Lalmi, A., Fernandes, G., & Souad, S. B. (2021). A conceptual hybrid project management model for construction projects. *Procedia Computer Science*, 181, 921–930. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.248>
- Lock, D. (2007). *Project Management* (9a ed.). Gower Publishing Company. www.projectmanagement9.com
- Lu, W., Lai, C. C., & Tse, T. (2019). *Big data for construction cost management* (1a ed.). Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9781351172325-6>

- Mahmoud, A. S., Ahmad, M. H., Yatim, Y. M., & Dodo, Y. A. (2020). Key performance indicators (KPIs) to promote building developers safety performance in the construction industry. *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*, 13(2), 371–401. <https://doi.org/10.3926/jiem.3099>
- Marzouk, M., & Enaba, M. (2019). Analyzing project data in BIM with descriptive analytics to improve project performance. *Built Environment Project and Asset Management*, 9(4), 476–488. <https://doi.org/10.1108/BEPAM-04-2018-0069>
- Meneses, E., & Montoya, B. (2014). La utopía de la implementación del B.I.M en la industria de la construcción en Colombia. *Proceedings of the XVIII Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics: Design in Freedom*, 1(8), 398–402. <https://doi.org/10.5151/despro-sigradi2014-0080>
- Moradi, S., Ansari, R., & Taherkhani, R. (2022). A Systematic Analysis of Construction Performance Management: Key Performance Indicators from 2000 to 2020. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, 46(1), 15–31. <https://doi.org/10.1007/s40996-021-00626-7>
- Neely, A., Adams, C., & Kennerley, M. (2002). *The Performance Prism: The Scorecard for Measuring and Managing Business Success*.
- Office of Government Commerce. (2009). *Managing successful projects with PRINCE2* (5a ed.). TSO (The Stationary Office).
- Olugboyege, O., Edwards, D. J., Windapo, A. O., Omopariola, E. D., & Martek, I. (2021). Development of a conceptual model for evaluating the success of BIM-based construction projects. *Smart and Sustainable Built Environment*, 10(4), 681–701. <https://doi.org/10.1108/SASBE-02-2020-0013>
- Olugboyege, O., & Windapo, A. (2020). A Building Information Modelling-Integrated Model of Construction Project Performance Indicators. En *The Construction Industry in the Fourth Industrial Revolution* (pp. 144–157). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-26528-1_15
- Organización Internacional de Normalización. (2018). *Organización y digitalización de la información en edificaciones y obras de ingeniería civil, incluyendo BIM (Building Information Modelling). Gestión de la información usando BIM. Parte 1: Conceptos y principios: Vol. ISO 19650.1-2018*.
- Orihuela, P., Pacheco, S., & Orihuela, J. (2017). Proposal of Performance Indicators for the Design of Housing Projects. *Procedia Engineering*, 196(June), 498–505. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.230>

- Orihuela, P., Pacheco, S., & Orihuela, J. (2018). Control panel and indicators for production control in building projects. *Organization, Technology and Management in Construction: an International Journal*, 10(1), 1665–1673. <https://doi.org/10.1515/otmcj-2016-0027>
- Parikh, D. V., & Phugat, S. (2008). PERFORMANCE MANAGEMENT IN ROAD CONSTRUCTION PROJECT. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 1561. www.irjet.net
- Peterson, F., Hartmann, T., Fruchter, R., & Fischer, M. (2011). Teaching construction project management with BIM support: Experience and lessons learned. *Automation in Construction*, 20(2), 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.09.009>
- Plan BIM Perú. (2023). *Guía Nacional BIM Gestión de la información para inversiones desarrolladas con BIM Versión 2023*.
- Planbim. (2019). *Estándar BIM para proyectos públicos* (1a ed.).
- Pons, J. F. (2014). *Introducción a Lean Construction* (1a ed.). Fundación Laboral de la Construcción. www.fundacionlaboral.org
- Presley, A., & Meade, L. (2010). Benchmarking for sustainability: an application to the sustainable construction industry. *Benchmarking: An International Journal*, 17(3), 435–451. <https://doi.org/10.1108/14635771011049380>
- Project Management Institute. (2021). Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos y El Estándar para la Dirección de Proyectos. En *Guía del PMBOK*.
- Rioja, S. (2022). *PLANTEAMIENTO DE UNA HERRAMIENTA DE SEGUIMIENTO Y CONTROL DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN DE INFRAESTRUCTURA VIAL SOPORTADO EN POWER BI*. Universidad de los Andes.
- Rodrigues, F., Alves, A. D., & Matos, R. (2022). Construction Management Supported by BIM and a Business Intelligence Tool. *Energies*, 15(9). <https://doi.org/10.3390/en15093412>
- Rokoei, S. (2015). Building Information Modeling in Project Management: Necessities, Challenges and Outcomes. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 210, 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.11.332>
- Salvatierra, J. L., Gálvez, M. Á., Bastías, F., Castillo, T., Herrera, R. F., & Alarcón, L. F. (2019). Developing a benchmarking system for architecture design firms. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 26(1), 139–152. <https://doi.org/10.1108/ECAM-05-2018-0211>
- Schaufelberge, J., & Holm, L. (2017). *Management of Construction Projects : A Constructors Perspective* (2a ed.). Routledge.

- Schwaber, K., & Sutherland, J. (2020). *La Guía de Scrum*.
- Silva Sarmiento, E. J. (2022). *ESTRUCTURACIÓN DE METODOLOGÍA DE TRABAJO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE PROYECTOS VIS BASADA EN LEAN CONSTRUCTION*. Universidad Militar Nueva Granada.
- Sobieraj, J., Metelski, D., & Nowak, P. (2021). PMBoK vs. PRINCE2 in the context of Polish construction projects: Structural equation modelling approach. *Archives of Civil Engineering*, 67(2), 551–579. <https://doi.org/10.24425/ace.2021.137185>
- Špundak, M. (2014). Mixed Agile/Traditional Project Management Methodology – Reality or Illusion? *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 119, 939–948. <https://doi.org/10.1016/J.SBSPRO.2014.03.105>
- Stanitsas, M., Kirytopoulos, K., & Leopoulos, V. (2021). Integrating sustainability indicators into project management: The case of construction industry. *Journal of Cleaner Production*, 279. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123774>
- Streule, T., Miserini, N., Bartlomé, O., Klippel, M., & De Soto, B. G. (2016). Implementation of Scrum in the Construction Industry. *Procedia Engineering*, 164, 269–276. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.619>
- Succar, B. (2009). Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. *Automation in Construction*, 18(3), 357–375. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.10.003>
- Succar, B., Sher, W., & Williams, A. (2012). Measuring BIM performance : Five metrics. *Architectural Engineering and Design Management*, 8(2), 120–142. <https://doi.org/10.1080/17452007.2012.659506>
- Tennant, S., & Langford, D. (2008). The construction project balanced scorecard. *Procs 24th Annual ARCOM Conference*, 361–370.
- The Computer Integrated Construction Research Program. (2010). *BIM Project Execution Planning Guide* (2a ed.). The Pennsylvania State University.
- Toor, S. ur R., & Ogunlana, S. O. (2010). Beyond the “iron triangle”: Stakeholder perception of key performance indicators (KPIs) for large-scale public sector development projects. *International Journal of Project Management*, 28(3), 228–236. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2009.05.005>
- Torres, F. (2021). *PLANIFICACIÓN Y ANÁLISIS FINANCIERO EN UN PROYECTO DE RENOVACIÓN DE REDES LOCALES DE ACUEDUCTO, ALCANTARILLADO SANITARIO Y PLUVIAL, UBICADO EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C., POR MEDIO DE METODOLOGÍAS AGILES*. Universidad Católica de Colombia.

- UNE. (2021). *UNE-EN 17412-1:2021 Nivel de información necesario. Parte 1: Conceptos y principios*.
- Wang, T., & Chen, H.-M. (2023). Integration of building information modeling and project management in construction project life cycle. *Automation in Construction*, *150*, 104832. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104832>
- Winch, G. M. (2003). How innovative is construction? Comparing aggregated data on construction innovation and other sectors – a case of apples and pears. *Construction Management and Economics*, *21*(6), 651–654. <https://doi.org/10.1080/0144619032000113708>
- Won, J., & Lee, G. (2016). How to tell if a BIM project is successful: A goal-driven approach. *Automation in Construction*, *69*, 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.05.022>
- Yang, H., Yeung, J. F. Y., Chan, A. P. C., Chiang, Y. H., & Chan, D. W. M. (2010). A critical review of performance measurement in construction. *Journal of Facilities Management*, *8*(4), 269–284. <https://doi.org/10.1108/14725961011078981>
- Yu, I., Kim, K., Jung, Y., & Chin, S. (2007). Comparable Performance Measurement System for Construction Companies. *Journal of Management in Engineering*, *23*(3), 131–139. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0742-597x\(2007\)23:3\(131\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0742-597x(2007)23:3(131))

....