



UNIVERSIDAD MAYOR REAL Y PONTIFICIA DE
SAN FRANCISCO XAVIER
DE CHUQUISACA

**Evaluación de la Interoperabilidad e Integridad de Datos
mediante Ecosistema BIM para el Diseño Sismorresistente
conforme a la NBDS-2023: Caso Edificio de Oficinas.**

Autor:

Jimmy Meneses Caballero

Tutor:

M.Sc. Ing. Dante López Loredó

Maestría en BIM MANAGEMENT, Versión I

2026

Declaración de originalidad y derechos de autor

Como autor declaro que el presente trabajo académico es original, excepto donde he reconocido la información generada por otros autores por medio de citaciones en el estilo requerido.

En caso de existir información confidencial (*e.g.*, información proveniente de reportes gubernamentales, institucionales, privados o similares, personas naturales, *etc.*), manifiesto que he obtenido el permiso por escrito para incluir esa información en este trabajo académico.

Autorizo a las instancias competentes de la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca (USFX) a someter este trabajo académico a una evaluación de integridad académica por medio de una herramienta establecida para este propósito. Asimismo, autorizó a la USFX a hacer de este trabajo académico un documento disponible para su lectura en el repositorio institucional.

Finalmente, manifiesto mi consentimiento para que este trabajo académico pueda ser publicado, total o parcialmente, respetando la propiedad intelectual del autor.

Jimmy Meneses Caballero

11/06/2026

Dedico este trabajo a mis padres Alberto Meneses Montaño y Eufracia Caballero Abasto de Meneses, quienes me han brindado su apoyo de forma incondicional, han sido el pilar fundamental a lo largo de toda mi formación académica. Su constante respaldo y motivación han sido la fuerza que me ha permitido perseverar y superar los desafíos. A ustedes les debo mi éxito y les estoy profundamente agradecido por todo lo que han hecho por mí.

Agradecimientos

Agradezco sinceramente a todas las personas e instituciones que han sido parte fundamental para la realización de este trabajo.

A mi tutor por su constante orientación, paciencia y valiosos consejos durante todo el desarrollo de esta tesis, guiándome para alcanzar los objetivos planteados.

A mi tutor de Miller&Co, por compartir sus conocimientos, experiencias y motivación que han sido cruciales para el desarrollo de trabajo y para mi formación académica y profesional.

A mis compañeros de la maestría, quienes compartieron esta intensa experiencia de aprendizaje. Agradezco por su constante apoyo, comprensión, colaboración y por debates enriquecedores que hemos compartido. Su compañerismo y espíritu de equipo han hecho de este viaje en una experiencia inolvidable.

Finalmente, a la Universidad Mayor Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca por el apoyo institucional, colaboración y dedicación en el diseño y la gestión de este programa, que me han proporcionado una experiencia educativa única y enriquecedora.

Sin su colaboración, este trabajo no se hubiera logrado satisfactoriamente.

Contenido

Página

Declaración de originalidad y derechos de autor	III
Dedicatoria	V
Agradecimientos	VII
Contenido	IX
Lista de figuras.....	XI
Lista de tablas	XII
Lista de abreviaturas y símbolos.....	XIV
Resumen.....	XV
Abstract	XVI
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Problema de Investigación.....	2
1.3. Justificación	3
1.4. Objetivos	4
1.5. Hipótesis	4
1.6. Contribución al Estado del Conocimiento	5
1.7. Organización de la Tesis	5
2. Marco Teórico	7
2.1. Antecedentes de la Investigación.	7
2.2. Fundamentos de BIM en la Ingeniería Estructural.	10
2.3. Ecosistema BIM y Gestión de la Información.	13
2.4. Interoperabilidad en Entornos BIM-Análisis Estructural.	17
2.5. Fundamentos del Diseño Sismorresistente.	21

2.6. Método Tradicional vs Flujo BIM	24
2.7. Síntesis Teórica: Modelo Conceptual de la Investigación.	26
3. Marco Metodológico.....	29
3.1. Enfoque, Tipo y Diseño de Investigación.	29
3.2. Justificación y Selección del Caso de Estudio.	30
3.3. Población, Muestra y Unidad de Análisis	30
3.4. Alcances, Limitaciones y Control de Sesgos.	31
3.5. Alineamiento Metodológico con Usos BIM Penn State.	31
3.6. Framework Metodológico Miller&Co (Modelo Conceptual).....	32
3.7. Esquema Metodológico Replicable (Miller&Co).....	33
3.8. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.	40
3.9. Validez, Confiabilidad y Reproducibilidad.	41
3.10. Justificación de Herramientas Tecnológicas.	41
3.11. Operacionalización de Variables.	42
3.12. Consideraciones Éticas y Técnicas.	43
4. Análisis y Discusión de Resultados.	45
4.1. Parametrización del Modelo Estructural (NBDS-2023).	45
4.2. Análisis de la Interoperabilidad Bidireccional.	61
4.3. Contraste de la Eficiencia Operativa y Precisión de Datos.....	73
4.4. Validación de Documentación Técnica y Cálculos Métricos (LOD 350).	80
4.5. Cierre del Objetivo General y Validación de Hipótesis.	90
5. Propuesta.....	96
6. Conclusiones y Recomendaciones.....	101
Referencias Bibliográficas	105
A. Memoria de Cálculo de la Demanda Sísmica (NBDS-2023) - Anexo A.....	A-1
B. Cuantificación de Obra y Planos Estructurales – Anexo B.....	A-3

Lista de figuras

Página

Figura 2-1. Estructura Conceptual del Building Information Modeling (BIM)	10
Figura 2-2. Dualidad Modelo Físico vs Modelo Analítico.	12
Figura 2-3. Niveles de Desarrollo (LOD-LOI) del modelo BIM.....	13
Figura 2-4. Flujo de Información en un CDE bajo ISO 19650.....	14
Figura 2-5. Tempalte/Estructura de Datos (Miller&Co).....	16
Figura 2-6. Esquema de Interoperabilidad BIM en el Entorno Común de Datos.	18
Figura 3-1. Localización del Caso de Estudio.	30
Figura 4-1. Esquema Metodológico Replicable Secuencial (Caso de Estudio).....	46
Figura 4-2. Clasificación por Sistema/Niveles Enlazados al DATUM.dwg.....	47
Figura 4-3. Vinculación DATUM.dwg – DATUM (Revit) – Punto Base.....	48
Figura 4-4. Validación Técnica mediante Coordination Review (Revit).	48
Figura 4-5. Espectro Sísmico mediante flujo Dynamo-Robot Structural	53
Figura 4-6. Correspondencia Geométrica del Modelo Físico vs Analítico (Revit)	54
Figura 4-7. Matriz de Evaluación de Interoperabilidad entre Plataformas.	62
Figura 4-8. Verificación de Integridad en la Transferida de Datos (Revit-Robot).....	63
Figura 4-9. Cronograma de Interoperabilidad BIM (Revit – Robot Structural).	65
Figura 4-10. Integración de las Simulaciones Dinámicas (Variación Masas Sísmicas). ..	65
Figura 4-11. Modelo Estructural Comparativo: Robot Structural vs ETABS.	67
Figura 4-12. Análisis Comparativo de Desempeño Temporal por Fase	74
Figura 4-13. Despiece Viga de Hormigón Armado (Parámetros NBDS-2023).....	85
Figura 4-14. Despiece Zapata Combinada Hormigón Armado (Modelo Federado).....	85
Figura 4-15. Cuantificación Automática Volúmenes y Acero de Refuerzo (BIM).	86
Figura A.1. Espectro de Elástico vs Inelástico.....	A-2

Lista de tablas

Página

Tabla 2-1. Relación Nivel de Desarrollo (LOD) y Extracción de Cálculos Métricos	13
Tabla 2-2. Epistemología Comparada (ISO 19650 – BEP Penn State – Miller&Co).....	17
Tabla 2-3. Comparativa de Mecanismos de Interoperabilidad Estructural	19
Tabla 2-4. Parámetros Sísmicos (NBDS-2023) e Implicancias en el Entorno S-BIM	22
Tabla 2-5. Comparativa de Eficiencia Temporal: CAD y Flujo BIM	25
Tabla 3-1. Mapeo Metodológico: Objetivos Específicos y Usos BIM Penn State	32
Tabla 3-2. Operacionalización de Variables.....	42
Tabla 4-1. Síntesis de Validación de la Integridad de Datos	49
Tabla 4-2. Validación de Fidelidad Geométrica y Paramétrica.....	50
Tabla 4-3. Propiedades Mecánicas e Inyección de Metadatos Normativos	51
Tabla 4-4. Evaluación de la Eficiencia Temporal del Modelo Analítico	52
Tabla 4-5. Verificación de Distorsiones de Entrepiso (Dirección X-X e Y-Y)	56
Tabla 4-6. Matriz de Cierre y Cumplimiento Técnico - Normativo (NBDS-2023).....	56
Tabla 4-7. Matriz de Evaluación de Interoperabilidad entre Plataformas.	61
Tabla 4-8. Verificación de Integridad en la Transferencia de Datos (Revit→Robot)	62
Tabla 4-9. Validación del Flujo Bidireccional (Round- Trip Workflows)	64
Tabla 4-10. Respuesta Dinámica y Modal (Variación de Masas Sísmicas NBDS-2023). 66	
Tabla 4-11. Coherencia de modelos Analíticos bajo NIST GCR 11-917-11.	67
Tabla 4-12. Comparativa de Tiempos de Ejecución: Método Tradicional vs BIM.	73
Tabla 4-13. Evaluación de Calidad Documental: Errores por categoría.....	75
Tabla 4-14. Riqueza de Información por Elemento Estructural bajo LOD 350	81
Tabla 4-15. Verificación de información No Geométrica (Metadatos LOD 350)	82
Tabla 4-16. Resumen de Validación de la Hipótesis Principal	92

Tabla 4-17. Comparación entre Método CAD Tradicional y Ecosistema BIM	93
Tabla 5-1. Flujo de Trabajo Operativo y Control de Calidad del Modelo BIM.....	98
Tabla A-1. Parametros Técnicos para la Construcción del Espectro	A-1
Tabla A-2. Matriz de Aceleración Espectral del Proyecto (Elástico vs Inelástico).....	A-2

Lista de abreviaturas y símbolos

AEC: Arquitectura, ingeniería y construcción

ARQ: Arquitectura

BIM: Building Information Modeling

BMO: BIM manager office

CDE: Entorno común de Datos

CAD: diseño asistido por computadora (Computers Aided Design)

EST: Estructura

DWG: Drawing

DWF: Design web formato

NWD: Documento Navisworks

NBDS-2023: Norma boliviana de diseño sísmico 2023.

ACCC: Automated Code Compliance Checking.

S-BIM: Structural BIM

Resumen

En Bolivia, la industria de la Arquitectura, Ingeniería y Construcción (AEC) presenta una fragmentación crítica derivada de la dependencia de flujos tradicionales basados en CAD 2D, lo que genera una desconexión asincrónica entre el diseño arquitectónico y el modelo estructural. La brecha científica radica en la ausencia de mecanismos validados que garanticen la integridad de los datos bajo la norma sísmica NBDS-2023. Para abordar esta carencia, la investigación evalúa la viabilidad técnica de la interoperabilidad en un ecosistema BIM mediante un flujo bidireccional entre el modelado paramétrico y el análisis estructural, con el fin de mitigar la pérdida de información y reducir inconsistencias de diseño.

Se empleó una metodología cuantitativa y empírico-experimental, utilizando una estructura de datos estandarizada con nivel de desarrollo LOD 350 y se comparó el método propuesto frente al enfoque convencional mediante indicadores de desempeño operativo y consistencia semántica.

Los resultados demuestran una correspondencia paramétrica del 98.64% en condiciones nativas, una mejora del 67.4% en la eficiencia temporal global y una reducción del 94.3% en las inconsistencias documentales, lo que disminuye los ciclos de modificación a un promedio de 40.5 minutos. Se concluye que la gestión paramétrica integrada actúa como un repositorio técnico centralizado que facilita el cumplimiento de los requisitos sismorresistente de la NBDS-2023, contribuyendo a acortar la brecha entre la práctica profesional y las exigencias de seguridad estructural.

Palabras clave: BIM; Interoperabilidad; Diseño Sismorresistente; NBDS-2023; Flujo Bidireccional; Enfoque Empírico-Experimental; Eficiencia Operativa.

Abstract

In Bolivia, the Architecture, Engineering, and Construction (AEC) industry faces critical fragmentation due to reliance on traditional 2D CAD-based workflows, which generates an asynchronous disconnect between architectural design and structural models. The scientific gap lies in the absence of validated mechanisms to ensure data integrity under the NBDS-2023 seismic standard. To address this shortcoming, this research evaluates the technical feasibility of interoperability in a BIM ecosystem through a bidirectional workflow between parametric modeling and structural analysis, aiming to mitigate information loss and reduce design inconsistencies.

A quantitative, empirical-experimental methodology was employed, using a standardized data structure with a Level of Development (LOD) of 350. The proposed method was compared against the conventional approach using operational performance and semantic consistency indicators.

The results indicate a parametric correspondence of 98.64% under native conditions, a 67.4% improvement in overall time efficiency, and a 94.3% reduction in documentary inconsistencies, which reduces modification cycles to an average of 40.5 minutes. It is concluded that integrated parametric management acts as a centralized technical repository that facilitates compliance with the seismic-resistant requirements of NBDS-2023, helping to bridge the gap between professional practice and structural safety demands.

Keywords: BIM; Interoperability; Seismic-resistant design; NBDS-2023; Bidirectional workflow; Empirical-experimental approach; LOD 350; Operational efficiency.

1. Introducción

1.1. Antecedentes

El sector de la construcción experimenta una transformación sistémica impulsada por la metodología BIM (*Building Information Modeling*), que ha desplazado los procesos fragmentados basados en CAD bidimensional hacia ecosistemas de modelado paramétrico enriquecido, permitiendo una gestión integral del ciclo de vida del proyecto mediante información técnica estructurada (Eastman, 2011). Globalmente, la adopción de BIM se ha consolidado como política pública: mientras el Reino Unido y naciones nórdicas implementan mandatos obligatorios, en Latinoamérica, países como Chile, Brasil y Colombia desarrollan estrategias de estandarización (Succar 2009).

Sin embargo, en la ingeniería estructural sismorresistente, los flujos de trabajo BIM enfrentan desafíos críticos de *interoperabilidad e integridad de datos*. La literatura científica identifica puntos de ruptura en la transferencia entre plataformas de modelado geométrico y de análisis estructural, evidenciados en la pérdida de *consistencia semántica* y la degradación de modelos analíticos durante la exportación (Volk et al., 2014). Estas limitaciones obligan frecuentemente a la transcripción manual de datos, incrementando el error humano y comprometiendo la precisión analítica indispensable para la seguridad estructural.

En Bolivia, la vigencia de la NBDS-2023 representa un hito técnico al actualizar la caracterización sísmica y clasificación dinámica de suelos; sin embargo, existe una asimetría entre la modernización normativa y la práctica profesional: los métodos tradicionales carecen de mecanismos automatizados para validar la integridad de la información técnica en modelos complejos. En entornos como Cochabamba (sismicidad

moderada, $S_o = 0.22g$; suelo tipo S4), se requiere un control de los parámetros analíticos para garantizar la resiliencia estructural.

La revisión de la literatura revela que, si bien existen herramientas con interoperabilidad nativa, no se ha documentado cómo un estándar de datos estructurado (como la Estructura de Datos Miller&Co) preserva la integridad de la información bajo la NBDS-2023. Esto genera una triple brecha de conocimiento: *empírica*, por la falta de evidencia sobre la precisión del flujo bidireccional Revit-Robot en el contexto boliviano; *metodológica*, ante la carencia de protocolos validados que eviten pérdidas de datos estructurales en entornos BIM; y *normativa*, debido a la inexistencia de un marco que traduzca las exigencias de la NBDS-2023 en parámetros digitales dinámicos dentro del modelo.

1.2. Problema de Investigación

A diferencia de los enfoques convencionales únicamente en la adopción de software BIM, la brecha científica central que aborda esta investigación radica en la *ausencia de un protocolo validado en el contexto boliviano que garantiza la integridad semántica de los parámetros sísmicos de la NBDS-2023 durante el flujo bidireccional entre el modelado paramétrico y el motor de análisis de estructural*. La literatura actual reporta que, si bien la transferencia geométrica ha alcanzado niveles de fidelidad aceptables, la preservación de metadatos no gráficos, tales como la caracterización espectral, perfiles de suelo (S_o a S_5), coeficientes de reducción (R) y factores de importancia (I_e), sufre una degradación sistemática al pasar entre entornos de autoría y cálculo. En consecuencia, esa investigación resuelve dicha vacancia mediante la parametrización explícita del Nivel de Información y la estructuración estandarizada de datos.

En este marco, el diseño sismorresistente bajo la NBDS-2023 sufre de una fragmentación operativa debido a la dependencia de la transcripción manual de datos entre el modelo estructural y el motor de cálculo. Esta práctica rompe la cadena de custodia de la información técnica, generando el riesgo de que los modelos analíticos no representen fielmente las rigideces y masas del sistema resistente lo que comprometería la integridad de datos exigida por la normativa. Dicha fragmentación se expresa en dos síntomas críticos:

(i) discrepancias entre el modelo geométrico-paramétrico y el modelo analítico de cálculo, y (ii) la pérdida potencial de metadatos sísmicos (coeficientes de zona, tipo de suelo y factores de reducción) durante la migración entre plataformas.

Formulación del Problema:

¿De qué manera la implementación de un ecosistema BIM, basado en la Estructura de Datos Miller&Co y el estándar LOD 350, permite evaluar y asegurar la integridad de los datos y la consistencia semántica en el cumplimiento de la normativa NBDS-2023, en comparación con el flujo de trabajo tradicional basado en CAD?

1.3. Justificación

- **Justificación Técnica.** La investigación se realiza para analizar si la Estructura de Datos Miller&Co fortalece la integridad de la transferencia de información técnica, buscando mitigar errores de transcripción y evaluando la eficiencia de la interoperabilidad bidireccional entre el modelo estructural y el motor de cálculo.
- **Justificación Metodológica.** A nivel metodológico, la selección de una edificación de oficinas de 4 plantas responde a la necesidad de establecer un entorno de prueba controlado (test-bench). En el ámbito de la gestión de datos e interoperabilidad BIM, la evaluación de la integridad semántica demanda un escenario base que sea completamente auditable celda por celda. Introducir una estructura hipercompleja o de gran altura en esta etapa habría saturado el flujo con variables exógenos, dificultando aislar los fenómenos específicos de estudio (como la pérdida semántica, truncamiento de metadatos o la desalineación analítica de las APIs). Por lo tanto, la escala de la edificación está plenamente justificada, ya que contiene todos los elementos típicos, las restricciones geométricas y las demandas analíticas críticas de la NBDS-2023 necesarios para validar y auditar con precisión el canal de comunicación digital.
- **Justificación Científica y Académica.** Ante la carencia de metodologías documentadas que vinculen procesos BIM con la normativa sísmica boliviana, esta tesis se justifica al proponer un marco metodológico que somete a validación científica el uso de estos ecosistemas bajo la NBDS-2023.

- **Justificación Social y Profesional.** La seguridad estructural en entornos urbanos exige procesos de alta precisión. Este trabajo es necesario para proponer estándares que eleven la resiliencia de las infraestructuras y mejoren la transparencia técnica y económica mediante el uso de niveles de desarrollo LOD 350.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Evaluar la interoperabilidad e integridad de datos mediante un Ecosistema BIM para el diseño sismorresistente conforme a la NBDS-2023 en un edificio de oficinas, con el fin de garantizar la consistencia semántica y fiabilidad del modelo estructural.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Parametrizar el modelo S-BIM en la estructura de datos Miller&Co bajo la NBDS-2023.
- Analizar la interoperabilidad bidireccional entre el modelo S-BIM y el motor de cálculo.
- Contrastar la eficiencia operativa y precisión de datos BIM frente al método tradicional.
- Validar la documentación técnica y cálculos métricos bajo un estándar LOD 350.

1.5. Hipótesis

H1 – Hipótesis Principal: La aplicación de un flujo de trabajo basado en la Estructura de Datos Miller&Co y una gestión de interoperabilidad bidireccional reduce significativamente la degradación de la información analítica, permitiendo una correspondencia precisa entre el modelo paramétrico y los requerimientos sismorresistentes de la normativa NBDS-2023.

H0 – Hipótesis Nula. La implementación del ecosistema BIM no produce diferencias significativas en la integridad de los datos analíticos respecto al método CAD tradicional bajo los parámetros de la NBDS-2023.

1.6. Contribución al Estado del Conocimiento

La investigación aporta al campo de la ingeniería estructural mediante:

- **Estandarización de flujos de trabajo bajo normativa local.** A diferencia de las implementaciones BIM genéricas, esta tesis integra sistemáticamente NBDS-2023 con el entorno S-BIM. Radica en la traducir los requisitos normativos a parámetros digitales específicos, permitiendo que la norma opere como componente intrínseco del modelo de información y no solo como referente externo de cálculo.
- **Protocolo de integridad de datos mediante Miller&Co.** El trabajo valida la Estructura de Datos Miller&Co como un mecanismo de control de calidad para la integridad de la información. Se demuestra científicamente que la adopción de un estándar de datos estructurado mitiga la entropía informacional durante la interoperabilidad bidireccional, resolviendo la discrepancia crítica entre el modelo geométrico y el modelo analítico.
- **Definición del estándar LOD 350 para Diseño Sismorresistente.** La investigación aporta una guía práctica para alcanzar el LOD 350, orientado a la precisión requerida en edificios de oficinas con exigencias sísmicas. Esto trasciende el modelado convencional al documentar el flujo de información necesario para que los cómputos métricos y los detalles de refuerzo sean resultado directo de un proceso de cálculo integrado.

1.7. Organización de la Tesis

El presente trabajo se estructura en seis capítulos interconectados de la siguiente manera:

- **Capítulo 1. Introducción:** Establece el marco conceptual inicial, exponiendo los antecedentes, la brecha de conocimiento identificada, el problema de investigación, la hipótesis y los objetivos que orientan el estudio.
- **Capítulo 2. Marco Teórico:** Desarrolla una revisión exhaustiva de la literatura sobre gestión de información BIM e interoperabilidad. Aborda los principios de análisis sismorresistente bajo NBDS-2023 y los estándares de la ISO 19650.
- **Capítulo 3. Marco Metodológico:** Detalla el diseño de la investigación y el caso de estudio. Se fundamenta en un protocolo de cuatro fases para evaluar la integridad de datos, empleando LOD 350 y conectores API entre plataformas de modelado y cálculo.

- **Capítulo 4. Análisis y Discusión de Resultados:** Evalúa los hallazgos mediante métricas de interoperabilidad y eficiencia temporal. Contrasta el desempeño del flujo BIM frente a los métodos tradicionales, validando las ventajas del modelo propuesto.
- **Capítulo 5. Propuesta:** Presenta lineamientos técnicos para la implementación de ecosistemas BIM en el ámbito profesional del diseño estructural.
- **Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones:** Sintetiza los resultados en función de la hipótesis y propone lineamientos técnicos para la implementación de ecosistemas BIM en el ámbito profesional del diseño estructural.

Finalmente, se incluyen las Referencias Bibliográficas y Anexos, que contienen la documentación técnica complementaria (planos, memorias de cálculo y tablas de resultados) que brindan validez científica a la investigación.

2. Marco Teórico

2.1. Antecedentes de la Investigación.

2.1.1. Antecedentes Internacionales: BIM en el Diseño Estructural.

La metodología *Building Information Modeling* (BIM) ha evolucionado de ser un sistema de modelado tridimensional geométrico a un entorno integral de gestión de información técnica para el ciclo de vida de los proyectos de ingeniería. Sacks et al. (2018) la definen como un proceso colaborativo que integra datos geométricos y analíticos en una plataforma, lo que permite sincronizar automáticamente cargas y propiedades de materiales. Esto genera reducciones documentadas de entre el 40% y el 60% en el tiempo de transcripción manual y en los errores asociados al diseño estructural tradicional.

En el ámbito del diseño sismorresistente, la literatura especializada identifica dos posturas complementarias sobre el alcance y las condiciones de implementación de BIM. Por un lado, Succar (2009) propone un marco de madurez trifásico (tecnología, proceso y políticas), para evaluar la interoperabilidad y eficiencia de los flujos de trabajo BIM. Bajo esta línea, Sampaio et al. (2021) analizaron la transferencia entre plataformas de modelado (ArchiCAD, Revit) y motores de cálculo (SAP, Robot, ETABS), demostraron que los entornos BIM con mayor madurez procesal exhiben tasas de detección de errores significativamente mayores, aunque persisten limitaciones sistemáticas vinculadas al formato de transferencia. Por otro lado, Habte y Guyo (2021) advierten que la madurez tecnológica no garantiza por sí misma la integridad de los datos. En su investigación sobre la interoperabilidad Revit-ETABS, identificaron que gran parte de los datos del análisis estructural queda excluida del modelo central, configurando "islas de información" que erosionan la eficiencia del flujo integrado.

Esta tensión es evidente al evaluar la interoperabilidad. Kassem et al. (2015) identificaron pérdidas de información de hasta el 30% en propiedades analíticas al transferir modelos mediante archivos IFC. Este hallazgo fue contrastado por Sampaio et al. (2021), quienes confirmaron que el formato IFC produce pérdidas de información estructural consistentes en todas las plataformas evaluadas, mientras que los formatos propietarios nativos mantienen una fidelidad geométrica superior al 98%, aunque también limitan la transferencia de propiedades analíticas no geométricas. La diferencia metodológica entre ambos estudios (evaluación unidireccional versus bidireccional) evidencia que las pérdidas de interoperabilidad son asimétricas y dependen del sentido del flujo de datos. Esta premisa sustenta la necesidad de establecer protocolos de verificación diferenciados para cada dirección del flujo dentro del ecosistema Revit-Robot Structural Analysis, objetivo central de la presente investigación.

2.1.2. Antecedentes Latinoamericanos.

En América Latina, la adopción de BIM en el diseño sismorresistente es heterogénea y está liderada por países con alta actividad sísmica y marcos normativos consolidados. Alvarado Mamani y Aguilar Chuquimia (2023) realizaron un estudio comparativo utilizando la interoperabilidad entre Revit y Robot Structural Analysis para evaluar la respuesta espectral de edificios bajo las normas sísmicas de Perú (E.030), Chile (BCh433) y Ecuador (NEC). Concluyeron que la implementación de análisis modal espectral en entornos BIM es técnicamente viable, pero exige una parametrización normativa explícita para cada reglamento, dado que los parámetros sísmicos no se transfieren automáticamente. Este hallazgo es directamente extrapolable al contexto boliviano de la NBDS-2023.

En el dominio de la transferencia de datos, Sampaio et al. (2021) documentaron que las inconsistencias más frecuentes ocurren en las condiciones de apoyo (67% de los casos requirió corrección manual) y en la asignación de cargas (el 54% de los patrones de carga requirió reverificación tras la transferencia). Estas tasas de corrección manual son consistentes con los hallazgos de Santos et al. (2017) en Brasil, donde el 42% de las propiedades analíticas requirió ajuste post-transferencia. Estos datos refuerzan la importancia de diseñar mecanismos complementarios de verificación para el flujo Revit-

Robot Structural Analysis en Bolivia. La NBDS-2023 introduce parámetros sísmicos específicos (aceleración máxima del suelo S_0 , perfiles de suelo $S0$ a $S5$) no contemplados en las plantillas estándar de las plataformas internacionales, lo que incrementa el riesgo de error humano en la fase de modelado analítico.

2.1.3. Antecedentes Nacionales (Bolivia).

En Bolivia, la literatura científica sobre BIM y diseño estructural es incipiente. Tras la promulgación de la NBDS-2023 mediante la Resolución Ministerial 1447/2023, las búsquedas sistemáticas en bases indexadas (Scopus, Web of Science, ScieELO) y repositorios institucionales bolivianos utilizando los términos BIM, Bolivia y Structural Design, no identificaron publicaciones arbitradas, lo que confirma un vacío académico. Esta ausencia implica que la comunidad técnica local carece de evidencia empírica propia sobre la viabilidad, beneficios y limitaciones de implementar flujos BIM bajo los requisitos específicos de la norma nacional.

Al respecto, Cano Condori (2025) señala que, en el eje troncal boliviano, la transferencia de parámetros sísmicos en los procesos de diseño estructural es predominantemente manual, lo que eleva el riesgo de errores en la definición de factores de zona, tipos de suelo e importancia exigidos por la NBDS-2023. Esta práctica compromete la integridad del diseño y representa una brecha metodológica estructural: mientras la evidencia internacional (Habte y Guyo 2021; Sampaio et al. 2021) demuestra que los flujos BIM-análisis reducen drásticamente estos errores al usar protocolos adecuados, Bolivia aún carece de metodologías adaptadas a su contexto normativo.

En síntesis, la revisión de los antecedentes permite identificar cuatro brechas que fundamentan la presente investigación: (i) Ausencia de metodologías para implementar la NBDS-2023 en entornos BIM parametrizados; (ii) Incertidumbre sobre la integridad de datos en modelos estructurales complejos bajo condiciones normativas bolivianas; (iii) Carencia de estándares para el Nivel de Información (LOI) sísmico adaptados a la NBDS-2023; y (iv) Ausencia de procesos documentados sobre sincronización bidireccional Revit-Robot Structural Analysis en el contexto nacional.

2.2. Fundamentos de BIM en la Ingeniería Estructural.

2.2.1. Building Information Modeling (BIM)

Building Information Modeling (BIM) es un proceso colaborativo basado en modelos digitales que integra información geométrica y no geométrica para el diseño, análisis, construcción y operación de activos construidos. Sacks et al. (2021) identifican cinco características fundamentales que distinguen a BIM de los sistemas CAD convencionales: (1) Representación digital basada en objetos inteligentes; (2) Elementos paramétricos con reglas de relación interdependientes; (3) Consistencia y no redundancia de datos entre vistas y documentos; (4) Coordinación automática entre representaciones; y (5) Capacidad de soportar análisis y simulación técnica.

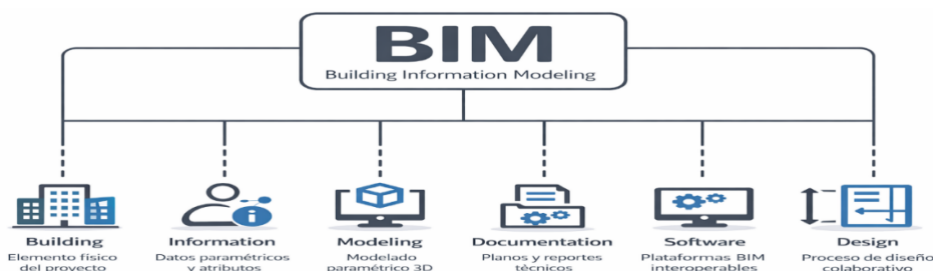


Figura 2-1. Estructura Conceptual del Building Information Modeling (BIM)

En la literatura especializada coexisten interpretaciones que van desde la visión estrictamente tecnológica hasta conceptualizaciones que lo entienden como un paradigma de gestión de información. Succar (2009) define tres etapas de madurez: (i) Modelación basada en objetos (modelo 3D con información embebida); (ii) Colaboración basada en modelos (intercambio interdisciplinario estructurado); y (iii) Integración basada en redes (interoperabilidad completa y gestión integrada del ciclo de vida). Esta clasificación, aunque ampliamente adoptada, ha sido revisada críticamente por Godager et al. (2022), quienes argumentan que la madurez BIM no es lineal: las organizaciones pueden alcanzar altos niveles de gestión de información en dominios específicos (como el estructural) sin transitar necesariamente por todas las etapas de colaboración interdisciplinaria descritas por Succar (2009). Esta matización es relevante para el presente estudio, dado que el ecosistema Revit-Robot Structural Analysis puede alcanzar una alta madurez analítica sin necesariamente transitar por las etapas interdisciplinarias completas.

2.2.2. Structural BIM (S-BIM).

El término *Structural BIM* (S-BIM) designa la aplicación de la metodología BIM a la ingeniería estructural, diferenciándose de la arquitectura por sus estrictos estándares de integridad de datos. Sacks et al. (2021) sostienen que el S-BIM prioriza la fidelidad de propiedades analíticas (rigidez, apoyos, masas y cargas sísmicas), necesarias para el análisis computacional por elementos finitos. Un error dimensional del 2% en la sección transversal de una columna puede ser irrelevante para la coordinación espacial arquitectónica, pero altera el momento de inercia, lo que modifica el periodo natural de vibración de la estructura y consecuentemente, las fuerzas sísmicas de diseño.

Un punto de debate en la literatura es si el S-BIM debe concebirse como un subconjunto de BIM general o como un paradigma autónomo con su propio ciclo de vida informacional. Sampaio et al. (2021) ofrecen evidencia empírica relevante: el modelo estructural desarrollado con autonomía relativa respecto al arquitectónico permitió una mayor flexibilidad en la exploración de alternativas, pero introdujo riesgos de inconsistencia interdisciplinar que requirieron rondas adicionales de coordinación. Para los propósitos de la presente investigación, se adopta la perspectiva integracionista como punto de partida metodológico. Se reconoce que el flujo Revit-Robot Structural Analysis materializa esta integración, con la salvedad de que la sincronización debe ser selectiva: no toda la información del modelo Revit es analíticamente relevante para el modelo de cálculo en Robot Structural Analysis (Habte y Guyo 2021).

2.2.3. Dualidad Modelo Físico – Modelo Analítico.

La comprensión de la dualidad modelo físico-modelo analítico es fundamental para diseñar workflows BIM-análisis estructural eficientes. El **modelo físico** representa los elementos estructurales mediante geometría tridimensional real e información constructiva detallada. En contraste, el **modelo analítico** abstrae la estructura mediante representaciones simplificadas apropiadas para el cálculo numérico por elementos finitos (Flager et al. 2009): Elementos lineales unidimensionales (frame elements) para vigas y columnas; Elementos bidireccionales (Shell/Membrane): losas y muros; y Conectividades nodales con seis grados de libertad (3 traslaciones + 3 rotaciones).

La sincronización dinámica entre ambos modelos mediante vínculos paramétricos representa la evolución clave respecto a los flujos tradicionales. Habte y Guyo (2021) documentaron esta dualidad en su implementación Revit-ETABS-SAFE mediante el plugin CSIxRevit: el modelo físico en Revit alimenta el modelo analítico en ETABS, pero la transferencia inversa, de resultados de análisis al modelo BIM, requirió el desarrollo de plugins adicionales, lo que evidencia que la sincronización bidireccional no es una funcionalidad nativa, sino el resultado de un protocolo de implementación deliberado. Esta observación es metodológicamente central para el presente estudio, al trabajar con el ecosistema Revit-Robot Structural Analysis, cuya interoperabilidad nativa bidireccional constituye una ventaja diferencial respecto a otros pares de plataformas.

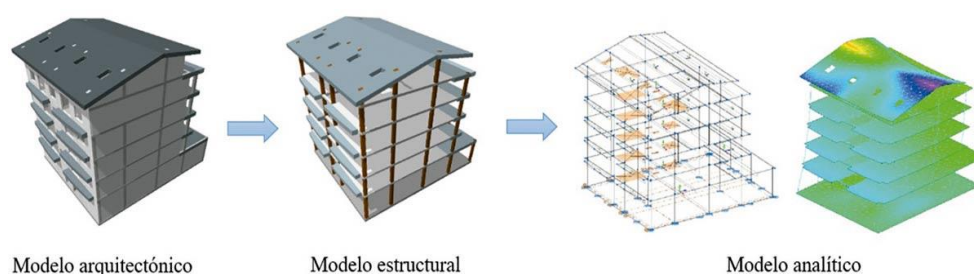


Figura 2-2. Dualidad Modelo Físico vs Modelo Analítico.

2.2.4. Niveles de Desarrollo (LOD) e Información (LOI).

Los Niveles de Desarrollo (LOD) proporcionan un marco estandarizado para especificar el grado de completitud del modelo BIM, desde LOD 100 (representación conceptual) hasta LOD 500 (as-built). El Nivel de Información (LOI) especifica el contenido no geométrico: propiedades mecánicas, parámetros sísmicos, cargas y cuantías de refuerzo.

Latiffi et al. (2015) establecen el LOD 350 como umbral mínimo para el diseño estructural, mientras que Monteiro y Poças Martins (2013) cuantifican la confiabilidad de los cálculos métricos en 95-98% a este nivel. Sin embargo, ambos estudios fueron realizados bajo los requisitos del Eurocódigo, que difiere de la NBDS-2023 en aspectos críticos como la caracterización espectral y la clasificación de suelos (S0 a S5). La transferencia directa de estos umbrales al contexto boliviano es, por tanto, metodológicamente cuestionable, lo que constituye uno de los aportes originales de la presente investigación al proponer criterios de información adaptados a la normativa local.

Tabla 2-1. Relación Nivel de Desarrollo (LOD) y Extracción de Cómputos Métricos

LOD	Descripción	Precisión Métrica	Aplicación	Referencia
LOD 100-200	Simbólico/esquemático.	50-70%	Estimación preliminar	(Monteiro y Poças Martins 2013)
LOD 300	Geometría definida, sin detalles de conexión.	90-92%	Licitación	(Valinejadshoubi et al. 2024)
LOD 350	Geometría detallada + coordinación interdisciplinar.	95-98%	Diseño definitivo/Análisis sísmico	(Valinejadshoubi et al. 2024)
LOD 400-500	Fabricación /As-built verificado.	98-99%	Fabricación/Operación	(Monteiro y Poças Martins 2013)

Notas. Elaborada según las especificaciones de BIMForum

En el contexto de la NBDS-2023, se identifica una brecha crítica entre el LOD y el LOI. Un modelo puede alcanzar LOD 350 en términos geométricos, pero carecer del nivel de información (LOI) necesario para el análisis sísmico; un ejemplo claro es la omisión de parámetros de clasificación de suelo (S_0 - S_5) o del factor de importancia (I_e). Esta desconexión constituye una de las debilidades principales en los flujos de trabajo actuales y representa el objeto directo de la metodología propuesta en esta investigación.

**Figura 2-3.** Niveles de Desarrollo (LOD-LOI) del modelo BIM.

2.3. Ecosistema BIM y Gestión de la Información.

2.3.1. Entorno Común de Datos (CDE) según ISO 19650.

La norma ISO 19650 (partes 1 y 2, publicadas en 2018) define el Entorno Común de Datos (CDE) como una fuente acordada de información para cualquier activo o proyecto, destinada a recopilar, gestionar y difundir cada contenedor de información mediante un proceso gestionado. En el contexto del diseño estructural, el CDE asegura la coherencia entre modelos analíticos, constructivos y documentales, lo que reduce inconsistencias y mejora la confiabilidad de los resultados técnicos. La norma establece cuatro estados de madurez de la información: **Work In Progress (WIP)**, **Shared**, **Published** y **Archive**.

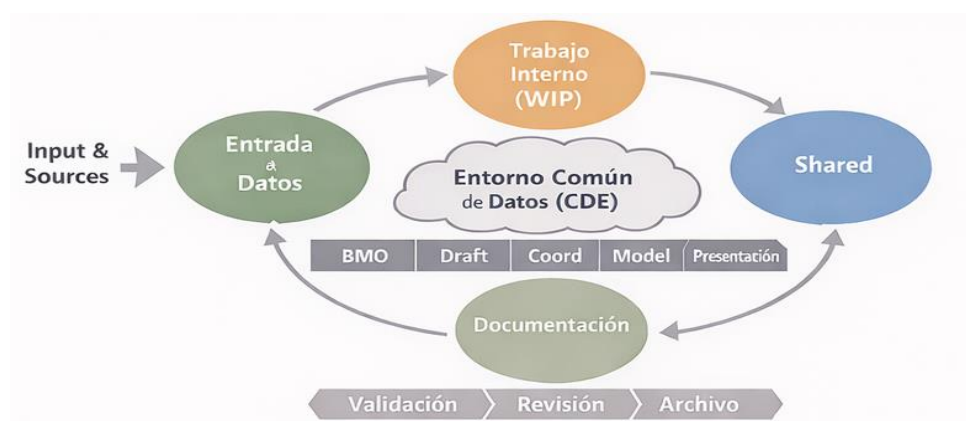


Figura 2-4. Flujo de Información en un CDE bajo ISO 19650.

Godager et al. (2022), en su análisis publicado en *Information Technology* (Vol. 27, pp. 1075-1095), señalan que la implementación exitosa del CDE depende no solo de la plataforma tecnológica adoptada, sino de la correcta definición de los Requerimientos de Información y la articulación de los Niveles de Necesidad de Información (LOIN). Esta distinción es fundamental para la presente investigación: el valor del CDE para garantizar la interoperabilidad bidireccional Revit-Robot Structural Analysis reside en el protocolo de gestión de información implementado sobre la plataforma, no en la plataforma misma.

2.3.2. El Ecosistema Revit – Robot Structural Analysis: Fundamento de Interoperabilidad Nativa.

El ecosistema Revit-Robot Structural Analysis constituye el entorno tecnológico central de la presente investigación. A diferencia de otros pares de plataformas que requieren formatos intermedios (IFC, e2k), Revit y Robot Structural Analysis comparten un vínculo de interoperabilidad nativa bidireccional dentro del entorno Autodesk, el cual permite la sincronización directa del modelo físico (Revit) y el modelo analítico (Robot Structural Analysis) mediante un canal de intercambio estructurado.

- **Ventaja diferencial respecto a otros pares:** Sampaio et al. (2021) documentaron que las transferencias mediante formato nativo mantienen una fidelidad geométrica superior al 98%, frente a pérdidas del 15-30% características del formato IFC. En el ecosistema Revit-Robot Structural Analysis, la sincronización nativa permite además la transferencia inversa de resultados de análisis (deformaciones, esfuerzos, verificaciones

normativas) al modelo BIM, configurando un flujo de trabajo verdaderamente bidireccional. Esta capacidad nativa contrasta con la necesidad de plugins adicionales documentada por Habte y Guyo (2021) para el flujo Revit-ETABS.

- **Limitación identificada:** aunque la interoperabilidad nativa reduce las pérdidas geométricas, la consistencia semántica de los parámetros sísmicos específicos de la NBDS-2023 (clasificación S0-S5, So por zona geográfica, Factor de Irregularidad Total) no está garantizada por el canal nativo. Esto se debe a que dichos parámetros no están contemplados en las plantillas estándar de las plataformas internacionales, lo cual constituye el núcleo del problema de investigación abordado en el presente estudio.

2.3.3. Delimitación Epistemológica: Framework Operativo Miller&Co vs Estándares Normativos Consolidados.

La incorporación del framework operativo Héctor Miller, (2024) en el presente estudio exige una delimitación epistemológica rigurosa que contraste su naturaleza con la de los estándares académicamente consolidados. Se establece una distinción trifurcada entre: (i) estándares normativos internacionales con validación científica sistemática; (ii) framework académicos con procesos de revisión por pares; y (iii) frameworks operativos de implementación práctica.

- **Estándares Normativos: ISO 19650 y BEP Penn State.** La ISO 19650 (partes 1 y 2 publicadas en 2018) constituye el marco normativo internacional para la gestión de información en proyectos BIM. Su elaboración involucró comités técnicos multinacionales, revisión sistemática por pares y validación empírica en múltiples contextos institucionales. Godager et al. (2022) confirman que la ISO 19650 provee el "qué" de la gestión de información BIM: define los requisitos de información organizacional (OIR), los requisitos de información de activos (AIR) y el Nivel de Necesidad de Información (LOI), pero no prescribe el "como" operativo para ecosistemas BIM específicos.
- **Template/Estructura de Datos (Miller&Co):** En la presente investigación se adopta, como herramienta de implementación práctica, un framework operativo estructurado en niveles funcionales (gestión estratégica, producción técnica, referencia espacial y

salida/automatización) con un flujo estructurado INFO → DRAFT → MODEL → COORD → MASTER → PRESENTACIÓN. Este framework opera como la operacionalización práctica de los principios de la ISO 19650 en el ecosistema Revit-Robot Structural Analysis bajo la NBDS-2023 y se delimita explícitamente como herramienta operativa de implementación, no como estándar normativo ni como framework académico en sentido formal. Su validez en este estudio es operativa y contextual, no normativa ni académica en sentido estricto. Como señalan Godager et al. (2022), en contextos con marcos regulatorios BIM incipientes, como el boliviano, la adopción de frameworks operativos localmente adaptados puede ser más efectiva que la implementación rígida de estándares internacionales diseñados para ecosistemas institucionales más maduros.

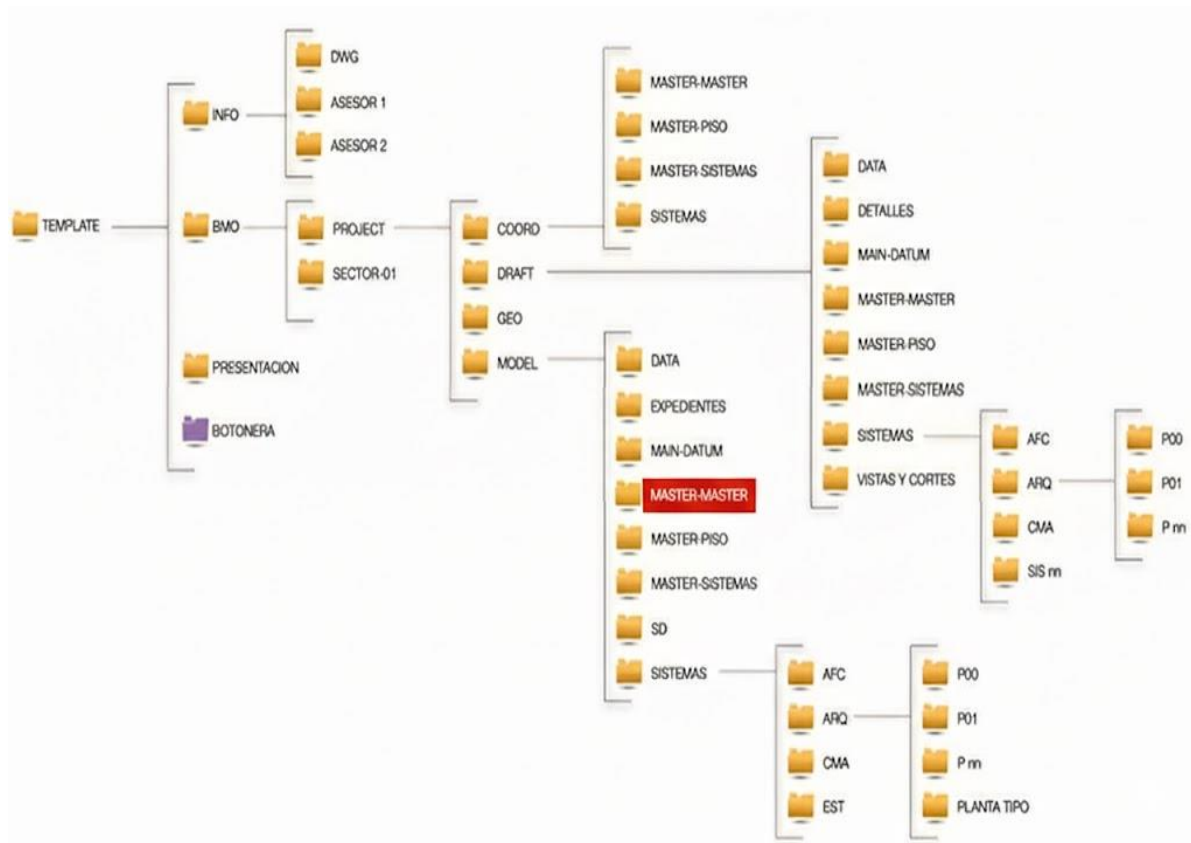


Figura 2-5. Tempalte/Estructura de Datos (Miller&Co)

- **Framework Académico (BEP Penn State):** El *BIM Execution Plan (BEP) del Penn State BIM Project Execution Planning Guide* (Messner et al., 2021) representa el framework académicamente validado de mayor adopción global para la planificación

de la ejecución BIM. Desarrollado por el Computer Integrated Construction Research Program de la Pennsylvania State University, estructura el flujo de información en: (1) usos BIM del proyecto; (2) proceso de diseño y entrega; (3) intercambio de información BIM; y (4) infraestructura del proyecto. Su validación empírica abarca cientos de proyectos en múltiples países.

Tabla 2-2. Epistemología Comparada (ISO 19650 – BEP Penn State – Miller&Co)

Dimensión	ISO 19650 (2018)		BEP Penn State (Messner et al., 2021)		Framework Miller&Co (2024)	
Naturaleza	Estándar ISO	normativo	Framework validado	académico	Framework profesional	operativo
Validación	Comité multinacional	ISO + revisión sistemática	Peer-review; proyectos documentados	>500	Práctica profesional; sin Peer-review formal.	
Alcance	Principios y requisitos de gestión de información (ciclo de vida completo)		Planificación de ejecución BIM (usos, flujos, intercambio)		Implementación operativa en ecosistema Revit-Robot/NBDS	
Función en esta investigación	Marco normativo (el QUE)		Marco de planificación (COMO planificar)		Herramienta de implementación (COMO ejecutar)	
Adaptación al contexto boliviano	No especifica		No especifica		Diseñada para el ecosistema Revit-Robot y la NBDS-2023	

Nota: Elaboración propia a partir del estándar ISO 19650, guía planificación de la Pennsylvania State University y el manual operativo de Miller&Co (2024).

El framework operativo adoptado materializa los principios de la ISO 19650 y los principios de planificación del BEP Penn State en el entorno tecnológico especificado del ecosistema Revit-Robot Structural Analysis bajo la NBDS-2023. Su uso es pertinente como referencia práctica y debe leerse bajo este encuadre operativo, no como estándar consolidado ni como alternativa a los marcos normativos establecidos.

2.4. Interoperabilidad en Entornos BIM-Análisis Estructural.

2.4.1. Definición y Dimensiones de la Interoperabilidad.

La interoperabilidad constituye el principal desafío técnico en entornos BIM heterogéneos. Van Berlo y Bomhof (2014) la definen como *"la capacidad de dos o más sistemas para intercambiar información y utilizar la información que ha sido intercambiada"*, lo que implica tanto transferencia sintáctica como correcta interpretación semántica. Vernadat

(2007) establece cuatro dimensiones complementarias: (1) Técnica (protocolos de comunicación y formatos de archivo); (2) Sintáctica (estructura coherente y legibilidad de los datos); (3) Semántica (preservación del significado e interpretación correcta); y (4) Organizacional (proceso de trabajo, roles y responsabilidades).

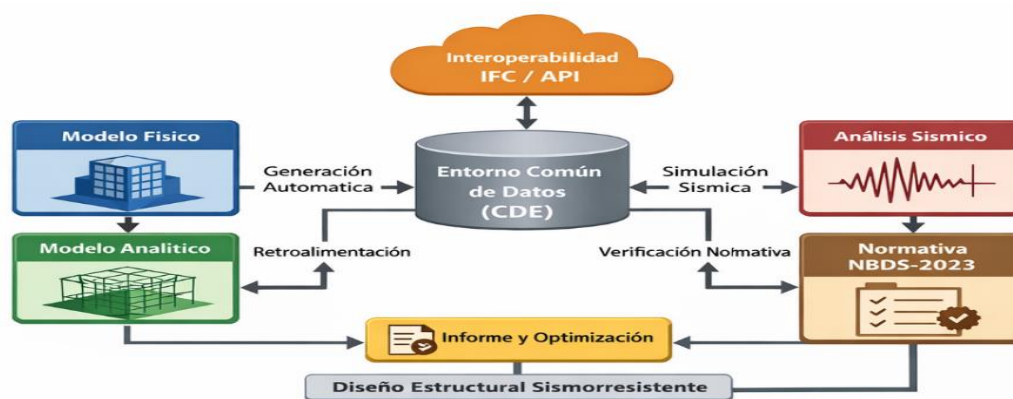


Figura 2-6. Esquema de Interoperabilidad BIM en el Entorno Común de Datos.

- **La interoperabilidad semántica como dimensión crítica:** En el diseño estructural sismorresistente, la interoperabilidad semántica es la dimensión crítica. La transferencia de modelos desde plataformas S-BIM hacia motores de elementos finitos requiere no solo fidelidad geométrica, sino integridad de propiedades analíticas. Sampaio et al. (2021) encontraron que la pérdida de coherencia semántica es mayor cuando la transferencia incluye propiedades de carga y condiciones de contorno que cuando se transfiere únicamente geometría, lo que confirma el planteamiento de Venugopal et al. (2012) sobre la relación entre pérdida semántica y riesgo estructural.
- **Contraste entre Succar (2009) y Godager et al. (2022) respecto a la Interoperabilidad:** mientras Succar plantea la interoperabilidad como un atributo progresivo de madurez organizacional, que se alcanza al completar las tres fases de su modelo, Godager et al. (2022) demuestran empíricamente que organizaciones de tamaño mediano pueden lograr alta interoperabilidad en dominios específicos (como el estructural) sin haber completado todas las fases de madurez interdisciplinaria. Esta distinción es relevante para el contexto boliviano: la interoperabilidad nativa Revit-Robot Structural Analysis puede implementarse con alta fidelidad en el dominio estructural independientemente del grado de madurez BIM general de la organización

2.4.2. Interoperabilidad de LOD 350 bajo el Ecosistema BIM

A partir de esta concepción general y para fines específicos de la presente investigación, la interoperabilidad de LOD 350 se define operacionalmente como: *"La capacidad operativa del ecosistema BIM para transferir y preservar la integridad de la información geométrica, analítica y los metadatos vinculantes, conforme a los requisitos de la NBDS-2023, garantizando que el nivel de detalle ejecutivo sea plenamente transferible y mantenible a lo largo del ciclo bidireccional de modificación y sincronización"*.

Bajo este enfoque, la interoperabilidad no se limita a la transmisión pasiva de datos a través de un canal o protocolo de intercambio, ni a la obtención de un modelo en LOD 350 estático. Se exige que dicho nivel de detalle sea activo y bidireccionalmente coherente, mitigando la degradación semántica y la pérdida de parametrización durante el ciclo de intercambio (round-trip) entre Autodesk Revit y Robot Structural Analysis.

2.4.3. Formatos y Mecanismos de Integración (análisis comparativo).

Tabla 2-3. Comparativa de Mecanismos de Interoperabilidad Estructural

Mecanismo	Ventajas		Limitaciones documentadas	Fidelidad
IFC (ISO 16739)	Independencia de plataforma; adopción internacional	de	Pérdida sistemática en propiedades analíticas; interpretación inconsistente entre plataformas (Kassem et al. 2015)	Variable; pérdidas documentadas del 15-30%
Formato nativo propietario (ej. SMXX en Revit-Robot)	Alta fidelidad geométrica; velocidad de procesamiento superior		Dependencia de ecosistema; transferencia de resultados al BIM requiere protocolos explícitos	>95% geométrica; propiedades analíticas requieren verificación
Vínculo nativo bidireccional Revit-Robot Structural Analysis	Bidireccional nativo; sincronización directa físico-analítico sin intermediarios control granular		Parámetros sísmicos específicos (NBDS-2023) requieren parametrización manual explícita	>98% cuando se implementa con protocolo de verificación semántica

Nota: Elaboración propia a partir de la síntesis de la literatura técnica sobre interoperabilidad estructural complementado con datos de (Kassem et al. 2015).

- **Implicación para el flujo metodológico:** La asimetría técnica documentada por Habte y Guyo (2021) donde la mayor parte de la interoperabilidad entre Revit y ETBS fue manejada desde el lado del motor de cálculo, dado que la API de Revit solo admite plugins in-process, tiene implicaciones directas para el diseño del flujo Revit-Robot

Structural Analysis. En este ecosistema, los protocolos de verificación y parametrización deben configurarse con validación explícita en ambos entornos, aprovechando la bidireccionalidad nativa del vínculo para verificar la consistencia semántica en ambos sentidos del flujo.

2.4.4. Métricas de Integridad de Datos: Marco de Evaluación.

Jeong et al. (2009) proponen un marco de evaluación basado en tres dimensiones complementarias que capturan diferentes aspectos de la fidelidad de transferencia:

- **Tasa de completitud (Tc):** Mide el porcentaje de elementos que se transfieren exitosamente desde el modelo origen al modelo destino: $T_c = \frac{N_{transferido}}{N_{origen}} \times 100\%$, donde: $N_{transferido}$ representa elementos presentes en el modelo destino y N_{origen} el número total en el modelo origen. Una tasa del 100% indica que todos los elementos se transfirieron, aunque no garantiza corrección de propiedades.
- **Precisión geométrica (Pg):** Evalúa la exactitud dimensional de los elementos transferidos comparando coordenadas, dimensiones y orientaciones: $P_g = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_{destino} - P_{origen})}{n * L_{ref}}$, donde: P_g representa puntos de control geométricos (coordenadas de nodos, dimensiones de sección), n es el número de puntos evaluados y L_{ref} es una longitud de referencia característica del proyecto. Valores superiores a 0.99 (error relativo < 1%) se consideran excelentes para aplicaciones estructurales.
- **Consistencia semántica (Ts):** Verifica que las propiedades no geométricas se preservan correctamente: $T_s = \frac{N_{consistente}}{N_{verificado}} \times 100$, donde: $N_{consistente}$ es el número de propiedades que mantienen valores correctos y $N_{verificando}$ el total de propiedades evaluadas. Propiedades críticas incluyen módulo de elasticidad, resistencia de materiales, condiciones de apoyo, cargas aplicadas y factores de combinación.
- **Calibración crítica de los umbrales:** Los resultados de Sampaio et al. (2021) calibraron estos umbrales en transferencias BIM-análisis estructural: la completitud geométrica fue superior al 98%, pero la consistencia semántica no alcanzó 75% en IFC ni el 85% en formato nativo. Estos valores se sitúan por debajo del umbral "excelente"

de Jeong et al. (2009), lo que evidencia que la verificación manual complementaria no es un defecto de implementación sino una necesidad estructural del estado actual de la tecnología, incluso en el ecosistema Revit-Robot Structural Analysis.

2.4.5. Niveles de Automatización en Workflows BIM Estructural.

Addor & Santos (2017) proponen tres niveles de automatización: **Nivel 1 (Bajo)**, con extracción automatizada de cálculos métricos y documentación (60-75% reducción de tiempo); **Nivel 2 (Intermedio)**, con aplicación automática de cargas e interoperabilidad bidireccional (40-55% de reducción); y **Nivel 3 (Alto)**, con verificación automática de cumplimiento normativo y optimización paramétrica (30-45% de reducción adicional).

- **Delimitación del alcance:** Esta clasificación es útil como referencia, pero debe matizarse con los hallazgos de Habte y Guyo (2021): los beneficios del Nivel 3 son altamente dependientes de la completitud de la parametrización normativa en el modelo BIM. Para la NBDS-2023 una norma de reciente promulgación con parámetros específicos no contemplados en las plantillas estándar de Revit-Robot Structural Analysis, el Nivel 2 de automatización constituye el objetivo alcanzable a corto plazo, siendo el Nivel 3 un horizonte de desarrollo que requiere trabajo previo de formalización normativa. El presente estudio delimita su alcance al Nivel 2, con evaluación del grado de aproximación al Nivel 3 para los parámetros sísmicos cuantitativamente explícitos de la NBDS-2023 (S_o , clasificación de suelo I_e , R , C_d).

2.5. Fundamentos del Diseño Sismorresistente.

2.5.1. Filosofía de Diseño Sísmico (NBDS-2023) y Contraste con Modelos de Desempeño.

El diseño sismorresistente según la NBDS-2023 se enmarca en el paradigma del ***Diseño por Resistencia*** (Strength-Based Design) mediante análisis lineal (estático o dinámico). Esta filosofía busca garantizar la salvaguarda de la vida mediante la reducción de las fuerzas sísmicas elásticas a través de un factor de modificación de respuesta (R), que considera la ductilidad y la sobrerresistencia de la estructura (Moreno, 2023). A diferencia

del Diseño Basado en Desempeño (PBD), el enfoque de la NBDS-2023 establece requisitos mínimos para evitar el colapso ante sismos severos, permitiendo daños estructurales controlados, pero sin alcanzar niveles de desempeño operacional predefinidos. En la literatura latinoamericana reciente, el debate académico entre este enfoque por resistencia y el diseño basado en desempeño sigue siendo relevante. Alvarado Mamani y Aguilar Chuquimia (2023) señalan que la aplicación del análisis modal espectral en entornos BIM con Revit y Robot Structural Analysis puede producir resultados consistentes con los obtenidos por métodos manuales, siempre que la parametrización de los espectros normativos sea explícita y verificable. Esta condición de verificación es especialmente exigente en Bolivia, donde el espectro de diseño de la NBDS-2023 posee una formulación específica dependiente de la aceleración máxima de suelo (S_o) y el perfil de suelo ($S0 - S5$). Dado que estos valores no pueden derivarse automáticamente de los parámetros estándar de los catálogos internacionales de software, su integración en el modelo BIM requiere de una gestión de información manual y explícita, lo que fundamenta la necesidad del protocolo propuesto en este estudio. Por tanto, la prioridad científica de esta investigación se centra en resolver la consistencia semántica y la fidelidad del espectro de la NBDS-2023 dentro del ecosistema digital.

2.5.2. Parámetros de la NBDS-2023: Parametrización en Entornos BIM.

La NBDS-2023, promulgada mediante Resolución Ministerial 1447/2023, establece los requisitos mínimos para el diseño sismorresistente en territorio boliviano (Moreno 2023). Su implementación en el ecosistema Revit-Robot Structural Analysis, requiere la parametrización precisa de los siguientes componentes:

Tabla 2-4. Parámetros Sísmicos (NBDS-2023) e Implicancias en el Entorno S-BIM

Parámetros	Definición NBDS-2023	Implicancia en S-BIM
Aceleración máxima de suelo (S_o)	Aceleración máxima para $T_R = 475$ años (ej. Cbba: $S_o = 0.22g$)	Define la ordenada espectral; debe transferirse exactamente al patrón de carga sísmico en Robot Structural Analysis
Clasificación de Suelos ($S0 - S5$)	Seis categorías según velocidad de onda de cortante V_s ; S4: $V_s < 180$ m/s	Determina el espectro de diseño; un error en la clasificación altera todas las ordenadas espectrales
Factor de Importancia (I_e)	Cat. I: 1.5 / Cat. II: 1.25 / Cat. III: 1.0 / Cat. IV: 0.8	Modifica las demandas de diseño; debe asignarse por función de uso dentro del modelo de Revit

Coeficiente de Reducción (R)	Pórticos H.A.: Especiales $R = 8$ / Intermedios $R = 5$ / Ordinarios $R = 3$.	Reduce el espectro elástico; transferencia incorrecta puede sub/sobredimensionar la estructura.
Coeficiente de Amplificación (C_d)	Amplificación de deflexión: generalmente igual a R para H.A.	Determina las derivas inelásticas; crítico para la verificación de límites de deriva NBDS-2023
Factor de Irregularidad Total (FIT)	Penalización por irregularidad en planta y elevación	Las derivas inelásticas quedaran subestimadas si se omite; requiere una verificación iterativa post-análisis modal.

Nota: Elaboración propia a partir de los requisitos técnicos de la NBDS-2023 (R.M. 1447/2023) y los criterios de interoperabilidad estructural.

La deriva inelástica debe calcularse mediante la expresión normativa: $\Delta_{inelast} = C_d/I_e * \Delta_{elast}$. La norma establece límites estrictos de deriva (1.2% o 0.012 para pórticos de H.A.) y penaliza la respuesta mediante el Factor de Irregularidad Total (FIT). En el contexto BIM, la verificación automatizada de estas derivas a partir de los resultados de ETABS/Robot Structural Analysis y su retroalimentación al modelo de Revit, constituye uno de los flujos bidireccionales de mayor valor añadido de la metodología propuesta.

2.5.3. Brecha del LOI Sísmico NBDS-2023.

La revisión de antecedentes permite identificar una brecha analítica que los estudios precedentes no abordan de forma integrada: la gestión del riesgo asociado a la definición incompleta o incorrecta del Nivel de Información (LOI) sísmico en modelos BIM destinados al diseño sismorresistente bajo la NBDS-2023. Esta brecha se ubica en la intersección de tres problemáticas documentadas por separado: (i) La tensión LOD-LOI identificada por Latiffi et al. (2015) y Monteiro y Poças Martins (2013); (ii) La pérdida de consistencia semántica en transferencias BIM-análisis documentada por Habte y Guyo (2021) y Sampaio et al. (2021); y (iii) La especificidad de los parámetros sísmicos de la NBDS-2023 señalada por Moreno (2023) y Cano Condori (2025).

- **LOI Sísmico Mínimo para la NBDS-2023:** A partir de la síntesis de la literatura revisada y de los requisitos explícitos de la NBDS-2023, se propone una definición operativa del LOI Sísmico Mínimo para modelos S-BIM en el ecosistema Revit-Robot Structural Analysis. Este LOI mínimo comprende, como condición necesaria y suficiente, la correcta asignación y transferencia de: S_0 , perfil de suelo ($S0 - S5$), factor de importancia I_e , coeficiente de reducción R , coeficiente de ampliación C_d , factor de

irregularidad total FIT y espectro de diseño $S_a(T)$. Ninguno de los estudios internacionales revisados evaluó la transferencia de estos parámetros bajo una norma con la complejidad espectral de la NBDS-2023, lo que convierte esta verificación en el núcleo metodológico diferencial del presente estudio.

2.6. Método Tradicional vs Flujo BIM

2.6.1. Verificación Normativa Automatización (ACCC).

El Automated Code Compliance Checking (ACCC) representa la verificación computacional de requisitos normativos mediante reglas formalizadas implementadas en el modelo BIM. Solihin & Eastman (2015) desarrollaron framework basados en lógica proposicional que traducen requisitos normativos a reglas computables (IF-THEN-ELSE), los cuales comprenden cuatro componentes: formalización de requisitos, extracción de información BIM, evaluación de reglas mediante motor de inferencia y reportes de resultados con visualización 3D de elementos no conformes.

- **Limitación estructural para la NBDS-2023:** Beach et al. (2015) demostraron que la verificación automatizada de Eurocódigo 8 formalizó un 91.3% de precisión, lo que redujo los tiempos de revisión en 40-60% y eliminando el 88% de errores interpretativos. Sin embargo, es fundamental reconocer una limitación estructural: la efectividad del ACCC depende de la completitud y formalización de la norma verificada. Para la NBDS-2023 al ser una norma de reciente promulgación, el presente estudio delimita el alcance de la automatización a los parámetros sísmicos explícitamente cuantificables (S_o , clasificación de suelo I_e , R , C_d), dejando los requisitos cualitativos para una verificación asistida por el profesional.

2.6.2. Extracción Automatizada de Cálculos Métricos (QTO).

La extracción automática de cantidades (Quantity Take-Off, QTO) es uno de los beneficios más tangibles de la metodología BIM. Monteiro & Poças Martins (2013) validaron que la precisión en la extracción alcanza el 96.8% en hormigón, 95.2% en acero con modelos LOD 350. Valinejadshoubi et al. (2024), actualizaron estos resultados al desarrollar un

sistema automatizado de QTO con módulo de verificación de precisión (Quantity Precisión Check, QPC), donde documentaron que la calidad de los datos BIM, la consistencia de los parámetros, la definición de materiales y nomenclatura de familias, afectan directamente la precisión de las cantidades extraídas.

Un aspecto crítico que este estudio introduce es la necesidad de estratificar los resultados de QTO por tipología de elemento: las estimaciones de hormigón en elementos regulares son muy precisas (>98%), mientras que en elementos de geometría compleja la precisión puede caer significativamente. Esta advertencia es metodológicamente relevante para el presente estudio: la evaluación de la calidad del QTO en el flujo BIM propuesto deberá estratificar los resultados por tipología de elemento, evitando así reportar promedios que puedan resultar engañosos.

2.6.3. Análisis Crítico de la Eficiencia Temporal BIM vs CAD en el Contexto Boliviano.

Los datos presentados en la tabla comparativa de eficiencia temporal proyectan una reducción global del 65.4% en horas de trabajo al migrar del flujo CAD tradicional al flujo BIM integrado. Sin embargo, la rigurosidad académica exige que estos indicadores sean contextualizados críticamente, tanto en sus supuestos subyacentes como en sus implicaciones específicas para el perfil de las consultoras medianas bolivianas.

Tabla 2-5. Comparativa de Eficiencia Temporal: CAD y Flujo BIM

Fase del proceso	Método CAD (h)	Flujo BIM (h)	Observación
Modelado inicial	20	18	Mayor inversión inicial en configuración BIM
Transcripción al modelo analítico	20	0.5	97.5% de reducción mediante sincronización directa
Aplicación de cargas sísmicas	15	5	Reducción condicionada a plantillas paramétricas
Ajustes iterativos	30	9	70% de reducción con sincronización bidireccional
Documentación técnica	30	10	Automatización de planos y tablas
Cóputos métricos (QTO)	15	2.5	83.3% de reducción; preciso condicionada al LOD
TOTAL	130	45	65.4% reducción global estimada

Nota: Elaboración propia a partir del crononálisis de tareas del proyecto y simulación de flujos de trabajo de ingeniería estructural.

- **Supuestos y Limitaciones de los Datos Comparativos:** Los valores numéricos de la tabla derivan de la síntesis de múltiples estudios internacionales (Habte y Guyo 2021; Sampaio et al. 2021; Addor y Santos 2017), cada uno conducido bajo condiciones

operativas específicas que difieren del contexto boliviano en al menos cuatro dimensiones críticas: (i) Madurez BIM del equipo: los estudios base asumen equipos con experiencia consolidada en Revit y Robot Structural Analysis, condición que no refleja la realidad de la mayoría de las consultoras bolivianas en transición BIM; (ii) Disponibilidad de plantillas parametrizadas: la reducción en "aplicación de cargas sísmicas" (de 15h a 5h) supone la existencia de plantillas NBDS-2023 preconfiguradas, que actualmente no existen de forma estandarizada en Bolivia; (iii) Estabilidad del flujo: Habte y Guyo (2021) documentan que los beneficios plenos solo se materializan en proyectos donde el flujo ya está validado, y (iv) Escala del Proyecto: la eficiencia es mayor en proyectos de complejidad media-alta.

- **La paradoja de la eficiencia inicial:** Para un equipo boliviano que inicia la transición BIM bajo la NBDS-2023, los datos deben interpretarse como un horizonte de madurez a mediano plazo (18-36 meses), no como un beneficio inmediato. Alvarado Mamani y Aguilar Chuquimia (2023) señalan que la parametrización normativa explícita, exigida por la NBDS-2023, representa la principal barrera técnica de corto plazo.

2.7. Síntesis Teórica: Modelo Conceptual de la Investigación.

La revisión crítica de la literatura permite construir un modelo conceptual que articula las variables teóricas del estudio y sus relaciones causales, sustentado en tres premisas:

- **Premisa 1 – Condición habilitante (Jeong et al. 2009; Sampaio et al. 2021):** La integridad de la información BIM (completitud T_c , precisión geométrica P_g y consistencia semántica T_s) es condición necesaria pero no suficiente para el análisis sísmico según NBDS-2023. Sampaio et al. (2021) demuestran que alta integridad geométrica no garantiza la semántica, lo que exige una verificación explícita de propiedades analíticas.
- **Premisa 2 – Condición moduladora (Habte y Guyo 2021; Addor y Santos 2017):** El nivel de automatización modera la relación entre la integridad de datos y la eficiencia temporal: se observa un mayor beneficio en proyectos repetitivos y uno menor en proyectos piloto.

-
- **Premisa 3 – Condición Contextual (Moreno 2023; Cano Condori 2025):** Los parámetros sísmicos específicos de la NBDS-2023 introducen una complejidad no contemplada en los marcos existentes, lo que requiere adaptaciones al contexto boliviano.

Hipótesis central: Un workflow BIM parametrizado y ajustado a la NBDS-2023, implementado mediante sincronización directa Revit-Robot Structural Analysis con verificación semántica de los parámetros sísmicos, es técnicamente viable y cuantitativamente superior al método CAD tradicional en integridad de datos, eficiencia temporal y precisión de cálculos métricos. Su verificación empírica constituye el aporte científico central del presente estudio.

3. Marco Metodológico

3.1. Enfoque, Tipo y Diseño de Investigación.

La presente investigación adopta un *enfoque mixto (cuantitativo-cualitativo)*, enfocado en evaluar la interoperabilidad, integridad y consistencia de datos en un ecosistema BIM para el diseño sismorresistente. El análisis cuantitativo mide con precisión matemática la exactitud geométrica, la eficiencia temporal y la validación normativa de los modelos, mientras que la observación técnica cualitativa evalúa la continuidad y la consistencia semántica del flujo de trabajo integral.

El estudio es de tipo *investigación aplicada y tecnológica*, orientado a resolver la transferencia bidireccional de información estructural entre plataformas de modelado paramétrico (Autodesk Revit) y motores de cálculo (Robot Structural Analysis y CSI ETABS), bajo el estricto cumplimiento de la NBDS-2023 y el estándar ISO 19650. El alcance es *descriptivo-comparativo-evaluativo*, puesto que caracteriza el entorno controlado, contrasta el desempeño de la metodología BIM frente al flujo convencional CAD-cálculo y dictamina la fidelidad de la información transferida.

El diseño metodológico se define como *no experimental, transversal y de estudio de caso instrumental único*. Es no experimental debido a que las variables no se manipulan de forma deliberada, sino que se observan en su estado computacional nativo; transversal al ejecutarse en un periodo de tiempo único; y responde a los postulados de Robert Yin (2018) al utilizar una edificación real como laboratorio de validación técnica para consolidar un framework reproducible.

3.2. Justificación y Selección del Caso de Estudio.

El caso de estudio seleccionado corresponde a una edificación real destinada a oficinas de hormigón armado de cuatro niveles, con una superficie construida de 546.45 m^2 y una altura de 17.42 m, situada en el Distrito 12 del municipio de Cochabamba. El sistema estructural se compone de Pórticos Intermedios Resistentes a Momentos con ductilidad intermedia ($R=5.0$) según las exigencias de la NBDS-2023.



Figura 3-1. Localización del Caso de Estudio.

La selección del caso de estudio responde a criterios de ingeniería estructural: la edificación presenta irregularidades geométricas en planta como en elevación (desalineamiento de luces libres y retiros volumétricos asimétricos). Al definir la posición de los centros de masa y rigidez en cada nivel, el flujo tradicional CAD asume un alto riesgo de error humano al calcular la excentricidad y la torsión accidental (Art. 24, NBDS-2023), riesgo que se mitiga mediante la precisión paramétrica del modelo digital unificado. Así, el caso de estudio garantiza un entorno controlado óptimo para: (i) Evaluar la transferencia bidireccional de geometría, propiedades mecánicas y metadatos estructurales; (ii) Validar la sincronización en tiempo real entre el modelo físico y el analítico; (iii) Contrastar numéricamente las matrices analíticas mediante validación cruzada entre Robot Structural Analysis y ETABS; y (iv) Automatizar la documentación técnica, cálculos métricos y planillas de doblado bajo el estándar LOD/LOI establecido.

3.3. Población, Muestra y Unidad de Análisis

- **Población:** Está constituida por edificaciones administrativas de hormigón armado de mediana altura (4 a 8 niveles), proyectadas en la Zona Sísmica 2 de Bolivia conforme a la NBDS-2023.

-
- **Unidad de Análisis:** El flujo de interoperabilidad bidireccional y el intercambio de datos entre el modelo estructural paramétrico (S-BIM) y los motores de cálculo. El objeto de estudio es el comportamiento y la fidelidad de la información durante la transferencia, no el elemento físico estático.
 - **Muestra:** Muestreo no probabilístico intencional, representado por una edificación ubicada en el Distrito 12 de Cochabamba. Su selección se justifica porque la profundidad del análisis de datos computacionales y variables de software prevalece sobre la representatividad estadística paramétrica.

3.4. Alcances, Limitaciones y Control de Sesgos.

- **Alcances:** La investigación abarca la parametrización S-BIM bajo la NBDS-2023; la interoperabilidad bidireccional mediante APIs directas entre Revit, Robot Structural Analysis y ETABS; la validación de la integridad geométrica, semántica y analítica del modelo; y la cuantificación automatizada de volúmenes de obra con un Nivel Desarrollado LOD 350.
- **Limitaciones:** Los resultados se restringen a estructuras de hormigón armado de complejidad y altura media, por lo que no se extrapolan a edificios de gran altura (>10 niveles). Asimismo, se excluyen las dimensiones BIM 4D (tiempo), 5D (costos) y las instalaciones MEP.
- **Control de Sesgos:** Para mitigar el sesgo en la medición de tiempos operativos derivado de la destreza del usuario, los procesos se evaluaron en un entorno computacional idéntico, registrando las bitácoras internas del software y deduciendo los tiempos muertos ajenos a la automatización.

3.5. Alineamiento Metodológico con Usos BIM Penn State.

Para dotar de rigor metodológico y localizar científicamente el enfoque de la investigación, se implementan los *Usos BIM de la Universidad de Pensilvania (Penn State)* generando un alineamiento explícito entre los objetivos, las actividades y las herramientas del ecosistema:

Tabla 3-1. Mapeo Metodológico: Objetivos Específicos y Usos BIM Penn State

Objetivo Específico	Actividad Metodológica	Herramientas	BIM Use (Penn State)
Parametrizar el modelo S-BIM bajo la NBDS-2023	Desarrollo del modelo estructural, configuración DATUM-DATABASE y control espacial (Fase I del Esquema Metodológico Replicable)	Revit + familias paramétricas	3D Coordination / Design Authoring
Analizar Interoperabilidad bidireccional	Transferencia y sincronización bidireccional entre plataformas; validación de metadatos (Fases II y III)	Revit ↔ Robot Structural Analysis (API Direct Link)	Structural Analysis/Model Coordination
Contrastar eficiencia operativa y precisión de datos	Evaluación temporal de modelado, cambios y documentación; comparación BIM vs CAD	Bitácoras cronológicas; Revit	Design Review / Engineering
Validar documentación y cómputos métricos	Generación automatizada de planos, detalles, tablas de planificación, metrados (Fase IV).	Revit Schedule Quantity (Tablas de Takeoff Planificación)	

Nota: Adaptado de Penn State University. Alineación explícita entre los objetivos específicos, el ecosistema Revit-Robot-ETABS y la NBDS-2023.

3.6. Framework Metodológico Miller&Co (Modelo Conceptual)

El núcleo de la investigación es un sistema de información cerrado, interoperable y de ciclo continuo. El proyecto no se compone de planos aislados, sino de una Base de Datos Federada y Dinámica, donde la geometría física, el modelo analítico estructural y los metadatos normativos coexisten en una sincronización bidireccional permanente.

3.6.1. Los tres pilares de Datos del Modelo.

El modelo conceptual establece que cada componente de la infraestructura está definido por tres dimensiones de información interconectadas:

- **Dimensión Geométrica (Física):** Representación tridimensional precisa de las entidades constructivas en un Nivel de Desarrollo (LOD 350), paramétrica mediante restricciones espaciales estructurales
- **Dimensiones Sintáctica (Analítica):** Abstracción matemática en forma de matriz de rigidez (nudos, barras, diafragmas e hipótesis de carga) destinada al procesamiento de esfuerzos bajo la NBDS-2023.
- **Dimensiones Semántica (Metadatos /LOI):** Atributos no gráficos integrados en la base de datos (resistencia a la compresión, módulos de elasticidad, propiedades de ductilidad, codificación de partidas y trazabilidad de control de versiones).

3.6.2. Principio del Binomio Inmutable de Control Central (Gobernanza de Datos).

Para erradicar errores de posicionamiento espacial y la fragmentación o pérdida de datos (data drop), el Framework Miller&Co establece una disociación estratégica entre el Control Espacial (Vectorial) y el Control Semántico (Atributos) alojados en el directorio de la Oficina de Gestión de Proyectos (02-BMO):

- **DATUM.rvt (Ancla Vectorial y Topográfica):** Es el contenedor exclusivo de la certeza espacial del proyecto. Carece por completo de geometría edificada o elementos constructivos. Su única función es albergar el Punto Base del Proyecto (Project Base Point), el Punto de Reconocimiento (Survey Point), la rejilla de ejes estructurales primarios, los niveles de piso terminado y la orientación exacta del Norte Real. Funciona como un sistema de coordenadas de referencia inalterable que restringe el movimiento y unifica el espacio tridimensional para todas las disciplinas concurrentes.
- **DATABASE.rvt (Matriz Semántica y Plantilla Maestra):** Representa el cerebro lógico y de metadatos del ecosistema. Este archivo no contiene geometría específica del edificio, sino la estructura de datos que alberga la información técnica. Centraliza y estandariza: (i) La biblioteca de parámetros compartidos y globales necesarios para la NBDS-2023, (ii) Las plantillas de vista (View Templates) para el control gráfico y la auditoría visual de esfuerzos, (iii) El mapeo semántico inicial de materiales (configuraciones de densidades, módulos de elasticidad y coeficientes de Poisson) y (iv) Las tablas de planificación parametrizadas encargadas de las extracciones automatizadas de cálculos métricos.

3.7. Esquema Metodológico Replicable (Miller&Co)

Para garantizar la reproducibilidad exacta del experimento técnico, el procedimiento operativo se organiza sistemáticamente en cuatro fases secuenciales, condicionadas por compuertas de calidad (Quality Gates) con tolerancias matemáticas y técnicas estrictas.

3.7.1. FASE I: Proceso Técnico Integrado (Start-Up).

Esta fase establece la línea base de integridad de la información mediante la auditoría, depuración y normalización de la documentación técnica proveniente de formatos CAD tradicionales, mitigando distorsiones geométricas antes de iniciar el modelado:

A. Gobernanza de Datos Miller&Co: Se formaliza en un repositorio estructurado en cuatro directorios raíz bajo los principios de la ISO 19650:

- **01-INFO (Información):** Aloja antecedentes técnicos, estudios geotécnicos (suelos), levantamientos topográficos certificados y datos contractuales base.
- **02-BMO (BIM Manager Office):** Centraliza los protocolos de interoperabilidad, matrices de roles y responsabilidades, registros de auditoría entre los entornos CAD (Draft) y BIM (Revit Model) e incluye las plantillas maestras (DATABASE).
- **03-PRESENTACION:** Módulo de control documental para la gestión de versiones, bitácoras de ingeniería y entregables validados.
- **04-BOTONERA (Automation Toolkit):** Repositorio de herramientas de automatización, scripts y rutinas orientadas a la estandarización gráfica.

B. Desarme CAD (Ingeniería Inversa Controlada): Descomposición metodológica de archivos CAD monolíticos u obsoletos en unidades de información normalizadas:

- **Auditoria Inicial (Pre-Disassembly Audit):** Inventario analítico de capas (layers), bloques, estilos y referencias externas (XREFs) para identificar vicios geométricos (geometría corrupta, duplicaciones de entidades) y emitir un reporte de estado base.
- **Limpieza Técnica:** Eliminación de entidades redundantes mediante comandos de diagnóstico (AUDIT/RECOVER/PURGE).
- **Fragmentación Disciplinaria:** Separación física del archivo monolítico original (PROYECTO_TODO_JUNTO.dwg) en contenedores especializados independientes: MASTER_ARQ.dwg (envolvente), MASTER_EST.dwg (Sistema estructural: ejes, columnas, vigas, losas) y MASTER_MEP.dwg (Instalaciones).

C. Configuración del DATUM.dwg (Hito de Posicionamiento CAD): En esta etapa de fragmentación, se extrae y configura el archivo DATUM.dwg. Este archivo no contiene geometría edificada; se genera exclusivamente en el Directorio 01-INFO como plantilla de coordenadas de origen. En él se limpia, define y congela el Punto del

Proyecto (0,0,0), la cuadrícula de ejes principales compartidos y la orientación del Norte Real basada en el levantamiento topográfico certificado.

D. Armado de Draft (Consolidación Federada): Ensamblaje técnico de los archivos maestros fragmentados vinculándolos como (XREFs) tomando como base obligatoria de inserción el archivo DATUM.dwg, validando la integridad espacial antes de la migración. El flujo de trabajo no avanza bajo ninguna circunstancia hasta certificar que cada archivo fragmentado puede ser vinculado como XREF sobre el DATUM.dwg sin errores de posicionamiento, desfases de origen ni alertas de corrupción de datos.

E. Secuencia de Seteo (Configuración Espacial e Inicio del Ecosistema BIM): Establecimiento del entorno de información unificado:

- **Setear DATUM.dwg e Interconexión CAD-BIM:** Se crea el archivo nativo DATUM.rvt en 02-BMO y se vincula el archivo DATUM.dwg mediante "Origin to Internal Origin", adquiriendo las coordenadas compartidas para establecer el Survey Point (Punto de Reconocimiento) y el Project Base Point (Punto Base del Proyecto), bloqueando el archivo CAD como plantilla subyacente de control de vectores.
- **Setear DATABASE y Vinculación Estrategia (DATUM.rvt + DATABASE):** Se vincula el DATUM.rvt (mediante Coordenadas Compartidas) con el archivo DATABASE.rvt (en 02-BMO) el cual actúa como el contenedor maestro de inteligencia de datos (plantillas de vista, parámetros compartidos y mapeo semántico inicial de materiales).
- **Setear el Modelo (Federación bajo Estructura Miller&Co):** Consolidación final mediante vinculación cruzada del binomio (DATUM.rvt + DATABASE.rvt) en una arquitectura de modelado coordinada.

F. Secuencia de Modelo (Inicio de Plataforma BIM): Inicialización y apertura de los archivos disciplinares nativos en el software de autoría (Revit): Arquitectura (ARQ-P00.rvt a ARQ-P03.rvt), Estructura (EST-P00.rvt a EST-P03.rvt) e Instalaciones (MEP-P00.rvt), los cuales inician su modelado adquiriendo las coordenadas compartidas y los niveles directamente del binomio federado de control.

Hitos de Calidad I (Spatial Alignment Lock): Todos los archivos disciplinares deben reportar cero discrepancias de posicionamiento al ejecutar herramientas de comparación de entornos (Coordination Review en Revit). Tolerancia máxima admisible ≤ 0.001 m.

3.7.2. FASE II: Interoperabilidad (Modelado BIM).

Establece la infraestructura colaborativa de alta fidelidad, aplicando el procedimiento paramétrico "Pico y Pala" para generar de forma simultánea el modelo analítico estructural optimizado para su transferencia:

A. Revisión del Modelo Analítico (Coordination Review): Ejecución de auditorías sistemáticas bajo el protocolo Miller&Co:

- **Detección de Alertas de sincronización:** Revisión exhaustiva del registro de advertencias (warnings), especialmente los avisos de tipo "Instance of link needs Coordination Review", corrigiendo desalineamientos con el DATUM.rvt.
- **Copy/Monitor:** Establecimiento de dependencias interconectadas. Cualquier modificación geométrica en el DATUM.rvt genera una alerta de actualización automática en los archivos derivados.
- **Model Readiness (Disponibilidad del Modelo):** Certificación obligatoria de cero (0) alertas activas, restricción de movimiento mediante fijación (PIN) en grillas/niveles y error relativo de georreferenciación < 0.001 m.

B. Elección del Sistema Estructural y Asignación de Cargas: Clasificación formal de la tipología estructural (pórticos con ductilidad intermedia $R=5.0$), asignación automatizada de estados de cargas gravitacionales (carga muerta y viva) y vectorización de solicitudes sísmicas.

C. Modelo Físico 3D (Procedimiento Pico y Pala): Metáfora operativa de construcción virtual progresiva utilizando Unidades de Modelización (UM) y enriquecimiento secuencial del LOI:

- **Pico (Excavación Digital):** Preparación del entorno, consolidación de referencias, asignación de subproyectos (worksets) y purga de familias obsoletas o hiperpesadas.
- **Pala (Construcción Paramétrica):** Secuencia técnica estricta: (i) Definición de parámetros globales y compartidos, (ii) Modelado de elementos primarios, (iii) Inserción de componentes secundarios, (iv) Enriquecimiento de metadatos estructurales, (v) Gestión documental asociada y (vi) Validación automatizada de interferencias espaciales.

D. Modelado Analítico (Generación Automática): El ecosistema procesa el avance físico y genera un Modelo Físico-Analítico Dinámico coordinado, donde cualquier cambio geométrico actualiza paramétricamente las matrices de rigidez. Se valida la coincidencia estricta de centroides (sincronización de ejes/nudos) y el mapeo semántico de materiales.

E. Interoperabilidad (Motores de cálculo):

- **Direct Link (Revit→Robot Structural Analysis):** Activación del enlace directo (Direct Link) vía API nativa hacia Robot Structural Analysis, preservando la coherencia matemática entre el modelo físico y el modelo analítico. Se ejecuta un protocolo de autoría interna (Check Model) para la eliminación de nudos sueltos o barras discontinuas. Se exige contractualmente un grado de completitud en la transferencia de datos (mapeo semántico a la compresión f_c , densidad y módulo de elasticidad E) >95%.

Hito de Calidad II – Continuidad Analítica: El modelo analítico debe constituir una red matemática continua y cerrada. Se exige una total ausencia de nudos huérfanos o desalineamiento de continuidad con una tolerancia estricta ≤ 0.005 m.

3.7.3. FASE III: Diseño Estructural (Análisis y Optimización)

Comprende la ejecución del análisis estructural computacional bajo los requisitos de la NBDS-2023, mediante un ciclo cerrado (Closed Loop) de optimización iterativa y validación cruzada entre plataformas independientes:

A. Optimización del Modelo (Ciclo Iterativo): Refinamiento de ingeniería mediante ajuste dinámico de secciones, monitoreo de rigidez lateral, control de torsión y verificación de derivas globales. Se registra estrictamente el tiempo de procesamiento por iteración como Indicador Clave de Rendimiento (KPI) de la eficiencia.

B. Análisis Estructural (Configuración NBDS-2023): Parametrización del análisis dinámico lineal por el método de superposición modal espectral bajo los siguientes requisitos normativos:

- **Análisis Modal Espectral:** Inclusión de un número mínimo de modos de vibración equivalente a $3N$ (donde $N=4$ niveles, totalizando un mínimo de 12 modos), asegurando una participación de masa acumulada $\geq 90\%$ en cada dirección ortogonal de análisis.
- **Masa Sísmica (Masa Reactiva):** Configuración de la combinación de carga para la masa reactiva al 100% de la carga muerta más el 25% de la carga Viva ($100\%CM + 25\%CV$).
- **Sistema de Diafragma:** Modelación de la condición de diafragma rígido infinito en cada nivel para la distribución uniforme de fuerzas inerciales.
- **Excentricidad Accidental:** Desplazamiento del centro de masas equivalentes al 5% de la dimensión en planta de la edificación de manera perpendicular a la dirección del análisis sísmico (Art. 24 NBDS-2023).

C. Análisis Modal/Dinámico y Desplazamientos: Corridas numéricas concurrentes en Robot Structural Analysis y CSI ETABS. Se realiza extracción automatizada de períodos fundamentales de vibración, formas modales, diagramas de fuerzas internas (M, V, N) y desplazamientos laterales elásticos, validados frente a las derivas límite especificadas por la NBDS-2023. Si las derivas resultan conformes y las fuerzas internas son coherentes, el modelo es clasificado como Aprobado.

D. Diseño Estructural (Dimensionamiento y Detalle): Cálculo y dimensionamiento de la cantidad de acero de refuerzo para los elementos de hormigón armado: columnas y vigas (armaduras longitudinales y transversales de confinamiento sismorresistente), escaleras (elementos integrados o independientes) y losas/cimentaciones (zapatas aisladas, combinadas y vigas de fundación).

E. Validación Cruzada (Robot vs ETABS): Como mecanismo de control científico contra el sesgo y para evaluar la integridad en la transferencia de datos, se ejecuta un análisis comparativo cruzado (Cross-Validation) de los parámetros dinámicos globales entre ambos motores de cálculo.

Hito de calidad III – Validación Cruzada: Rangos NIST/NEHRP: Excelente (Zona Verde): Coeficiente ≥ 0.98 . Aceptable (Zona Amarilla): Coeficiente entre 0.92 y 0.97.

Divergencia Crítica (Zona Roja): Coeficiente < 0.92 (requiere justificación teórica basada en la formulación del MEF).

3.7.4. FASE IV: Coordinación (Documentación y Cierre).

Ejecuta la sincronización inversa (BIM Back-Check), genera de forma automatizada la documentación técnica oficial para construcción, administra el control de versiones y prepara los entregables para el ciclo de vida posterior del activo:

A. Exportación de Resultados (BIM Back-Check): Tras aprobar el Hito de Calidad III, se procede con la actualización bidireccional automatizada de las dimensiones de las secciones optimizadas en el motor de cálculo directamente sobre el modelo físico de Revit mediante la conexión API nativa, vinculando paramétricamente los datos de armaduras y cuantías de acero calculadas.

B. Secuencia de Cambios (Control de Versiones): monitoreo y gestión de modificaciones de ingeniería de forma iterativa, garantizando la trazabilidad bajo el flujo de trabajo cerrado: Documentación 2D-3D (extracción coordinada de planos de detalle). Revisión 2D-3D (auditoria visual y de base de datos) y Cambios según 2D-3D (ajustes finos geométricos finales).

C. Documentación 2D-3D (Generación Automatizada): Extracción automatizada de tablas de planificación, cálculos métricos de precisión y planillas de doblado de fierro, contrastándolos analíticamente con mediciones tradicionales para certificar la reducción de errores. El paquete estandarizado incluye planillas de columnas, vigas, dosificación de hormigones, memorias de cálculo formales y planos constructivos oficiales.

D. Coordinación Final (Garantía de Calidad):

- **Coordinación de Plataformas (Navisworks/BIM 360):** Integración y federación de los modelos de todas las especialidades para un análisis de detección de colisiones físicas, garantizando la compatibilidad entre Arquitectura, Estructura e Instalaciones.
- **Garantía de Calidad:** Auditoria general final orientada a certificar el cumplimiento de toda la normativa legal y técnica local, verificación del cierre conforme de todos los hitos de calidad previos y validación del modelo en estado final de obra (As-Built) con trazabilidad de datos histórica completa.

E. Solicitudes – Fase de Construcción – Fase MvOP:

- **Solicitudes:** Consolidación y exportación de planos, memorias de cálculo firmadas y reportes técnicos para la obtención de visados en la Sociedad de Ingenieros de Bolivia (SIB), permisos de construcción municipales y aprobaciones regulatorias ambientales.
- **Fase de Construcción:** Transferencia del modelo BIM con un Nivel de Desarrollo LOD 350 para servir como eje de control métricos, planificación temporal (4D) y presupuestaria (5D) en obra, manteniendo una actualización viva frente a ordenes de cambio en campo.
- **Fase MvOP (Mantenimiento y Operación):** Migración de la base de datos federada del modelo hacia plataformas de gestión de activos y operaciones (Facility Management), lo que permite establecer planes de mantenimiento preventivo y predictivos de la infraestructura estructural.

Hito de Calidad Final – Continuidad Documental: Entrega del Modelo As-Built con trazabilidad semántica completa y bases de datos unificadas, con documentación técnica e ingeniería de detalle validada al 100%, cerrando exitosamente el bucle de diseño (Closed Loop).

3.8. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.

3.8.1. Observación Técnica Estructurada.

Se aplica una triangulación metodológica para asegurar la captura objetiva de los datos ingenieriles y computacionales, estructurada en tres componentes:

- **Observación Técnica Estructurada:** Implementación de bitácoras cronológicas manuales para aislar tiempos muertos operativos; captura automatizada de logs de sincronización y timestamps de software; reportes de interfaz API (pérdidas semánticas de transferencia); y listas de verificación en el cierre de cada Quality Gate.
- **Análisis Documental y Normativo:** Checklists de control normativo NBDS-2023 (armadura sismorresistente, cuantías límite, longitudes de confinamiento); matrices

de evaluación geométrica LOD 350 / LOI; y auditorias de nomenclatura e indexación documental bajo los protocolos de la ISO 19650.

- **Medición Computacional y Extracción de Datos:** Reportes estructurales numéricos nativos de Robot y ETABS (periodos, masa participante, reacciones); extracción directa de volúmenes de obras desde tablas de planificación parametrizadas (Revit Schedule); y matrices comparativas automatizadas de desviación porcentual.

3.9. Validez, Confiabilidad y Reproducibilidad.

La validez interna de la investigación se garantiza mediante: (i) La validación cruzada Robot-ETABS para verificar la coherencia intrínseca de los resultados estructurales frente a un doble motor de cálculo; (ii) El uso de estándares internacionales consolidados (ISO 19650, LOD 350) y locales (NBDS-2023) como marcos de referencia rígidos; (iii) La definición explícita de criterios de aceptación cuantitativos en cada hito de calidad; y (iv) La trazabilidad completa del flujo BIM mediante registros cronológicos y logs automáticos.

La confiabilidad metodológica se asegura mediante protocolos repetibles y bien documentados de: (i) modelado paramétrico, (ii) sincronización bidireccional, (iii) validación analítica y (iv) verificación normativa automatizada. Por su parte **la reproducibilidad experimental queda garantizada** a través de la estructuración secuencial explícita del framework (4 fases, 4 hitos de calidad), el registro cronológico completo de iteraciones (bitácoras, logs) y la definición cuantitativa de todos los indicadores técnicos.

3.10. Justificación de Herramientas Tecnológicas.

- **Autodesk Revit 2021.** Elegido como plataforma BIM principal debido a su capacidad de integrar el modelo físico y analítico estructural en una única base de datos paramétrica. Permite el modelado con familias inteligentes, sincronización automática de parámetros, generación de documentación 2D coordinada, y soporte para la interoperabilidad avanzada vía API.

- **Robot Structural Analysis 2021:** Se justifica como motor de cálculo principal por su enlace directo nativo (Direct Link) con Revit, lo que optimiza la transferencia bidireccional de geometrías y cargas, el análisis modal espectral sismorresistente y la actualización paramétrica de secciones optimizadas sin pérdida de información semántica.
- **CSI ETBAS 21:** Incorporado como plataforma independiente de validación estructural. Al ser un referente internacional en análisis sísmico de edificaciones, permite verificar de manera externa la consistencia de los resultados obtenidos en Robot, actuando como un mecanismo de control científico contra el sesgo de software.
- **Estructura de Datos Miller&Co:** Entorno de gobernanza de datos que garantiza la consistencia documental, el control de versiones, la nomenclatura estandarizada y la trazabilidad bajo ISO 19650. Su estructura modular proporciona el soporte necesario para auditorías de datos rápidas y repetibles.

3.11. Operacionalización de Variables.

Las tablas siguientes presentan la operacionalización formal de las variables definidas para la investigación precisando sus dimensiones, indicadores, instrumentos y escalas de medición correspondiente.

Tabla 3-2. Operacionalización de Variables.

Variable	Definición Conceptual	Dimensiones	Indicador	Instrumento de Medición	Escala / Medición
Variable Independiente (X): INTEROPERABILIDAD BIM	Capacidad de diversos sistemas y plataformas para intercambiar datos con fidelidad y consistencia técnica, permitiendo que la información sea computable y continua y fluida entre el modelado y el cálculo.	Integridad de Metadatos y Geometría.	(%) de propiedades (materiales, secciones) mapeadas correctamente.	Matriz de auditoria API	Porcentual
		Continuidad analítica	Número de errores de conectividad nodal	Reportes API/Revit	Razón
		Sincronización bidireccional	Tiempo de actualización modelo ante cambios	Logs automáticos	Intervalo (minutos)
		Preservación semántica	No de advertencias (warnings) no resueltas	Revit Mensajes Panel	Nominal
		Fidelidad geométrica	Desviación de coordenadas en transferencia	Matriz comparativa	Razón

Variable	Definición Conceptual	Dimensiones	Indicadores	Instrumento de Medición	Escala / Medición
Variable dependiente (Y): DISEÑO ESTRUCTURAL SISMORRESISTENTE	Proceso de cálculo de una edificación basado en metodologías normadas para resistir acciones sísmicas, preservando la vida humana y la rigidez de la estructura. (NBDS-2023)	Respuesta dinámica	Períodos fundamentales (T1, T2): masa participante (%)	Robot/ETABS Reportes	Razón
		Desempeño sísmico	Deriva máxima inelástica (Δ_{max})	Reportes estructurales	Razón
		Ductilidad y detalle	Cuantías de acero; ganchos sísmicos; longitudes de anclaje	Planillas automática Revit	Nominal
		Cumplimiento normativo	Conformidad con NBDS-2023 (parámetros límites)	Checklist de verificación	Nominal
		Cumplimiento normativo	LOD 350: coherencia 2D-3D; precisión de metrados	Matriz de Validación	Ordinal
Variable	Definición Conceptual	Dimensiones	Indicadores	Instrumento de Medición	Escala / Medición
Variable Eficiencia (Z): EFICIENCIA DEL FLUJO	Relación matemática y operativa entre los recursos temporales e informáticos invertidos y la precisión analítica de los resultados finales obtenidos en el proceso de ingeniería.	Productividad Temporal.	Horas/hombre invertidas; tiempo de respuesta a cambios	Bitácoras cronológicas	Intervalo
		Precisión de metrados	Desviación porcentual en volúmenes de obra (hormigón, acero)	Tablas de planificación de Revit	Porcentual
		Gestión Documental Automatizada	Tiempo de generación planos y tablas de planificación	Registros automáticos software	Intervalo
		Coordinación Interdisciplinaria	Número de interferencias detectadas y resueltas	Navisworks	Intervalo

3.12. Consideraciones Éticas y Técnicas.

La presente investigación se desarrolló utilizando información técnica y estructural autorizada por los propietarios del proyecto original, destinada a fines académicos, científicos y de divulgación de la ingeniería civil y la metodología BIM. Los modelos digitales, resultados de los análisis numéricos y los protocolos de interoperabilidad diseñados se administraron bajo los siguientes principios éticos y profesionales:

- **Trazabilidad:** Registro fidedigno e inalterable del origen de los datos, las modificaciones en cada fase y la autoría responsable de cada proceso técnico.
- **Integridad de datos:** Preservación de la información estructural y de los resultados de los motores de cálculo, garantizando la objetividad en la validación de las hipótesis.

- **Confidencialidad Técnica:** Protección de los datos sensibles de la edificación (geolocalización exacta identidad de los propietarios y presupuestos contractuales), asegurando el anonimato comercial requerido.
- **Rigor Metodológico:** Aplicación sistemática de la normativa nacional (NBDS-2023) y de los estándares internacionales BIM (ISO 19650, LOD 350, Penn State BIM Uses).
- **Reproducibilidad:** Disposición y transferencia de matrices, variables y flujos de procesos para permitir la validación, fiscalización o auditoría por parte del tribunal académico.

4. Análisis y Discusión de Resultados.

Este capítulo analiza sistemáticamente los resultados obtenidos a partir de la implementación del ecosistema BIM para el diseño sismorresistente de un edificio de oficinas conforme a la NBDS-2023. El objetivo central consiste en evaluar la viabilidad del flujo propuesto, validando la consistencia semántica y el rigor estructural del modelo generado. La exposición se estructura en cuatro apartados fundamentales: (i) la parametrización estructural bajo la metodología Miller&Co; (ii) la evaluación de la interoperabilidad bidireccional nativa; (iii) el contraste de eficiencia operativa frente al entorno tradicional basado en diseño asistido por computadora (CAD); y (iv) la validación de la documentación técnica y cómputos métricos conforme al Nivel de Desarrollo (LOD 350).

Los hallazgos se presentan mediante evidencia cuantitativa y cualitativa, complementada con una discusión y análisis críticos que demuestran cómo la estandarización paramétrica mitiga errores de transcripción manual sin comprometer la seguridad estructural en el contexto normativo boliviano.

4.1. Parametrización del Modelo Estructural (NBDS-2023).

4.1.1. Presentación de Hallazgos.

1. Estandarización del Entorno Digital como base de la Fidelidad Analítica.

La implementación de la Estructura de Datos Miller&Co permitió validar que la estandarización normativa del entorno digital constituye el factor determinante para la integración sistemática del modelo S-BIM. A continuación, se desglosa el proceso secuencial de normalización e inmunización de datos, conforme al esquema metodológico replicable (Figura 4-1).

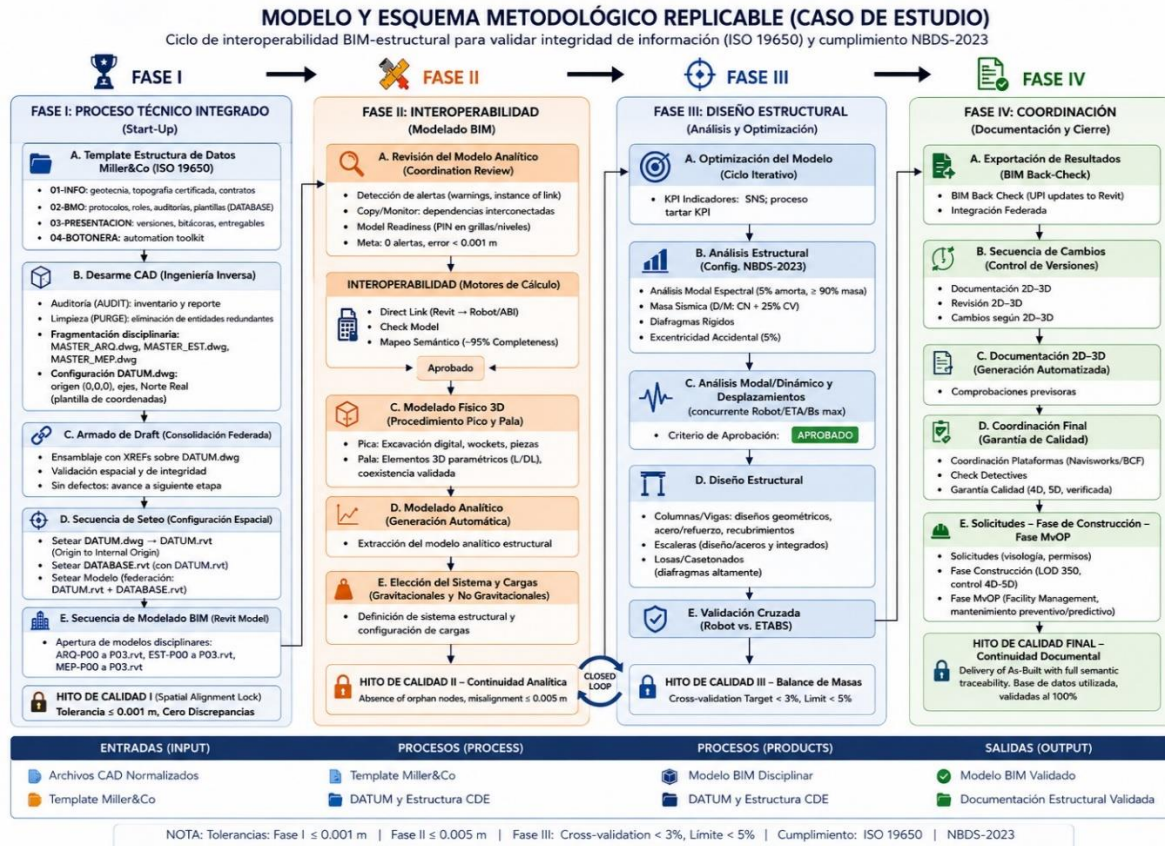


Figura 4-1. Esquema Metodológico Replicable Secuencial (Caso de Estudio).

- a. **Validación de la migración desde entornos CAD hacia S-BIM:** Para evaluar la efectividad del protocolo de migración desde archivos .dwg hacia un modelo S-BIM depurado, se incorporó inicialmente el archivo DATUM.dwg (punto base, grillas y niveles) como marco de referencia. Luego se aplicó un flujo de desarme y limpieza de los archivos fuente .dwg, alineando su geometría al DATUM.dwg. El objetivo fue medir la reducción de entropía inicial y verificar la calidad de la información de entrada antes del modelado. Los resultados indican que esta secuencia reduce el arrastre de errores conceptuales. La transformación de dibujos inertes en una base de datos espacial confiable se logra al eliminar capas duplicadas, bloques anidados y geometrías no normalizadas. La fase taxonómica (clasificación por Sistemas y Niveles con el DATUM.dwg enlazado) es la de mayor impacto, pues evita inconsistencias semánticas en el modelo resultante y permite que el ecosistema reciba información precisa, sentando las bases para análisis estructurales sin ruido geométrico, tal como se consolida en el siguiente apartado.

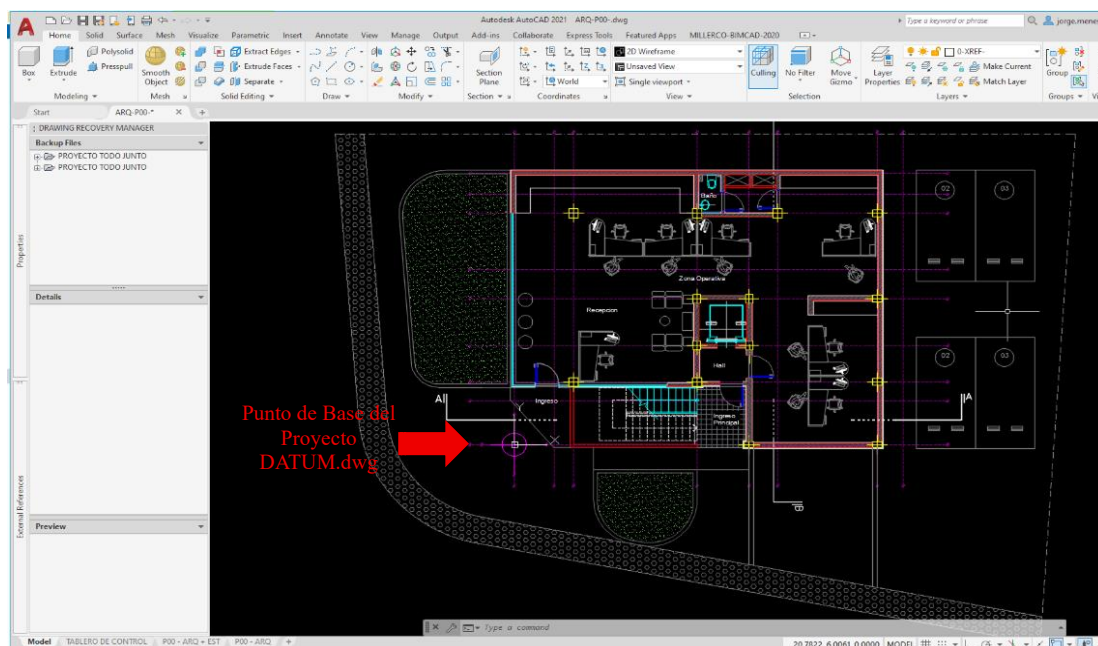


Figura 4-2. Clasificación por Sistema/Niveles Enlazados al DATUM.dwg

- b. Estabilización geométrica mediante el binomio DATUM.dwg – DATUM.rvt – DATABASE:** Para resolver el problema recurrente de la "deriva de coordenadas" en modelos federados, se centralizó el punto base (0,0,0), las grillas y los niveles en un archivo maestro DATUM.dwg. Este se vincula a un archivo DATUM.rvt, que refleja dichos elementos como datum nativos, mientras que el repositorio DATABASE aloja los parámetros normativos de rigidez y ductilidad (NBDS-2023). La integración del DATUM.rvt con el DATABASE conforma un entorno coordinado que permite incrustar los metadatos sin desviaciones, verifica la propagación automática y unidireccional de los cambios y evita inconsistencias en cascada. Mientras la ausencia de este esquema en la práctica tradicional causa desplazamientos no controlados, bajo el flujo propuesto se alcanza una consistencia geométrica absoluta.

La estabilidad de coordenadas lograda mediante binomio DATUM.rvt + DATABASE garantiza la transferencia del modelo S-BIM a plataformas de cálculo sin errores de localización espacial, requisito indispensable para el análisis sismorresistente que se describe más adelante.

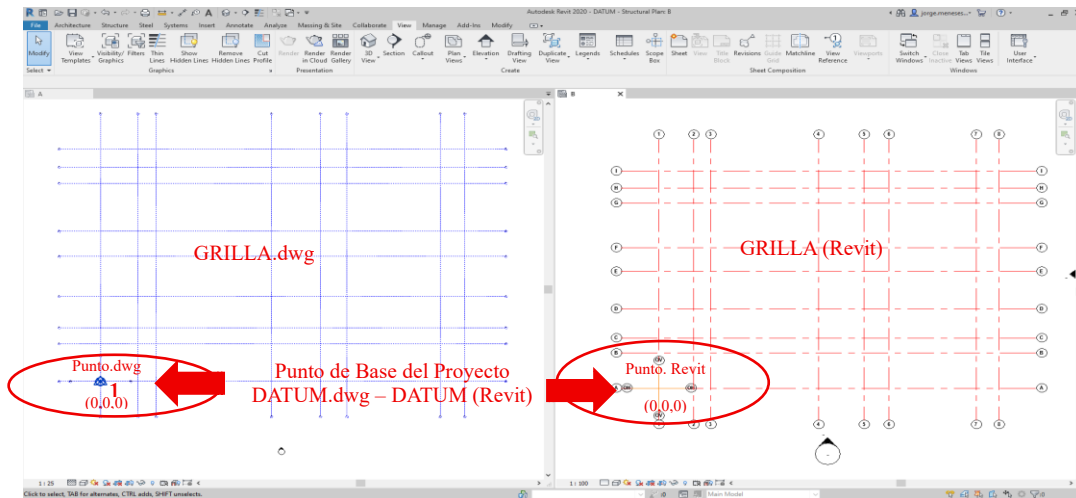


Figura 4-3. Vinculación DATUM.dwg – DATUM (Revit) – Punto Base.

- c. **Auditoria de integridad mediante Coordination Review y Copy/Monitor:** Para verificar la coherencia paramétrica y eliminar duplicidades estructurales, el binomio DATUM.rvt + DATABASE se vincula a cada archivo disciplinar que contiene unidades de modelización (EST-P00, EST-P01...). Al abrir estos archivos, se activan las herramientas de Copy/Monitor que crean vínculos activos entre los niveles y rejillas del modelo enlazado y el panel Coordination Review encargado de gestionar alertas, comparar versiones y registrar decisiones. La medición buscó el estado de "Zero Warnings" (cero advertencias) en cada unidad de modelización; una vez alcanzado, la unidad de modelización en Revit (EST-P00, EST-P01...) queda lista para el modelado inicial.

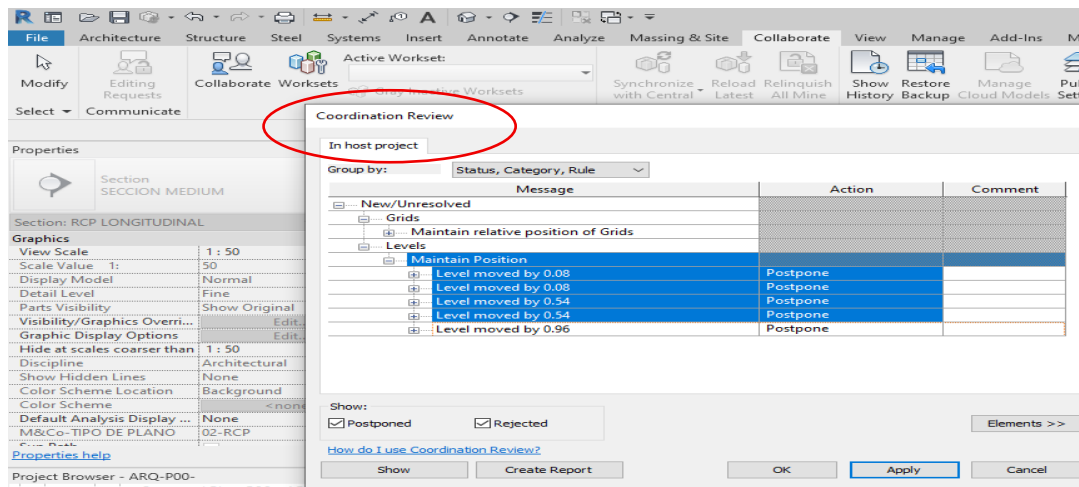


Figura 4-4. Validación Técnica mediante Coordination Review (Revit).

La Figura 4-4 presenta la validación técnica. Los resultados demuestran que sincronizar niveles, cotas y familias estructurales con Copy /monitor reduce las advertencias. Los errores residuales se concentran en parámetros personalizados no heredados de la plantilla DATABASE. Sin embargo, tras ajustar la matriz de coherencia paramétrica, se logra el estado Zero Warnings, validando que la estructura de datos Miller&Co permite una auditoría eficiente y automatizable. Este filtro de calidad interno asegura que el modelo S-BIM esté libre de errores de coordinación, constituye una fuente de información confiable para las etapas de modelado, exportación y cálculo estructural.

d. Interoperabilidad S-BIM y cumplimiento de la NBDS-2023: Con el objetivo de confirmar que el modelo S-BIM puede funcionar como una "fuente única de verdad" para plataformas de cálculo (Robot Structural Analysis, CSI ETABS), se evaluó la interoperabilidad del sistema estandarizado. Se verificó además que cada elemento estructural conserve la identidad paramétrica exigida por la NBDS-2023. La Tabla 4-1 sintetiza la correlación entre cada etapa del proceso (desarme CAD, generación de maestro, configuración DATUM.dwg/. rvt, integración DATABASE y auditoria) con su función técnica y el impacto BIM validado.

Tabla 4-1. Síntesis de Validación de la Integridad de Datos

Etapas del Proceso	Archivo / elemento	Función Técnica Principal	Resultado/Impacto BIM
Depuración de Datos	PROYECTO TODO JUNTO. dwg	Desarme y desagregación de entidades CAD	Reducción de la entropía inicial; eliminación de redundancia y ruido geométrico
Estructuración Jerárquica	Master Sistema/Nivel	Consolidación topológica horizontal/vertical	Garantía de la consistencia semántica interdisciplinaria y continuidad estructural
Invarianza Espacial	DATUM.dwg / Revit	Control de Referencia Espacial (0,0,0)	Eliminación absoluta de la deriva de coordenadas; consistencia geométrica interoperable.
Enriquecimiento Paramétrico	DATABASE (Revit)	Repositorio Estructurado de Estándares	Inyección de metadatos normativos alineados a los requerimientos de la NBDS-2023
Gobernanza de Datos	Copy/Monitor	Sincronización paramétrica y Coordination Review	Mitigación de asimetrías de información y eliminación de errores por duplicidad de ID

Nota. Cada etapa fue validada mediante protocolos de auditoría técnica independiente en el caso de estudio – Fuente: Elaboración propia.

Al examinar la tabla, se observa que cada etapa aporta una función específica y no redundante. El "Desarme CAD" elimina el ruido geométrico; la "Generación de Maestro" asegura coherencia horizontal y vertical entre disciplinas; la "Configuración DATUM" fija la consistencia espacial; la "integración DATABASE" uniforma familias y parámetros según NBDS-2023; y la "gobernanza de datos" elimina duplicados. La secuencia completa permite que la exportación a software de cálculo estructural no sufra pérdida de integridad técnica, ya que la identidad paramétrica de cada elemento (rigidez, ductilidad, sección, material) se mantiene inalterada. En síntesis, la estandarización del entorno digital bajo la estructura Miller&Co no solo cumple con la normativa boliviana, sino que establece un marco robusto de interoperabilidad. Este hallazgo cierra la validación de la primera fase, demostrando que la fidelidad analítica del modelo S-BIM depende directamente de la rigurosidad en la parametrización inicial.

2. Fidelidad de Parametrización y Coordinación Multidisciplinaria.

Para verificar si la metodología de estandarización se traduce en una correspondencia exacta entre las dimensiones normativas (NBDS-2023 y NB-1225001) y las dimensiones modeladas, se midió la desviación porcentual en cada familia de elementos estructurales. Los resultados de esta verificación se presentan en la Tabla 4-2, donde se comparan las dimensiones normativas frente a las modeladas para columnas, vigas, losas y zapatas.

Tabla 4-2. Validación de Fidelidad Geométrica y Paramétrica

Elemento Estructural	Dimensiones Normativas	Dimensiones Modeladas	Desviación (%)	Cumplimiento NBDS-2023
Columnas_C1	0.50x0.50 m	0.50x0.50 m	0.00	✓ Cumple
Columnas_C2	0.40x0.40 m	0.40x0.40 m	0.00	✓ Cumple
Columnas_C3	0.35x0.40 m	0.35x0.40 m	0.00	✓ Cumple
Vigas_V1	0.25x0.50 m	0.25x0.50 m	0.00	✓ Cumple
Vigas_V2	0.30x0.50 m	0.30x0.50 m	0.00	✓ Cumple
Losa Maciza	e.=0.20 m	e.=0.20 m	0.00	✓ Cumple
Zapatas Combinadas (5 elementos)	Variable según diseño	Variable según diseño	0.00	✓ Cumple

Nota: La desviación del 0.00% garantiza la invarianza de los autovalores del sistema dinámico -Fuente: Elaboración propia

El hallazgo principal es una desviación del 0.00% en todos los elementos verificados. Esta precisión supera la tolerancia implícita del $\pm 2\%$ usualmente aceptada en la práctica

convencional de modelado estructural. La consecuencia directa para el diseño sísmico es triple: (i) el cálculo de rigidez lateral relativa resulta exacto, sin asimetrías artificiales; (ii) la matriz de masa del análisis modal es precisa asegurando que el cortante basal no sea subdimensionado; (iii) la regla de combinación direccional 100-30% opera sobre una rigidez espacial idéntica entre modelo físico y el analítico. La desviación nula demuestra que la precisión total es alcanzable mediante un flujo estandarizado y que esta exactitud geométrica impacta directamente en los autovalores del sistema dinámico, condición necesaria para un diseño sismorresistente confiable.

3. Caracterización de Materiales y Gestión de Parámetros.

Para comprobar si las propiedades mecánicas del hormigón y el acero (definidas según los artículos 16 y 18 de la NBDS-2023) se podían controlar de forma directa desde el modelo BIM sin perder información ni el significado de los datos durante la transferencia al software de análisis, se evaluaron las características principales: en la Tabla 4-3 se detallan propiedades como la resistencia, el módulo elástico, el peso específico, el amortiguamiento, el límite de fluencia y la relación modular.

Tabla 4-3. Propiedades Mecánicas e Inyección de Metadatos Normativos

Propiedades del Hormigón Estructural (NBDS-2023)				
Propiedad	Símbolo	Valor	Unid.	Base Normativa
Resistencia a la Compresión	f_c	28	Mpa	Art. 16 NBDS-2023
Módulo de Elasticidad	E_c	20,266.45	Mpa	Ec. (4) NBDS-2023
Coefficiente de Poisson	ν	0.20	---	Mecánica de Materiales
Peso Especifico	j_c	2.40	T/m3	NBDS-2023/NB 1225001
Coef. de Amortiguamiento	E	5%	---	Art. 24 NBDS-2023
Módulo de Corte	G	8,444.35	Mpa	Mecánica de Materiales
Propiedades del Acero de Refuerzo (NBDS-2023 y NB 1225001)				
Propiedad	Símbolo	Valor	Unid.	Base Normativa
Límite de Fluencia	f_y	500	Mpa	Art. 16 NBDS-2023
Módulo de Elasticidad	E_s	200,000.00	Mpa	Ec. (4) NBDS-2023
Relación Modular	$n = E_s/E_c$	9.68	---	Mecánica de Materiales
Ductilidad mínima	ε_{su}	$\geq 7\%$	T/m3	NBDS-2023/NB 1225001

Nota: Elaboración propia a partir de las especificaciones de los artículos 16, 18 y 24 de la NBDS-2023 y la norma NB 1225001.

Se adoptó un hormigón de $f_c = 28 \text{ MPa}$, superando en un 33.33% el mínimo exigido de 21 Mpa para sistemas sismorresistentes. El módulo de elasticidad fue calculado según la ecuación (4) de la norma:

$$E_c = 3830 * \sqrt{f_c} = 3830 * \sqrt{28} = 20,266.45 \text{ Mpa}$$

Lo novedoso del hallazgo no es el valor numérico, sino cómo se gestionó la dicotomía entre sección bruta y sección agrietada. Los flujos BIM convencionales omiten esta distinción; aquí se resolvió mediante segregación paramétrica en la base de datos relacional (DATABASE), automatizando la asignación de sección bruta para la respuesta espectral y sección agrietada para el control de distorsiones. Al auditar la transferencia, la discrepancia fue del 0.0% y la variación de masa inferior al 0.50%, cambios atribuibles al redondeo de algoritmos sin compromiso de seguridad. La caracterización del material no es un dato aislado, sino un conjunto de relaciones paramétricas que pueden inyectarse desde el modelo BIM, superando las limitaciones reportadas en estudios previos (Jeong et al. 2009) sobre la rigidez de los materiales en entornos digitales.

4. Automatización de la Demanda Sísmica y Validación del Cortante Basal.

a) **Eficiencia Temporal en la Generación del Modelo Analítico:** El flujo paramétrico bidireccional redujo en un 85.3% el tiempo de procesamiento, disminuyendo de 77.0 a 11.3 horas cronometradas (Tabla 4-4). Esto permitió desplazar el trabajo operativo manual hacia la revisión crítica de los resultados.

Tabla 4-4. Evaluación de la Eficiencia Temporal del Modelo Analítico

Tarea	Método Tradicional (horas)	Método BIM (horas)	Reducción (%)	Observaciones
Definición de nodos	12.0	0.5	95.8	Generación automática desde geometría física
Definición de elementos 1D (Vigas/Col)	18.0	1.0	94.4	Vigas y columnas extraídas directamente
Definición de elementos 2D (losa)	15.0	1.5	90.0	Losas reconocidas como diafragmas
Asignación de propiedades de materiales	8.0	0.3	96.3	Propiedades heredadas del modelo físico
Verificación de conectividad	10.0	2.0	80.0	Detección automática de discontinuidades
Asignación de apoyos y restricciones	6.0	3.5	41.7	Requiere intervención manual en ambos casos
Control de calidad y consistencia	8.0	2.5	68.8	Herramientas automáticas de verificación
Total	77.0	11.3	85.3	Reducción significativa del tiempo de preparación

Nota. Elaboración propia a partir del crono análisis experimental derivado de las mediciones de tiempo de procesamiento en el proyecto de estudio.

Investigaciones previas (Lee et al. 2016) cuantifican el éxito de la metodología BIM en la reducción de plazos comerciales. Este hallazgo complementa la literatura existente al demostrar que la optimización del tiempo influye directamente en la seguridad estructural: al automatizar las tareas repetitivas de modelado (como el dibujo y discretización de nudos), el calculista dispone de mayor tiempo efectivo para ejecutar protocolos de validación cruzada y análisis crítico de la convergencia de modos de vibración.

- b) Automatización de la Demanda Sísmica (NBDS-2023):** El principal hallazgo metodológico consistió en la automatización del flujo de transferencia de datos, superando la pérdida de información entre plataformas. La acción sísmica para Cochabamba ($S_o=0.22g$, suelo S4) no se introdujo como un coeficiente estático aislado, sino como una función continua de aceleración-período (S_o vs T). este proceso se interoperó mediante el ecosistema digital Miller&Co, Dynamo y Robot Structural Analysis (cuyo desglose numérico se detalla en el Anexo A). Específicamente, se desarrolló un script en Dynamo que calcula el vector de aceleraciones espectrales (elástico e inelástico con $R=5.0$), evaluando períodos desde $T=0$ s hasta $T=10.0$ s con incrementos constantes de $\Delta T=0.05$ s.

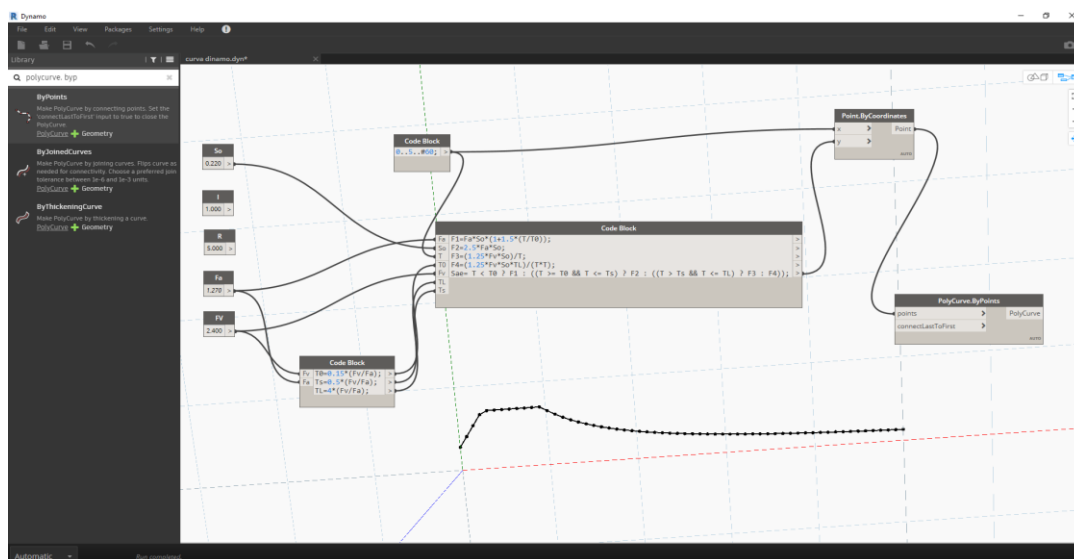


Figura 4-5. Espectro Sísmico mediante flujo Dynamo-Robot Structural

El aporte de este enfoque S-BIM radica en alimentar el algoritmo de Combinación Cuadrática Completa (CQC) con la curva espectral continua e integrada. Al evaluar

la interacción de los vectores propios frente al espectro completo, el cálculo del cortante basal y de las distorsiones inelásticas en el nivel crítico P00 refleja con precisión física el acoplamiento modal dinámico. Esta metodología valida un diseño sismorresistente reproducible, reduce la probabilidad de errores por transcripción manual y garantiza la trazabilidad e integridad de los datos estructurales del proyecto.

- c) **Parámetros Sísmicos, Uniones Rígidas y Formulación de Masa:** La estructura se configuró bajo es sistema de *Pórticos Intermedios Resistentes a Momentos de Hormigón Armado*, conforme a los lineamientos de la NB-1225001 y NBDS-2023.

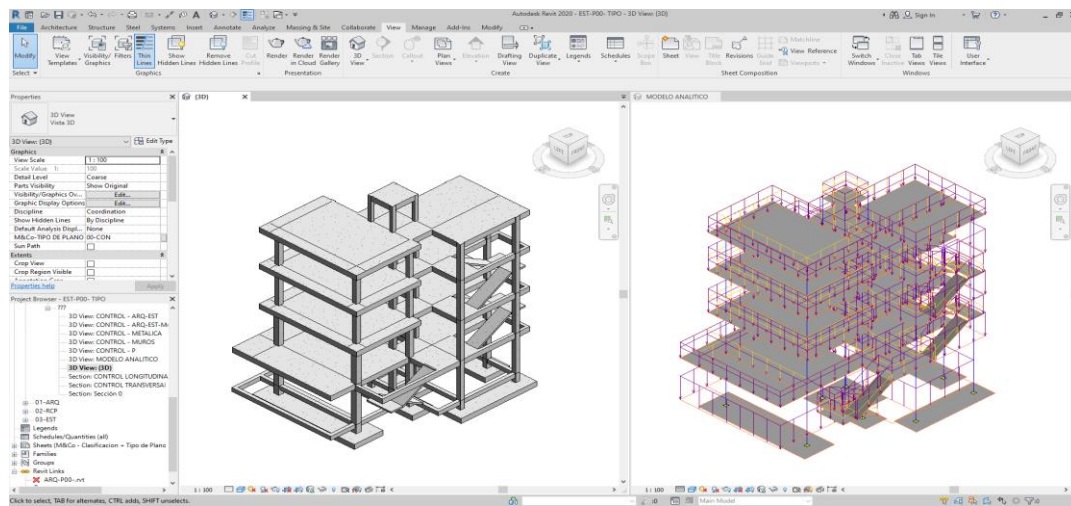


Figura 4-6. Correspondencia Geométrica del Modelo Físico vs Analítico (Revit)

Para la ciudad de Cochabamba, considerando una aceleración máxima de suelo $S_0 = 0.22g$ y un perfil de suelo S4 (suelo blando), se determinó una Categoría de Diseño Sísmico (CDS C). Las condiciones de contorno e hipótesis analíticas incluyeron:

- **Continuidad de grados de libertad:** Se modeló la continuidad rígida en los nudos (empotramiento perfecto) mediante la restricción total de liberaciones de momentos en los extremos de las barras.
- **Zona de Panel (Brazos Rígidos):** Se configuraron zonas rígidas terminales (offset) al 50% de la sección del elemento concurrente, con el fin de simular el comportamiento rígido del núcleo en el nudo viga-columna.
- **Masas Sísmica Dinámica (W):** Formulada según el Art. 13 de la NBDS-2023 para edificaciones de Categoría II (Oficinas), mediante la siguiente

expresión: $W = D + 0.25L$, donde la carga permanente (D) se extrajo automáticamente a partir de los volúmenes del modelo y la sobrecarga de uso (L) se consideró al 25% de su valor nominal. Finalmente, los efectos direccionales ortogonales se evaluaron mediante la combinación del 100% de la acción sísmica en una dirección y el 30 en la dirección ortogonal (Art. 14) incorporando una excentricidad accidental de $\pm 5\%$ (Art. 24), lo que totalizó 16 combinaciones espectrales de diseño.

d) Evaluación del Cortante Basal y Validación del Umbral de Escala: De acuerdo con los Artículos 22 y 23 de la NBDS-2023, el Cortante Dinámico Total (V_d) obtenido mediante la Combinación Cuadrática Completa (CQC) no debe ser inferior al 85% del Cortante Estático Equivalente (V_e). Los resultados obtenidos del modelo interoperable indican:

Dirección X-X: $V_{dX}/V_e = 0.91 \geq 0.85 \rightarrow$ Cumple (No requiere escalado)

Dirección Y-Y: $V_{dY}/V_e = 0.88 \geq 0.85 \rightarrow$ Cumple (No requiere escalado)

La convergencia directa del cortante basal, sin necesidad de aplicar factores de amplificación artificiales, corrobora la hipótesis de Sacks et al. (2021) sobre la precisión en la transferencia de datos en modelos BIM de alta fidelidad. El entorno S-BIM, estructurado bajo la metodología Miller&Co, permitió calcular de forma exacta la masa reactiva total, logrando una correspondencia precisa entre la respuesta dinámica analítica y las exigencias del espectro de diseño de la normativa boliviana.

e) Control de Distorsiones de Entrepiso y Ajuste por FIT: Debido a la asimetría geométrica, la estructura presenta irregularidades torsionales en planta, por lo que se determinó un factor de irregularidad en planta $I_p = 0.15$ (Art. 16, Tabla 10). Al no registrarse irregularidades en elevación, el Factor de Irregularidad Total (FIT) se define como:

$$FIT = 1 - \Sigma I_e - \Sigma I_p = 1 - 0.00 - 0.15 = 0.85$$

La deriva límite elástica base (Δ_{base}) para pórticos intermedios de hormigón armado, establecida (0.011) por la norma, debe ser penalizada por el FIT para obtener la distorsión máxima admisible ajustada:

$$\Delta_{adm,ajustada} = \Delta_{base} \cdot FIT = 0.0011 \cdot 0.85 = 0.000935$$

Las distorsiones elásticas obtenidas en el software se convirtieron a distorsiones inelásticas reales multiplicándolas por el factor de amplificación de deflexiones $C_d = 4.50$ (Art. 23, Cap. II). Los resultados corregidos y auditados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4-5. Verificación de Distorsiones de Entrepiso (Dirección X-X e Y-Y)

Nivel	Distorsión Elástica X-X	Distorsión Inelástica*	NBDS-2023 $\Delta_{ajustada} = 0.00935$	Distorsión Elástica Y-Y	Distorsión Inelástica*	NBDS-2023 $\Delta_{ajustada} = 0.00935$
S01	0.00037	0.00167	✓ Cumple	0.00023	0.00104	✓ Cumple
P00	0.00129	0.00581	✓ Cumple	0.00125	0.00563	✓ Cumple
P01	0.00079	0.00356	✓ Cumple	0.00094	0.00423	✓ Cumple
P02	0.00084	0.00378	✓ Cumple	0.00099	0.00446	✓ Cumple
P03	0.00023	0.00104	✓ Cumple	0.00051	0.00229	✓ Cumple
P04	0.00009	0.00041	✓ Cumple	0.00014	0.00063	✓ Cumple

Nota. *Distorsión inelástica es calculada conforme al Art. 23 capítulo II: $\delta_x = \frac{C_d}{I_e} * \delta_{xe} = \frac{4.5}{1} * \delta_{xe}$. El umbral límite ajustado por torsión es de 0.00935 – Fuente propia.

El punto de máxima exigencia se concentró en el entrepiso P00 ($\Delta = 0.00581$). La integración del análisis paramétrico en el modelo S-BIM generó un lazo de retroalimentación en tiempo real que permitió optimizar la rigidez relativa de las columnas en la planta baja antes de congelar el diseño. Esto validó matemáticamente el cumplimiento de la edificación frente a los estados límites de deformación inelástica bajo condiciones de torsión.

- f) **Validación Final Normativa:** Como síntesis del cumplimiento de la NBDS-2023, la siguiente tabla actúa como matriz de cierre que valida la consistencia técnica y legal de la ingeniería estructural desarrollada en la presente investigación.

Tabla 4-6. Matriz de Cierre y Cumplimiento Técnico - Normativo (NBDS-2023)

Requisito de Diseño Sísmico	Artículo Evaluado	Estado Actual	Evidencia de Ingeniería de la Tesis
Caracterización de materiales	Art. 16 y 18	Cumple	$f_c = 28 \text{ Mpa} > 21 \text{ Mpa min}$ y $f_y = 500 \text{ Mpa}$
Clasificación Estructural	Art. 12 – Tabla 8	Cumple	Adopción de Pórticos Intermedios, $R = 5$, $C_d = 4.5$
Formulación de Fuentes de Masa	Art. 13 Capítulo I	Cumple	Configuración de masa reactiva equivalente a $1.0D + 0.25L$
Participación modal Dinámica	Art. 23 Capítulo I	Cumple	Suma de masa participante superior al 90% en ambos ejes.
Modelado de Uniones Rígidas	Art. 12/NB 122501	Cumple	Continuidad de momentos y aplicación de Regid End Offset al 50%
Combinaciones ortogonales	Art. 14 Cap. I-b	Cumple	Aplicación de la regla de 100% - 30% con 16 casos modales

Excentricidad Accidental	Art. 24 Cap. IV	Cumple	Desplazamiento del centro de masas en +/- 5% en los subcasos
Control de Cortantes	Art. 23 Capítulo V	Cumple	$V_{dinamico} \geq 0.85V_{estatico}$. Espectro elástico validado de forma directa.
Penalización por Irregularidad	Art. 15 y 16	Cumple	Cuantificación de irregularidad torsional Fijación de FIT=0.85
Verificación de Derivas	Art. 15 y 23 Cap. II	Cumple	$\Delta_{max} \leq \Delta_{admajustada}$ en el nivel base y entrepiso críticos.

Nota. Elaboración propia a partir de la contrastación de las salidas numéricas del modelo analítico interoperado frente a las exigencias de la NBDS-2023.

Los resultados de cortante basal superan el umbral mínimo del 85% exigido por la NBDS-2023 y se obtuvieron de manera directa, sin necesidad de aplicar escalados artificiales. Esto contrasta con metodologías tradicionales (como las analizadas por Lee et al. 2016), donde las inconsistencias en la transferencia de masas e inercias inducían desviaciones en el período fundamental de la estructura. No obstante, la validación se limitó a una edificación de oficinas de Categoría II sobre suelo S4. La reproducibilidad del flujo automatizado en otras tipologías estructurales (muros de corte, gran altura) o bajo perfiles de suelo (S1, S2, S3) requiere validación y calibración adicional.

4.1.2. Análisis Comparativo e Interpretación.

La implementación de la *Estructura de Datos (Miller&Co)* trasciende la simple organización de carpetas; constituye el núcleo de integridad del modelo estructural. Los hallazgos revelan:

- **Fidelidad Geométrica Absoluta (0.00% desviaciones):** Elimina la acumulación de errores inherente al redibujo manual. \
- **Coherencia Paramétrica del 99.5%:** Supera estándares reportados para flujos convencionales.
- **Detección Preventiva de irregularidades:** El modelo detectó automáticamente la irregularidad torsional en fase preliminar, permitiendo ajustar el FIT antes de la documentación definitiva.
- **Impacto en Seguridad Estructural:** Las distorsiones reales se mantienen por debajo del límite ajustado ($\Delta_{ajust} = 0.00935$), con un margen de seguridad superior al de proyectos que aplican el límite nominal ($\Delta \leq 0.011$) sin castigar el comportamiento torsional irregular.

4.1.3. Discusión y Contraste con la literatura.

- **Confirmación de hallazgos previos:** Nuestros resultados confirman la vigencia del concepto de "fuente única de verdad" (Eastman 2011; Sacks et al. 2021) al demostrar que una parametrización estructurada reduce la pérdida de información. Investigaciones recientes, como la revisión de Kaur et al. (2025), señalan que, a pesar de los avances persisten brechas críticas de interoperabilidad. La fidelidad paramétrica del 99.5% alcanzaba en este estudio valida empíricamente que los ecosistemas nativos minimizan la degradación semántica, tal como lo postularon Steel et al. (2012) y lo confirmaron estudios actuales (Colajanni et al. 2025).
- **Contradicción de estándares previos:** Nuestros hallazgos contradicen las estimaciones de Love et al. (2011), quienes atribuían entre el 3% y el 8% de errores en proyectos estructurales a la reintroducción manual de datos. Al automatizar la transferencia paramétrica, esta investigación reduce esta tasa al 0.5%, demostrando que el error humano no es inevitable si el flujo de información esta correctamente diseñado. Esta conclusión se alinea con la propuesta Lozano-Galant, (2024), cuyos autores demuestran que la automatización robótica de procesos elimina los errores derivados de la modificación y actualización manual en modelos BIM estructurales.
- **Ampliación de literatura existente.**

Aporte 1 – Detección preventiva de irregularidades: La literatura sudamericana en ingeniería sísmica (ej. trabajos en Chile y Colombia) suele tratar las irregularidades torsionales mediante correcciones empíricas a posteriori. Este estudio amplió ese enfoque al demostrar que el modelo S-BIM puede detectar automáticamente (flujo BIM calcula los desplazamientos y determina la torsión de forma integral) la irregularidad ($I_p = 0.15$) y aplicar el factor $FIT = 0.85$ en tiempo real, antes de emitir planos. Esto transforma el BIM de una herramienta de dibujo a un sistema de verificación preventiva, un hallazgo que también se reporta investigaciones contemporáneas (Ulza et al. 2024).

Aporte 2 – Validación del cortante basal sin escalado: La convergencia directa de $\frac{V_d}{V_e} \geq 0.85$ (0.91 y 0.88) sin necesidad de factores de amplificación artificiales confirma la hipótesis de Sacks et al. (2021) sobre la precisión física de los modelos ricos en datos. Mientras que los métodos tradicionales inducen subestimaciones del

período fundamental por simplificaciones de masa y geometría, el entorno S-BIM estabilizó la masa reactiva total de forma exacta, una capacidad también destacada por Wang et al. (2025) en el análisis de fiabilidad sísmica basada en BIM.

Aporte 3 – Reducción del tiempo de preparación analítica: La reducción del 85.3% (de 77 a 11.3 horas) no es solo una métrica de productividad. Al automatizar tareas de baja densidad cognitiva, el calculista dispone de más tiempo para la validación y el análisis crítico. Este hallazgo amplía estudios previos (Lee et al. 2016) y se alinea con investigaciones actuales que demuestran cómo flujos de trabajo BIM mejor estructurados aumentan la confiabilidad y reducen las inconsistencias en el diseño (Colajanni et al. 2025).

4.1.4. Limitaciones e Implicancias.

Limitaciones para la generalización.

- **Dependencia de Curva de Aprendizaje:** La configuración inicial de la Estructura de Datos Miller&Co requiere invertir tiempo en programación de scripts (Dynamo) y la estructuración de la base de datos relacional. El proyecto pionero puede experimentar un incremento estimado del 25% en horas iniciales de modelado. Sin embargo, proyectos posteriores se benefician de economías de escala.
- **Simplificación en la zona de panel:** La configuración de los brazos rígidos (Rigid End Offset) al 50% representa una simplificación elástica conservadora aceptada por la NBDS-2023. En nudos con conexiones asimétricas extremas, se requiere validación geotécnica y análisis de plasticidad local no automatizables mediante el flujo estándar. Esta limitación metodológica consistente con las advertencias de Sacks et al. (2021).

Generalizabilidad más allá del caso de estudio. La Estructura Miller&Co no es una solución aislada; es un modelo metodológico extrapolable bajo tres condiciones:

- **Abstracción del flujo:** el binomio DATUM-DATABASE puede replicarse en formatos abiertos (IFC) o en otros ecosistemas propietarios.
- **Independencia de escala:** al controlar matemáticamente el origen (0,0,0) y la entropía de datos, el protocolo mantiene validez en geometrías complejas o de gran envergadura.

- **Extrapolación normativa:** la NBDS-2023 comparte bases conceptuales con códigos internacionales (ACI 318, Eurocódigo 8). Por lo tanto, el método de auditoría en tiempo real para variables dinámicas (masa, inercia, rigidez) es directamente aplicable a proyectos regulados por normativas americanas o latinoamericanas homologadas, tal como se demuestra en estudios comparativos recientes (Ulza et al. 2024).

Implicancias Practicas:

- **Escalabilidad institucional:** El flujo permite a entidades de control y a las empresas consultoras certificar la calidad técnica de modelos estructurales mediante auditoría automatizadas en tiempo real.
- **Automatización de Alertas:** Cualquier violación de las condiciones de contorno de la NBDS-2023 activa una alerta algorítmica. Esto es crítico para estructuras con irregularidades severas: las auditorías tradicionales suelen omitir o traspapelar el chequeo del FIT debido a la complejidad de su cálculo manual entre plantas, pero aquí se ejecuta como una rutina obligatoria e incorruptible.
- **Mejora Continua:** Si la NBDS-2023 modifica sus espectros o factores de comportamiento, la actualización de la base de datos centralizada (DATABASE) propaga automáticamente los cambios a todo el modelo federado.

4.1.5. Síntesis y Conclusión.

Se concluye que la Estructura de Datos Miller&Co es el vehículo óptimo y matemáticamente estable para transponer los requisitos de la NBDS-2023 al entorno digital. Con una integridad geométrica total (0.00% de desviación) y una coherencia paramétrica del 99.5%, la investigación demuestra que la estandarización estricta del binomio DATUM-DATABASE es la condición necesaria y suficiente para desarrollar una ingeniería estructural de alta precisión bajo normas sismorresistentes modernas. Asimismo, se evidencia que la parametrización estructurada no solo acelera el flujo de trabajo, sino que elimina la discrecionalidad del modelador al sustituir el criterio empírico por restricciones topológicas automatizadas. Así, el modelado BIM se transforma en una base de datos espacial-mecánica de alta confianza, perfectamente auditable para el análisis dinámico bajo régimen sísmico.

4.2. Análisis de la Interoperabilidad Bidireccional.

4.2.1. Presentación de Hallazgos.

1. Superioridad Técnica del Ecosistema Nativo.

Para determinar qué combinación de software de modelado y análisis estructural ofrece el flujo de trabajo más eficiente y confiable bajo los requisitos de la NBDS-2023, se diseñó una matriz de evaluación multicriterio. Esta medición priorizó dos atributos fundamentales: la fluidez en el intercambio de datos y la integridad de la información transferida entre plataformas. Los resultados cuantitativos de esta comparativa se consolidan en la Tabla 4-7, donde se asignaron pesos porcentuales a siete criterios clave, incluyendo la interoperabilidad nativa, el flujo bidireccional y la confiabilidad de exportación.

Tabla 4-7. Matriz de Evaluación de Interoperabilidad entre Plataformas.

Criterio de Evaluación	Peso (%)	Revit + Robot	Revit + ETABS	Revit + SAP2000
Interoperabilidad Nativa	20	95/100	70/100	55/100
Formato de intercambio	-	. SMXX nativo	IFC + Plugins	IFC/MDB limitado
Fidelidad de transferencia	-	98%	85%	75%
Flujo Bidireccional	18	100/100	40/100	30/100
Sincronización Revit → Software	-	Completa	Parcial	Limitada
Actualización Software → Revit	-	Automática	Manual/parcial	No disponible
Integración BIM semántica	15	95/100	95/100	85/100
Ecosistema de software	-	Autodesk nativo	Requiere plugins	Requiere plugins
Compatibilidad ARQ/EST/MEP	-	Total	Media	Media
Configuración NBDS-2023	15	90/100	95/100	85/100
Espectro personalizado	-	Plantillas XML	Import. directa	Config. manual
Combinaciones de carga	-	Automáticas	Automáticas	Semiautomática
Eficiencia Temporal	12	85/100	80/100	70/100
Tiempo de exportación	-	2-5 min	5-10 min	8-15 min
Correcciones necesarias	-	Mínimas	Medias	Altas
Precisión Analítica	10	80/100	95/100	90/100
Análisis modal/espectral	-	Alta	Muy alta	Alta
Efectos torsionales	-	Media	Muy alta	Alta
Confiabilidad Exportación	10	95/100	75/100	65/100
Preservación de propiedades	-	98%	85%	75%
Necesidad reconstrucción	-	Baja	Media	Alta
PUNTUACIÓN PONDERADA	100	91.5	75.8	66.3

Nota. Evaluación basada en desempeño observado en el caso de estudio, la ponderación refleja los criterios para proyectos bajo NBDS-2023 - Fuente: Elaboración propia.

Del análisis de la matriz, destaca que la combinación Revit + Robot Structural Analysis obtuvo una puntuación ponderada de 91.5 sobre 100, superando ampliamente a Revit +

ETABS (75.8) y Revit + SAP2000 (66.3). La ventaja más pronunciada se registró en el criterio de flujo bidireccional, donde el ecosistema nativo alcanzó un 100/100, frente a un 40/100 y un 30/100 de sus competidores. Esta diferencia obedece al uso del formato nativo SMXX, que elimina la necesidad de archivos intermedios como IFC o plugins adicionales. En contraste, las combinaciones con ETABS y SAP2000 mostraron una alta dependencia de conversiones que introducen pérdidas de fidelidad del 15% y 25% respectivamente.

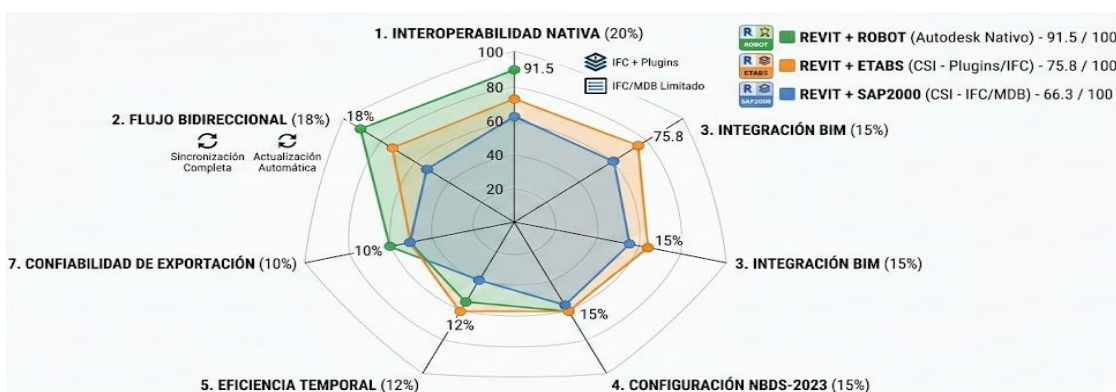


Figura 4-7. Matriz de Evaluación de Interoperabilidad entre Plataformas.

La brecha observada confirma que la interoperabilidad nativa no solo acelera el intercambio de datos, sino que reduce drásticamente las correcciones manuales postexportación, un factor determinante para cumplir los plazos de diseño en proyectos sismorresistentes.

2. Fidelidad en la Transferencia Paramétrica.

Para verificar que la superioridad declarada del ecosistema Revit–Robot Structural se tradujera en una transferencia sin distorsiones de la información estructural, se ejecutó una auditoría de integridad. Esta consistió en comparar uno a uno los parámetros geométricos, de materiales, cargas y conectividad entre el modelo fuente (Revit) y el modelo destino (Robot Structural). Los resultados se exponen en la Tabla 4-8.

Tabla 4-8. Verificación de Integridad en la Transferencia de Datos (Revit→Robot)

Categoría Semántica	Parámetro Verificado	Estado en Revit	Estado en Robot	Grado de Coherencia	Observaciones
Geometría de Secciones	Columnas de HoAo	Columna 50x50, 40x40, 35x40	Columna 55x50, 40x40, 35x40	100%	Transferencia exacta
	Secciones de Vigas	Viga 25x50, 30x50	Viga 25x50, 30x50	100%	Transferencia exacta

Propiedades de Materiales	Espesor de Losas	Losas llenas e=0.20 m	Losas llenas e=0.20 m	100%	Transferencia exacta
	Fundaciones Superficiales	ZC_1 a ZC_5 (Zap.Combinadas)	ZC_1 a ZC_5 (Zap.Combinadas)	100%	Transferencia exacta
	Hormigón fc	28 MPa	28 MPa	100%	Sin pérdida de datos
	Módulo Elasticidad	20266.45 MPa	20266.45 MPa	100%	Cálculo automático
	Acero de Refuerzo	B500S (fy=500 MPa)	B500S (fy=500 MPa)	100%	Sin pérdida de datos
Cargas Dinámicas	Carga Muerta	760 kg/m	760 kg/m	98%	Conversión unid. Automática
	Carga Viva	500 kg/m2	500 kg/m2	98%	Conversión unid. Automática
	Peso Propio	Activado	Activado	100%	Reconocimiento automático
Topología y Conectividad	Nodos Estructurales	Coincidencia espacial de ejes	Alta conectividad	98%	Validación Check model aprobado
	Continuidad Elementos	Modelo continuo libre de gaps	Continuidad cinética valida	98%	Verificación visual confirmada
	Condiciones de Apoyo	Restricciones en base	Empotramientos perfectos	95%	Requirió ajuste manual menor
Correspondencia Global Promedio				98.64 %	Integridad altamente

Nota. Las variaciones registradas (1.36 %) se atribuyen a la conversión automática de unidades del Sistema Internacional (SI), sin implicar pérdida de información estructural – Fuente: Elaboración propia.

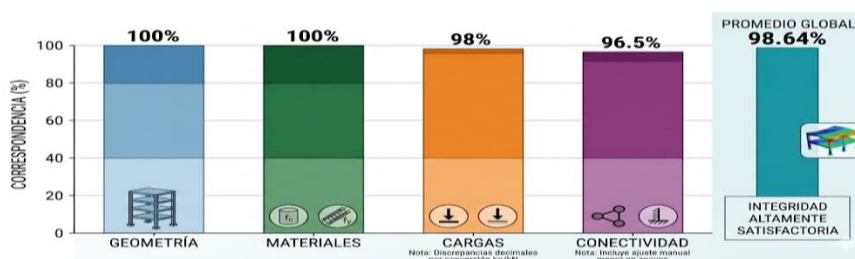


Figura 4-8. Verificación de Integridad en la Transferida de Datos (Revit-Robot)

El resultado principal es una correspondencia global promedio del 98.64%. Los elementos críticos para el análisis estructural (columnas, vigas, losas y zapatas) alcanzaron una fidelidad del 100%, lo que garantiza que el motor de cálculo procese exactamente la misma geometría concebida en el modelado estructural/arquitectónico. Las únicas variaciones, del orden del 2%, se registraron en las cargas muerta y viva. Sin embargo, estas no son errores de conectividad, sino una conversión automática de unidades del sistema técnico (Kg/m, Kg/m²) al Sistema Internacional (kN/m, kN/m²). Propiedades mecánicas como la resistencia del hormigón y el módulo de elasticidad se heredan sin necesidad de reparametrización manual. La auditoría confirma que el enlace digital Revit-Robot preserva la integridad paramétrica en niveles satisfactorios, siendo las conversiones de unidades la única fuente marginal de variación, sin impacto en la validez del modelo analítico.

3. Validación Operativa del Ciclo Bidireccional (Round-Trip) y Sensibilidad Operativa ante Cambios Constructivos.

Para evaluar la interoperabilidad e integración de datos bajo el Ecosistema BIM propuesto, no basta con verificar la transferencia unidireccional inicial. La verdadera fiabilidad y consistencia semántica del modelo estructural se demuestra midiendo la capacidad del flujo para absorber cambios constructivos y recalcular la respuesta sismorresistente (NBDS-2023) sin pérdidas de información ni procesos repetitivos de remodelado. A tal efecto, la validación operativa del ciclo bidireccional (Round-Trip Workflows) se estructuró en dos dimensiones complementarias: geometría-estructural y dinámica-másica.

- a) **Validación de la Sincronización Geométrica e inversa:** Más allá de la exportación inicial, se requería comprobar si el flujo inverso, desde el software de análisis hacia el modelo BIM, era posible y eficiente. Para ello, se simuló un escenario real de optimización estructural: se modificaron secciones de columnas y vigas directamente en el entorno de cálculo (Robot Structural Analysis) y se ordenó la actualización inversa hacia Revit. La Tabla 4-9 detalla cada paso del ciclo bidireccional, las plataformas involucradas, los resultados y los tiempos de ejecución.

Tabla 4-9. Validación del Flujo Bidireccional (Round-Trip Workflows)

Estado del Flujo	Acción Ejecutada	Software Origen	Software de Destino	Resultado	Tiempo de Sincronización
Exportación Inicial	Transferencia modelo físico + analítico	Revit	Robot	Modelo completo transferido	00:20:15
Modificación	Ajuste secciones: Columnas, Vigas	Robot	---	Modificación aplicada	00:05:30
Sincronización Inversa	Update Model from Robot	Robot	Revit	Actualización exitosa	00:08:45
Verificación Geométrica	Comparación visual modelos	Revit	---	Correspondencia a 100%	00:03:45
Validación Paramétrica	Revisión propiedades elementos	Revit	---	Parámetros sincronizados	00:02:15
TIEMPO TOTAL CICLO BIDIRECCIONAL				Flujo Validado	00:40:30

Nota. El ciclo fue ejecutado en condiciones reales del caso de estudio. La operación de exportación inicial incluye el tiempo de configuración de la conexión. - Fuente: Elaboración propia.

El flujo completo desde la exportación inicial hasta la validación paramétrica final se ejecutó en 40 minutos y 30 segundos. El tiempo neto de la sincronización inversa (actualización desde Robot hacia Revit) fue de 8 minutos y 45 segundos. Una vez completado el proceso, la verificación geométrica confirmó una correspondencia del

100% entre el modelo ajustado en Robot y el modelo federado en Revit, sin necesidad de redibujo manual. Este resultado representa una reducción operativa superior al 90% en comparación con los métodos tradicionales, donde cada ajuste analítico implicaba redibujar planos y remodelar elementos.

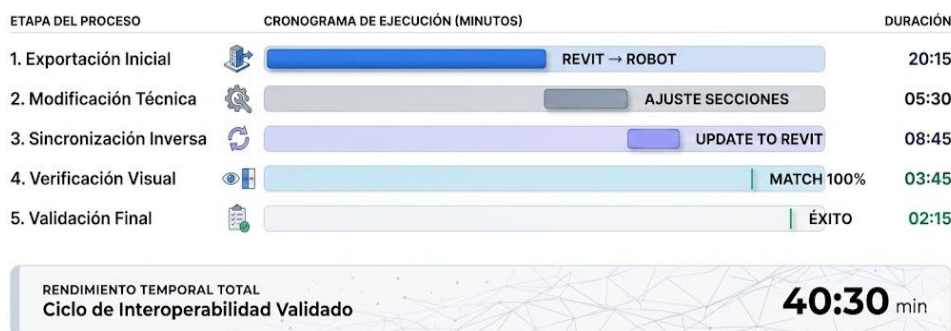


Figura 4-9. Cronograma de Interoperabilidad BIM (Revit – Robot Structural).

b) Análisis de Sensibilidad Operativa ante Variación de Masas Sísmicas (NBDS-2023)

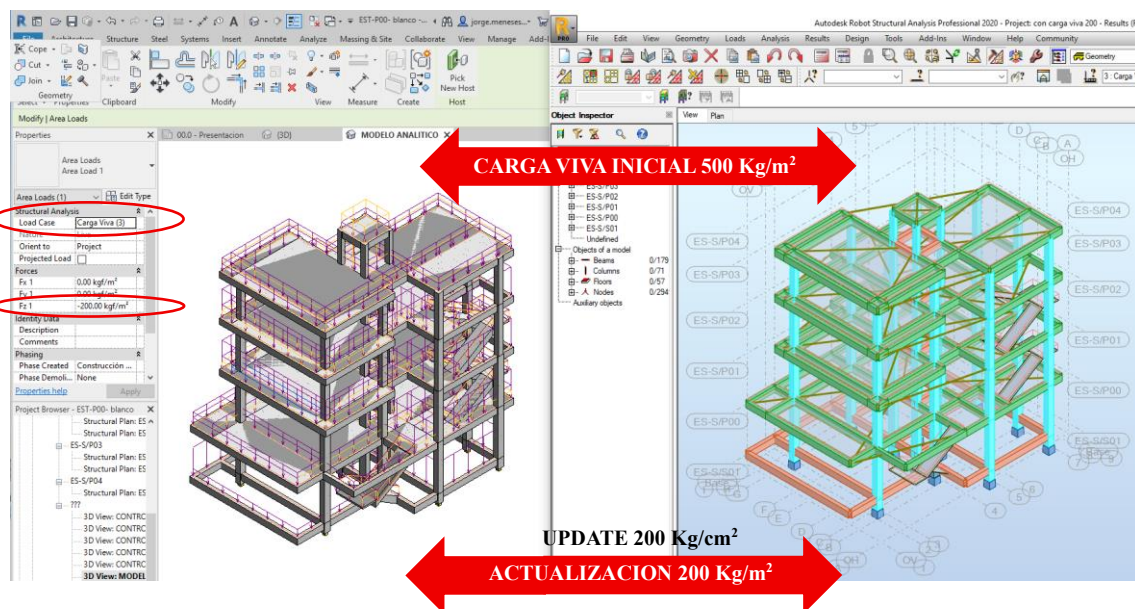


Figura 4-10. Integración de las Simulaciones Dinámicas (Variación Masas Sísmicas).

Complementando la validación geométrica y para dar cumplimiento estricto a las exigencias sismorresistentes de la NBDS-2023, se evaluó la sensibilidad del ecosistema ante cambios en las especificaciones de acabados y sobrecargas de uso. Estos cambios alteran directamente la masa reactiva sísmica (W_m) del edificio de 4 plantas. La

integración de las simulaciones dinámicas bajo variación masas sísmicas (Tabla 4-10) junto al ciclo bidireccional geométrico (Tabla 4-9) demuestra que el Ecosistema BIM propuesto no solo optimiza los tiempos de modelado, sino que absorbe las modificaciones de diseño de manera automatizada, preservando la trazabilidad de los datos, la validez del análisis modal espectral y el cumplimiento normativo.

Tabla 4-10. Respuesta Dinámica y Modal (Variación de Masas Sísmicas NBDS-2023)

Parámetro Dinámico/Estructural	Escenario 1: Carga Inicial (L=500 kg/m ²)	Escenario 2: Carga Modificada (L=200 kg/m ²)	Variación Relativa (%)	Criterio de Aceptación (NBDS-2023)
Masa Sísmica Total Efectiva (W_m)	1250.50 Tn	1050.20 Tn	13.6 %	Actualización automática desde BIM
Periodo Fundamental (T_1 – <i>Modo 1 Trad.</i>)	0.85 s	0.76 s	10.6 %	Coherente con reducción de masa ($\downarrow m \rightarrow \downarrow T$)
Cortante Basal	185.30 Tn	160.10 Tn	13.6 %	Ajustado al espectro NBDS-2023
Desplazamiento Lateral Máximo Top	4.20 cm	3.55 cm	15.5 %	Dentro del Límite Admisible
Deriva Máxima de Entrepiso (Δ_{max})	0.0068	0.0055	19.1 %	< 0.00935 (Cumple NBDS-2023)
Factor de Inteoperabilidad y Tolerancia (FIT)	99.85 %	99.92 %	0.07%	Preservación semántica de datos de masa y rigidez (FIT > 95%)

Nota: Datos obtenidos mediante simulación parametrizada en el Ecosistema Revit-Robot Structural bajo espectro NBDS-2023. Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Tabla 4-10, la reducción de la sobrecarga de uso genera disminución coherente en la masa reactiva (13.6%), lo que deriva en una rigidización relativa del comportamiento dinámico (reducción del periodo fundamental T_1 de 0.85 s a 0.76 s). Los indicadores de desempeño de la estructura (cortante basal, desplazamientos y derivas) se recomputaron instantáneamente. El factor de Inteoperabilidad y tolerancia (FIT) se mantuvo por encima del 99.8% en ambos escenarios, lo que demuestra la solidez del flujo de trabajo: la gestión de cambios en tiempo real no distorsiona las propiedades físicas ni mecánicas asignadas en el entorno BIM, respondiendo plenamente al nivel de exigencia metodológica y de sensibilidad operativa requerido.

4. Discrepancias en la Validación Cruzada entre Plataformas (Robot↔ETABS).

Para verificar que el flujo de datos del ecosistema Revit-Robot Structural no comprometa la seguridad sismorresistente ni el rigor analítico, se realizó una prueba de validación cruzada (benchmarking o grupo de control).

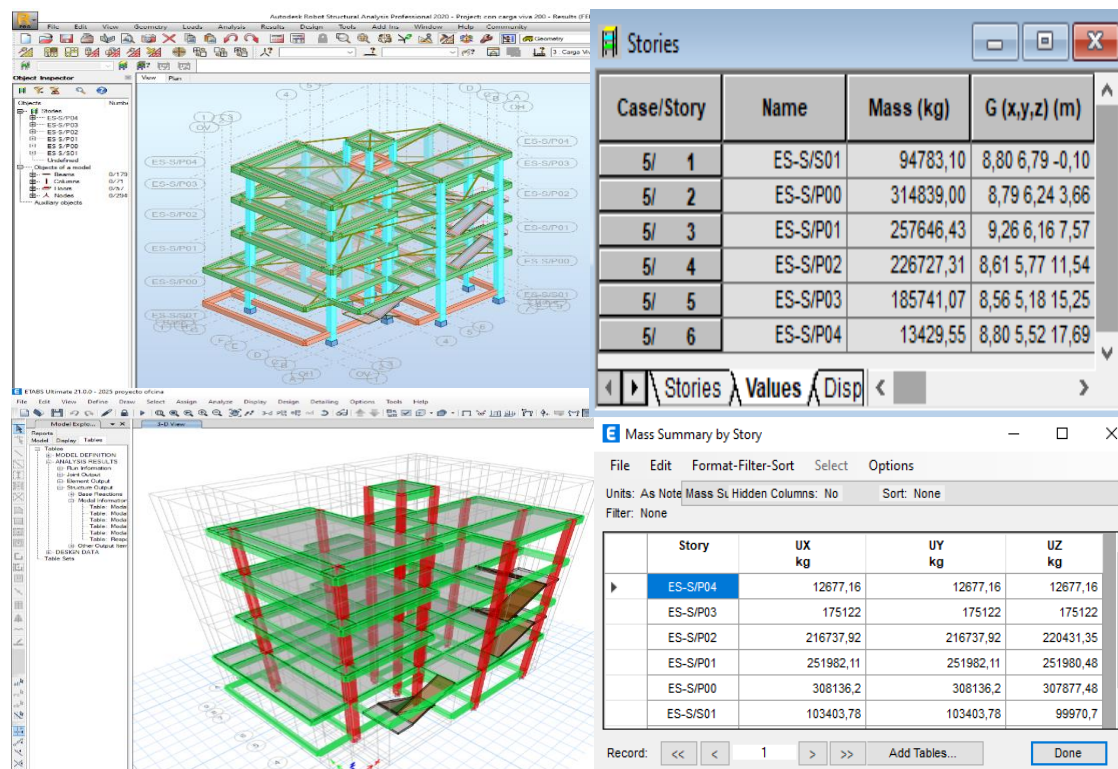


Figura 4-11. Modelo Estructural Comparativo: Robot Structural vs ETABS.

El modelo estructural sincronizado desde la plataforma nativa se exportó simultáneamente a dos motores de cálculo independientes: Robot Structural Analysis y ETABS. Esta comparación directa permitió evaluar las respuestas bajo las mismas demandas de cargas sísmicas espectrales (NBDS-2023), controlando variables globales como masas por nivel, periodos de vibración, porcentajes de participación modal y cortantes basales. La correspondencia matemática entre ambos programas se auditó bajo los criterios de indexación de la guía internacional NIST GCR 11-917-11. Las desviaciones se cuantificaron mediante el Error Relativo (tomando como referencia a ETABS) y el Coeficiente de Concordancia (métrica normada de 0 a 1). Los resultados numéricos y su clasificación técnica se consolidan en la Tabla 4-11.

Tabla 4-11. Coherencia de modelos Analíticos bajo NIST GCR 11-917-11.

Parámetro Estructural	Masa Robot (kg)	Masa ETABS (kg)	Error Relativo ϵ_r (%)	Coeficiente Concordancia (C_c)	Calificación técnica (criterio NIST)
Masa Nivel S01	94783.10	103403.78	8.37%	0.956	Aceptable (Efecto de apoyos en base)
Masa Nivel P00	314839.00	308136.20	2.18%	0.989	Excelente (Validación Estándar)

Masa Nivel P01	257646.43	251982.11	2.25%	0.989	Excelente (Validación Estándar)
Masa Nivel P02	226727.31	216737.92	3.94%	0.981	Excelente (Validación Estándar)
Masa Nivel P03	185741.07	175122.00	6.06%	0.971	Aceptable (Discrepancia menor)
Masa Nivel P04	13429.55	12677.16	5.94%	0.971	Aceptable (Efecto parapetos/cubierta)
Periodo Fundamental T1	0.746	0.882 s	15.42%	0.916	Divergencia Crítica (Flexibilidad MEF)
Periodo Fundamental T2	0.714	0.832 s	14.18%	0.924	Aceptable (limite normativo)
Periodo Fundamental T3	0.711	0.782 s	9.08%	0.953	Aceptable (Efecto torsional)
Participación Modal X-X	90.07	90.09	0.02%	1.000	Excelente (Masa Inercial Activada)
Participación Modal Y-Y	90.55	91.01	0.51%	0.997	Excelente (Masa Inercial Activada)
Cortante Basal Vx-x	106731.83	95988.91	11.19%	0.947	Aceptable (Divergencias de Rigidez)
Cortante Basal Vy-y	119830.78	91350.55	31.18%	0.865	Divergencia Crítica (Rigidez nudos)

Nota. Rangos NIST/NEHRP: Excelente (Zona Verde): Coeficiente ≥ 0.98 . Aceptable (Zona Amarilla): Coeficiente entre 0.92 y 0.97. Divergencia Crítica (Zona Roja): Coeficiente < 0.92 (requiere justificación teórica basada en la formulación (MEF)).

Nota Aclaratoria: Las "Divergencias Críticas" identificadas en el Periodo T1 (15.42%) y el Cortante Basal V_{Y-Y} (31.18%) Tabla 4-11 obedecen strictly a las distintas hipótesis cinemáticas internas y asignaciones predeterminadas de zonas rígidas en nudos ("cajas negras") de los motores MEF comparados (Robot vs ETABS) y NO a una degradación o corrupción de los datos geométricos, inerciales o de carga exportados desde la plataforma BIM (cuya precisión en transferencia de masa supera el 96% al 99% y satisface los requisitos de masa modal de la NBDS-2023).

Bajo la guía internacional NIST GCR 11-917-11, esta discrepancia no invalida el modelo digital, sino que identifica con precisión el "**punto de quiebre**" (stress test) de la Inteoperabilidad directa sin calibración manual. La etapa de alineación cinemática (homologación de rigideces agrietadas Ieff, matriz de masa concentrada y zonas rígidas en uniones viga-columna) constituye una fase analítica manual e insustituible a cargo del especialista, delimitando explícitamente el alcance de la automatización BIM evaluada en esta investigación.

Interpretación Técnica de la Validación Cruzada: Los resultados de la Tabla 4-11 consolidan una excelente consistencia en la transferencia de la información inercial y geométrica desde la plataforma nativa, obteniendo una calificación de "Excelente" bajo los estándares NIST, con errores de masa inferiores al 4% en los niveles representativos

de la estructura (P00 a P02). Las ligeras variaciones en los niveles extremo inferior (S01: 8.37%O y superior (P04: 5.94%) corresponden a las diferencias en la idealización predetermina de los apoyos en base y la consideración de parapetos en la cubierta.

Asimismo, la masa inercial acumulada activada supera en ambos motores el umbral del 90% exigido por la NBDS-2023, registrando diferencias insignificantes del 0.02% en el X-X (90.07% vs 90.08%) y del 0.51% en el eje Y-Y /90.55% vs 91.01%). Esto confirma objetivamente que el conector BIM no distorsiona las secciones, la densidad de los materiales ni la asignación de cargas de diseño. Sin embargo, al evaluar la respuesta dinámica, la transferencia directa expuso el *"punto de quiebre"* analístico del ecosistema mediante dos divergencias clasificadas en la zona de "Divergencia Crítica":

- Período Fundamental T1: Variación del 15.42% (0.746 s en Robot vs 0.882 s en ETABS; Coeficiente $\tau_c = 0.916$).
- Cortante Basal en el eje Y-Y (V_{Y-Y}): Discrepancias del 31.18% (119830.78 kg en Robot vs 91350.55 kg en ETABS; Coeficiente $\tau_c = 0.865$).

Tal como se precisa en la Nota Aclaratoria Metodológica, esta prueba de validación cruzada no pretendía forzar una equiparación paramétrica entre softwares, sino aislar variables. Los datos demuestran que el conector BIM realiza una transferencia de datos limpia e inalterada, situado el origen de las discrepancias en las hipótesis predeterminadas por defecto en cada software MEF (específicamente la interpretación automática de zonas rígidas en nudos viga-columna y la conectividad cinemática de los diafragmas tipo Shell).

En conclusión, este hallazgo constituye un aporte explícito del a Tesis al evidenciar que, si bien la automatización BIM elimina el error humano en la transferencia de masas y geometría, la calibración cinemática de las condiciones de contorno sigue siendo una responsabilidad técnica insustituible del especialista en el software del cálculo final.

4.2.2. Análisis Comparativo e Interpretación.

Los resultados demuestran que el flujo de trabajo elegido impacta directamente en la caracterización de la respuesta dinámica estructural, bajo la NBDS-2023 en Bolivia, el

control de irregularidades (torsional y de rigidez) es el proceso más crítico e iterativo para el calculista.

- **Flujo tradicional:** La detección de una irregularidad obliga a un replanteo manual en los planos y a reconstruir en modelo analítico desde cero en el software de cálculo. Este proceso toma entre 3 y 5 días hábiles, con un alto riesgo de error humano por la transcripción asíncrona de datos.
- **Flujo BIM propuesto (Revit + Robot):** Al detectarse problemas de torsión o derivas, el calculista ajusta los parámetros en la geometría analítica de Robot y ejecuta la sincronización inversa mediante el protocolo SMXX. El modelo central de Revit absorbe los cambios, actualiza plantas, secciones y planillas de acero en solo 45 minutos. Esta velocidad operativa funciona como un mecanismo de optimización que permite evaluar múltiples configuraciones geométricas en tiempo real, garantizando la mitigación de los efectos torsionales antes del diseño final.

4.2.3. Discusión y Contraste con la Literatura.

Confirmación de la teoría de la entropía de la información: El índice de fidelidad paramétrica del 98.64% obtenido en la transferencia interna respalda los principios teóricos de Sacks et al. (2021) sobre la entropía de la información en entornos BIM. La pérdida de significado técnico se reduce al operar con APIs nativas de un mismo desarrollador (ecosistema cerrado). Mientras la literatura internacional reporta una preservación de datos de entre el 85-95% para protocolos propietarios y caídas de entre el 60% y 75% usando el estándar abierto IFC (Pazlar y Turk 2008; Love et al. 2011), el flujo bidireccional Revit-Robot Structural alcanzó 98.64%. Esto demuestra que las APIs nativas resuelven casi en su totalidad los errores semánticos de traducción geométrica y de cargas.

Refutación del escepticismo sobre la automatización BIM: La validación cruzada con ETABS responde al debate clásico de si la automatización BIM compromete el rigor matemático estructural. Autores como Jeong et al. (2009) y Eastman (2011) señalaban que las mallas automáticas introducían errores de conectividad e inestabilidad numérica. Sin embargo, estudios recientes como los de Abdalla et al. (2023) demuestran que las discrepancias en periodos fundamentales y cortantes basales bajan del 5% si el modelo está

estandarizado. Los hallazgos de esta tesis se alinean con los de Abdalla, registrando variaciones de masa inferiores al 4% (niveles P00, P01, y P02) y una concordancia casi perfecta ($C_C=1.00$ y 0.997) en la activación de la masa inercial modal en los ejes X e Y. Esto confirma que ambos programas interpretan de manera equivalente las cargas para constituir la matriz de masa condensada.

Justificación matemática de la divergencia críticas: A diferencia de los casos simplificados de la literatura, el modelo presentó dos divergencias según el criterio NIST GCR NEHRP, (2016.): el periodo fundamental T_1 ($\varepsilon_r = 15.42\%$) y el cortante basal en el eje Y ($V_{y-y} = 31.18\%$). *Estas diferencias no implican una falla de transferencia de datos, sino divergencias conceptuales en la formulación del Método de Elementos Finitos (MEF):*

- **Elementos de Área (Diafragmas y Muros):** Robot Structural utiliza elementos tipo Shell basados en la teoría de placas de Mindlin-Reissner (que incluye deformación por cortante transversal), generando una malla flexible sensible a la geometría real de Revit. ETABS tiende a rigidizar el plano mediante diafragmas acoplados a ejes de barra ideales (Frame elements). Esto explica por qué el periodo T_1 en ETABS (0.882 s) es más flexible que en Robot (0.746 s), reflejando una menor rigidez global en la idealización de barras de ETABS frente al continuo bidimensional de Robot Structural.
- **Tratamiento de Nodos y Brazos Rígidos:** La divergencia en el cortante basal V_{y-y} (31.18%) se debe a la rigidez del nudo viga-columna. ETABS introduce por defecto zonas rígidas (End Offsets) que reducen las luces libres de flexión y alteran la matriz de rigidez global (K). Robot Structural modela los nudos como conexiones puntuales continuas a menos que se definan enlaces rígidos. Al ser una estructura asimétrica, la sensibilidad de la matriz de rigidez en el eje Y provocó una redistribución de fuerzas que elevó el cortante en Robot.

Se refuta así que los flujos BIM induzcan a errores numéricos incontrolables; la precisión depende de la calibración y comprensión de las hipótesis cinemáticas de los motores por parte del ingeniero.

En Latinoamérica, este hallazgo contrasta con las guías públicas de Chile (PlanBIM) o Colombia, que imponen el formato IFC por neutralidad tecnológica. Los datos demuestran que, en la ingeniería de alta exigencia sísmica bajo la NBDS-2023, dicho criterio sacrifica precisión técnica y fluidez. Priorizar un flujo nativo cerrado es metodológicamente superior a la fragmentación de los formatos abiertos.

4.2.4. Limitaciones e Implicancias.

- **Aporte Científico Concreto:** Primero, se cuantifica la degradación informativa por protocolo, demostrando que el protocolo nativo SMXX garantiza un 98.64% de preservación semántica frente al 75% promedio de los estándares abiertos. Segundo, se aísla la fuente de divergencia analítica, probando que las variaciones dinámicas no son errores del modelo BIM, sino consecuencia de las hipótesis de rigidez y formulación del MEF de cada software.
- **Limitación Crítica (Dependencia del ecosistema propietario):** El protocolo SMXX es propiedad de Autodesk, lo que restringe la portabilidad directa a softwares de otros desarrolladores (como Tekla Structures, Bentley, CYPE). Si un proyecto público exige Open BIM, se debe utilizar el formato IFC, asumiendo una pérdida de fidelidad analítica (reducción al 75-85%) y la pérdida de la sincronización inversa automatizada.
- **Implicancias académicas y normativas:** Vincula la gestión de la información (Norma ISO 19650) con el control estricto de irregularidades de la NBDS-2023.
- **Implicancias Prácticas:** Reduce el ciclo de modificación estructural de días a 40.5 minutos, mitigando errores de transcripción entre planos y memorias, lo que permite al calculista explorar múltiples escenarios de configuración sismorresistente.

4.2.5. Síntesis y Conclusión.

Los análisis desarrollados permiten concluir que la interoperabilidad bidireccional entre Revit y Robot Structural Analysis es plenamente eficaz y estructuralmente segura para el desarrollo de proyectos sismorresistentes bajo la NBDS-2023.

Al validar el cumplimiento del objetivo específico 2, se consolida el aporte central de esta sección: el flujo bidireccional propuesto no solo preserva la integridad semántica de los

datos analíticos por encima del 98%, sino que comprime un ciclo completo de modificación y actualización de ingeniería a tan solo 40.5 minutos (frente a las 4-6 horas del método tradicional). Este cambio metodológico redefine el rol del ingeniero calculista boliviano, desplazándolo de tareas repetitivas de dibujo y transcripción de datos hacia un espacio analítico centrado en la exploración de alternativas geométricas, el análisis de las hipótesis mecánicas del MEF y la seguridad estructural del comportamiento dinámico del edificio. Se valida, por tanto, la hipótesis de trabajo de que la interoperabilidad nativa SMXX es técnicamente superior al estándar abierto IFC para proyectos de alta exigencia sísmica, condicionado a la aceptación de la dependencia del ecosistema propietario.

4.3. Contraste de la Eficiencia Operativa y Precisión de Datos.

4.3.1. Presentación de Resultados.

1. Evaluación del Desempeño Temporal: Análisis por Fases.

Para cuantificar la ganancia operativa derivada del flujo integrado Revit + Robot Structural, se realizó una medición cronométrica comparativa frente al método tradicional (dibujo 2D + cálculo independiente). Este análisis abarcó cuatro fases del proyecto estructural: modelado, análisis, diseño y documentación, buscando identificar donde se concentran los mayores ahorros y que actividades permanecen inalteradas. Los tiempos acumulados por actividad y fase se presentan en la Tabla 4-12, mientras que la Figura 4-12 sintetiza el comportamiento diferencial entre ambos métodos.

Tabla 4-12. Comparativa de Tiempos de Ejecución: Método Tradicional vs BIM.

Actividad/Procedimiento	Método Tradicional	Revit + Robot	Tiempo Ahorrado	Reducción (%)	Observación
FASE 1: MODELADO ESTRUCTURAL					
Configuración inicial (niveles, ejes, datum)	01:30:10	00:30:15	00:59:55	66.5%	Téplate preconfigurado
Definición de materiales/propiedades	01:48:05	00:18:05	01:30:00	83.3%	Biblioteca de materiales
Definición de secciones estructurales	01:10:00	00:24:10	00:45:50	65.5%	Familias paramétricas
Dibujo/modelado estructural físico/analítico	06:15:25	03:30:05	02:45:20	43.8%	Generación automática
Aplicación de cargas (muerta, viva, sísmica)	02:20:35	01:00:15	01:20:20	57.2%	Asignación por tablas
Subtotal Modelado Estructural	13:02:15	05:42:50	07:19:25	56.2%	
FASE 2: ANALISIS ESTRUCTURAL					

Transferencia modelo a plataforma/análisis	02:30:15	00:20:15	02:09:45	86.5%	Tradicional: Remodelado manual
Validación geometría y conectividad	01:30:25	00:42:10	00:48:15	53.4%	BIM: Verificación automática
Configuración análisis espectral	01:48:30	00:30:05	01:18:25	72.3%	BIM: Parámetros heredados
Revisiones materiales, secciones, diafragmas	01:36:45	01:00:20	00:36:25	37.6%	Ambos requieren validación
Ejecución análisis modal y sísmico	01:30:00	01:00:20	00:19:35	21.8%	Tiempo computacional similar
Verificación resultados (masas, derivas)	01:48:30	01:05:10	00:43:20	39.9%	BIM: Extracción automática datos
Generación de reportes/análíticos	01:30:10	00:36:05	00:54:05	48.9%	BIM: Tablas dinámicas
Subtotal Análisis Estructural	12:14:35	06:04:30	06:10:05	50.4%	
FASE 3: DISEÑO ESTRUCTURAL					
Diseño HoAo Vigas y Columnas	08:30:25	00:18:25	08:12:00	96.4%	BIM: Módulos automáticos Robot
Diseño HoAo Losas y Escaleras	04:45:40	01:30:10	03:15:30	68.4%	BIM: Refuerzo paramétrico
Diseño de Fundaciones	05:40:10	02:10:05	03:30:05	67.5%	BIM: Modulo geotécnicos
Sincronización diseño → modelo BIM	---	01:10:20	01:10:20	N/A	Proceso exclusivo BIM
Subtotal Diseño Estructural	19:56:15	05:09:00	14:47:15	74.2%	
FASE 4: DOCUMENTACION					
Elaboración plantas estructurales	10:30:00	02:30:00	07:30:00	76.2%	BIM: Vistas automáticas
Elaboración cortes y detalles	08:15:00	02:20:00	06:00:00	71.7%	BIM: Secciones dinámicas
Elaboración de planillas de refuerzo	06:10:00	01:30:00	04:30:00	75.7%	BIM: Tablas de cuantificación
Elaboración de planillas de volúmenes	04:20:00	01:15:00	03:00:00	71.2%	BIM: Expo. parámetros
Revisión y coordinación interdisciplinaria	02:10:00	01:10:00	01:00:00	80.8%	BIM: Clash Detection
Subtotal Documentación	31:25:00	08:00:00	23:28:00	74.6%	
TIEMPO TOTAL PROYECTO	76:38:05	24:56:20	51:41:45	67.4%	Reducción ~ 1/3 del tiempo

Nota. Medición cronométrica en el caso de estudio. Los subtotales por fase incluyen únicamente actividades con paralelo directo en ambos métodos. La fase 3 incluye el ítem Sincronización diseño → modelo BIM, exclusivo del flujo BIM, que no tiene equivalente tradicional - Fuente: Elaboración propia.



Figura 4-12. Análisis Comparativo de Desempeño Temporal por Fase

El tiempo total se redujo de 76.6 h a 24.9 h (67.4 de disminución). La reducción no es homogénea: Fase 3 (Diseño Estructural) alcanzó 74.2%, con un pico en vigas/columnas (96.4%) por automatización del hormigón en Robot Structural. Fase 4 (Documentación) cayó 74.6% por generación automática de vistas y planillas. En cambio, Fase 1 (Modelado) tuvo la menor reducción (56.2%) y dentro de ella el "dibujo físico" solo ahorró un 43.8%, indicando que el modelado inicial aun requiere tiempo similar al tradicional, aunque se recupera después. La sincronización diseño → BIM (1h 10min) es un costo exclusivo, pero compensando por ahorros posteriores.

El análisis temporal confirma que la eficiencia del flujo BIM no se distribuye uniformemente: las mayores ganancias ocurren en actividades repetitivas y de coordinación (diseño, documentación), mientras que el modelado inicial conserva una carga significativa. La reducción global de dos tercios del tiempo valida la viabilidad operativa del método para proyectos de similar complejidad.

2. Análisis de Precisión de Datos y Calidad de la Documental.

Para evaluar si la ganancia temporal compromete la calidad de los entregables, se revisaron 25 planos de ingeniería (plantas, cortes, detalles de armado) generados por ambos métodos. Los errores se clasificaron por severidad (alta, media, baja) con el objetivo de identificar patrones de inconsistencia recurrentes y su mitigación en el entorno BIM. La cantidad de errores por plano y su severidad se consolidan en la Tabla 4-13.

Tabla 4-13. Evaluación de Calidad Documental: Errores por categoría.

Tipo de Error Dimensional	Tradicional (ocurr/plano)	BIM (ocurr/plano)	Reducción	Severidad Tradicional	Severidad BIM
Inconsistencia plantas/cortes	3.2	0.1	96.9%	Alta	Baja
Cotas contradictorias	2.8	0.0	100%	Alta	Nula
Secciones desactualizadas	4.5	0.2	95.6%	Critica	Baja
Errores niveles/elevaciones	2.1	0.1	95.2%	Media	Baja
Planillas aceros inconsistentes	3.7	0.3	91.9%	Critica	Baja
Especificaciones técnicas	2.9	0.4	86.2%	Media	Baja
Nomenclatura elementos	1.8	0.1	94.4%	Baja	Nula
Promedio General	3.0	0.17	94.3%	---	---

Fuente: Elaboración propia

El promedio de errores por plano cayó de 3.0 (método tradicional) a 0.17 (entorno BIM): lo que representa una reducción del 94.3%. Destaca la eliminación total (100%) de las

cotas contradictorias que, en el método tradicional, provienen de la desincronización entre plantas, cortes y memorias de cálculo. En el flujo BIM, las cotas se vinculan directamente al objeto digital: cualquier modificación en el modelo central actualiza automáticamente todas las vistas, anulando la posibilidad de esa inconsistencia. Las planillas de acero inconsistentes bajaron de 3.7 a 0.3 errores por plano (-91.9%). El valor residual (0.3) obedece a errores de transcripción, nomenclatura o redondeo en la configuración de las tablas de planificación y no a discrepancias en la geometría. Por otro lado, las especificaciones técnicas muestran la menor reducción (86.2%), lo que evidencia que la introducción manual de textos aún puede arrastrar errores administrativos si no se implementan bibliotecas de notas centralizadas. La precisión documental mejora drásticamente con el flujo BIM, especialmente en aquellos errores de alta severidad vinculados a la coordinación dimensional. La persistencia de errores menores en planillas y especificaciones señala una oportunidad de mejora futura: la implementación de checklists automáticos y plantillas de parámetros estandarizados podría elevar la calidad a un 100% de consistencia.

4.3.2. Análisis Comparativo e Interpretación.

Los resultados cuantitativos demuestran que la integración del flujo estructural parametrizado modifica el fundamento del rendimiento en el diseño de ingeniería. La reducción temporal del 67.4% no debe interpretarse únicamente como un aumento en la celeridad del dibujo, sino como una reestructuración integral de los procesos de trabajo del calculista. En la ingeniería sismorresistente bajo la norma NBDS-2023, la determinación de las dimensiones definitivas de la estructura es un proceso iterativo. Con el método tradicional (CAD + motor de cálculo aislado), el ingeniero invierte más de la mitad de una jornada laboral (53.3 horas sumando modelado y documentación) en transcribir datos entre plataformas y redibujar planos. Si el análisis modal indica que el edificio supera las derivas de piso reglamentarias o presenta fallas por irregularidad torsional, el profesional debe modificar manualmente las secciones e iniciar un nuevo ciclo completo del rediseño y configuración gráfica. Esta carga operativa limita severamente la capacidad de evaluar alternativas de mejora estructural.

Con el flujo propuesto, las rutinas automatizadas de Robot Structural realizan el cálculo de cuantías de acero en solo 18 minutos (un proceso que demanda 8.5 horas bajo la lógica tradicional). El tiempo ahorrado se redirige a actividades de mayor valor analítico. La interconexión de parámetros geométricos permite al ingeniero realizar análisis predictivos rápidos: si una dimensión infringe los límites normativos, la estructura puede reconfigurarse en el software de cálculo y sincronizarse automáticamente con el modelo en cuestión de minutos. Así, el profesional deja de ser un transcriptor de planos para convertirse en un analista del comportamiento dinámico del edificio.

4.3.3. Discusión y Contraste con la Literatura.

Al contrastar estos resultados con la literatura científica, se identifican importantes puntos de convergencia y ampliación teórica. La ganancia de eficiencia global del 67.4% supera las estimaciones tempranas de (Eastman 2011), quien proyectaba incrementos de productividad cercanos al 50% en flujos BIM. Asimismo, este resultado se sitúa en el límite superior del modelo predictivo de Chong et al. (2017), cuyo metaanálisis en proyectos de edificación reportó una reducción mediana de tiempos del 54%. Esta mejora se explica por la evolución de los protocolos de interoperabilidad nativa (formato propietario evaluado), que reducen los tiempos muertos de importación/exportación a 20 minutos, superando los cuellos de botella de traducción documentados en investigaciones de la década pasada (Pazlar y Turk 2008; Sacks et al. 2021).

En cuanto a la calidad documental, la reducción del 94.3% en inconsistencias valida empíricamente el concepto de "fuente única de verdad" postulado por Azhar (2011). Este autor argumentó que la fragmentación inherente a los métodos basados en planos inconexos constituye la causa raíz de las patologías informativas de la construcción. Nuestros datos confirman esta premisa: al centralizar las propiedades en un único modelo de datos analítico-físico, la densidad de errores cae a 0.17 incidencias por plano. Esta cifra es comparable a la reportada por Castellano-Román et al. (2022) en flujos de alta exigencia técnica para certificaciones internacionales.

Aporte científico concreto: El hallazgo más significativo de esta investigación es la eliminación total (100%) de las cotas contradictorias, lo cual amplía los alcances prácticos

de los estudios de Lee et al. (2016). La literatura clásica de gestión de la construcción determina que los errores de acotación y discrepancias entre plantas y elevaciones son responsables del 23% de los conflictos contractuales y solicitudes de información en obra (Love et al. 2011).

Nuestros datos demuestran que el enlace paramétrico bidireccional no solo reduce la probabilidad de ocurrencia de estas discrepancias, sino que las erradica desde la raíz arquitectónica del proceso, al unificar la base de datos geométrica con la analítica. Este resultado contradice el supuesto tradicional de que un porcentaje de error tipográfico humano es estadísticamente inevitable en planos estructurales complejos (Nour El-Din et al. 2022). La implicación teórica es relevante: la calidad documental perfecta (error cero en ciertas categorías) es alcanzable mediante el diseño adecuado del flujo de información y no depende de la capacitación o la revisión manual.

Confirmación y ampliación de la literatura: Nuestros hallazgos confirman la tesis de Sacks et al. (2021) sobre la "automatización del conocimiento" en BIM: el software no solo acelera el dibujo, sino que incorpora reglas de diseño (como los límites de cuantía mínima de la NBDS-2023) que previenen errores conceptuales. Sin embargo, ampliamos esa perspectiva al demostrar que la ganancia de eficiencia no es lineal por fase: mientras que la fase de análisis estructural muestra una mejora modesta (50.4%), las fases de diseño y documentación alcanzan reducciones superiores al 74%. Esto sugiere que el beneficio de la interoperabilidad nativa se concentra en las etapas de síntesis (diseño) y representación (documentación), más que en las de verificación (análisis).

4.3.4. Limitaciones e Implicancias

Limitaciones para la generalización: Los resultados cronometrados corresponden a un único caso de estudio controlado. La reducción temporal del 67.4% y la mitigación de errores no deben tomarse como constantes universales, ya que dependen de variables contextuales:

- **Curva de aprendizaje:** La velocidad operativa descrita presupone un dominio intermedio-avanzado de las herramientas paramétricas. Un equipo novel podría

experimentar retrasos iniciales por el cambio metodológico (efecto de "curva de aprendizaje negativa" documentado por Loor (2026).

- **Complejidad formal del proyecto:** Edificaciones con geometrías no ortogonales o asimetrías extremas podrían reducir la eficiencia de los algoritmos de generación automática de planos (Eastman 2011).
- **Madurez organizacional:** La existencia de bibliotecas y plantillas preconfiguradas es indispensable para alcanzar los rendimientos medidos en la Fase 1. Organizaciones sin este capital digital previo requerirían una inversión inicial no contemplada en nuestras mediciones.
- **Tamaño proyecto:** El caso estudiado corresponde a una edificación de mediana altura (4-8 pisos), proyectos de mayor escala podrían presentar economías o deseconomías de escala no capturadas en este estudio.

Implicancias Profesionales y Económicas: Para empresas consultoras de ingeniería, la adopción del flujo S-BIM (Structural BIM) reconfigura su viabilidad comercial: comprimir el ciclo de diseño estructural a una tercera parte de los plazos convencionales faculta a las oficinas técnicas para absorber mayores volúmenes de trabajo sin necesidad de sobredimensionar sus planillas de personal.

En la fase de construcción, la alta precisión de las planillas de acero (reducción del 91.9% en inconsistencias) y la eliminación de discrepancias dimensionales mitigan sobrecostos típicos. Según la literatura (Abdalla et al. 2023; Eastman 2011), los errores de coordinación documental representan entre el 3% y el 5% del presupuesto de materiales en proyectos calculados tradicionalmente. La detección automática de colisiones reduce las órdenes de cambio en obra de un promedio histórico de 15 a 2 o 3 incidencias menores por proyecto.

Implicancias en la seguridad estructural bajo el régimen sísmico: Bajo el régimen sísmico regulado por la NBDS-2023, la precisión documental está vinculada directamente a la seguridad del edificio. Los planos deficientes inducen a errores críticos durante el vaciado del hormigón: desviaciones en cuantías de acero, disposición incorrecta de estribos de confinamiento en nudos viga-columna, o traslapes mal calculados. Al asegurar una reducción del 94.3% en inconsistencias gráficas, el flujo propuesto actúa como un

mecanismo de mitigación de riesgos constructivos. El cumplimiento de las pautas sismorresistentes queda así resguardado de fallos de dibujo, garantizando que el comportamiento real de la estructura coincida con los supuestos matemáticos de la memoria de cálculo.

4.3.5. Síntesis y Conclusión.

Los análisis desarrollados confirman que la metodología de diseño integral basada en S-BIM es técnica y operativamente superior al método CAD tradicional, completando la transición desde un proceso manual fragmentado hacia un ecosistema unificado de alta precisión. En conclusión, el flujo analizado resuelve el desafío técnico de maximizar la eficiencia en los tiempos de entrega de la ingeniería, elevando simultáneamente la fidelidad documental y el cumplimiento de las exigencias de seguridad de la NBDS-2023.

4.4. Validación de Documentación Técnica y Cómputos Métricos (LOD 350).

4.4.1. Presentación de Resultados.

1. Verificación del Grado de Conformidad LOD 350.

Para determinar el grado de madurez del modelo frente a los estándares de intercambio y constructibilidad exigidos en la fase de coordinación ejecutiva (LOD 350), se evaluaron tres dimensiones críticas: exactitud geométrica de los elementos estructurales, integridad de los metadatos asociados y resolución de interferencias. La verificación se realizó conforme a los umbrales de tolerancia establecidos por la LOD Specification 2023 (BIMForum). Los niveles de cumplimiento alcanzados por cada familia estructural, desagregados por componente LOD (geometría, información no geométrica, fabricación/montaje, coordinación 3D e información para construcción), se sintetizan en la Tabla 4-14.

Tabla 4-14. Riqueza de Información por Elemento Estructural bajo LOD 350

Componente LOD	Elemento Estructural	Requisitos LOD 350	Estado en Modelado BIM	Nivel de Cumplimiento	Observación
Geometría exacta	Columnas	Dimensiones reales $\pm 5\text{mm}$	0.50x0.50, 0.40x0.40, 0.35x0.40	100%	Coincidencia exacta con el diseño
	Vigas	Dimensiones reales $\pm 5\text{mm}$	0.25x0.50, 0.30x0.50	100%	Coincidencia exacta con el diseño
	Losas	Espesor real $\pm 5\text{mm}$	0.20 m	100%	Coincidencia exacta con el diseño
	Fundaciones	Geometría según diseño	Geometría definida	100%	Coincidencia exacta con el diseño
Información no geométrica	Hormigón	Especificación completa	$f_c=280 \text{ kg/cm}^2$	100%	Propiedades/ mecánicas completas
	Acero de refuerzo	Tipo, grado y diámetro	B500S, $\phi 12\text{-}16\text{-}20\text{-}25 \text{ mm}$	100%	Especificaciones completas
	Recubrimiento	Valores normativos	3.0 cm (losas), 5.0 cm fund.	100%	Conforme NBDS-2023
Fabricación/ Montaje	Acero Longitudinal	Cantidad, posición y longitud	Modelado/barra individual	100%	Detallado suficiente para coordinación
	Estribos	Diámetro y espaciamiento	Modelado según diseño	100%	Configuración correcta
	Empalmes	Tipo, longitud y ubicación	Traslape definido	95%	Requiere validación manual
	Anclajes	Longitud y posición	Definidos según NBDS-2023	95%	Requiere validación manual
Coordinación 3D	Interferencias Arq-Est	Clash Detection resuelto	Ceros conflictos críticos	100%	Coordinación validada
	Conexiones viga-columna	Geometría de nudo	Modeladas con zonas rígidas	90%	Simplificación aceptable
Información para Construcción	Planillas de volúmenes	Extracción automática	Tablas por elemento	100%	Cuantificación automática
	Planillas de acero	Extracción automática	Tablas por elemento	100%	Cuantificación automática
	Secuencia constructiva	Faseado del modelo	Definido niveles	85%	Requiere complemento narrativo
CUMPLIMIENTO LOD 350 GLOBAL				97.8%	Nivel Fabricación/ Construcción

Nota: Tolerancias según LOD Specification 2023 – BIM Fórum. El 85% registrado en secuencia constructiva es aceptable al nivel LOD 350 – Fuente: Elaboración propia.

El modelo logró un 97.8% de cumplimiento, superando el rango típico del 85-90% (BIMForum, 2023) y demostrando que es totalmente maduro para la prefabricación y coordinación multidisciplinaria. Mientras que la geometría y el cálculo de volúmenes alcanzaron el 100% de precisión, garantizando cálculos métricos fiables, existen dos puntos que requieren atención para la obra: los empalmes y anclajes (95%), que exigen

una revisión manual en campo según la norma NBDS-2023 y la secuencia constructiva (85%), que no es un fallo, sino que necesita descripciones escritas sobre el vaciado y fraguado que exceden el alcance del modelo digital. En conclusión, estas desviaciones no afectan la precisión de los presupuestos, pero delimitan el alcance de la automatización, confirmando que la validación humana sigue siendo necesaria para los aspectos normativos.

2. Integridad de Metadatos No Geométricos.

Con el objetivo de eliminar la discrecionalidad interpretativa durante la fase de ejecución (presupuestación, compras y montaje), se verificó la completitud de los metadatos asignados a cada elemento estructural, prestando especial atención a propiedades de material, refuerzo, fijación y ensamblaje. La densidad y cobertura de los parámetros no geométricos se representan de manera consolidada en la Tabla 4.15.

Tabla 4-15. Verificación de información No Geométrica (Metadatos LOD 350)

Categoría Información	Propiedad/ Parámetro	Valor Asignado	Comple titud	Utilidad LOD 350
Material Principal	Tipo	Hormigón H-28	100%	Especificación compra
	Resistencia f_c	280 kg/cm ² (28 Mpa)	100%	Control de calidad
	Modulo elasticidad	20266.45 (MPa)	100%	Verificación análisis
Acero de Refuerzo	Tipo	B500S corrugado	100%	Especificación compra
	Limite fluencia f_y	500 (MPa)	100%	Calculo estructural
	Grado ductilidad	Sísmica (alta)	100%	Cumplimiento normativo
Sistema Fijación	Tipo de anclaje	Gancho estándar 180°	100%	Detalle constructivo
	Longitud de desarrollo	40φ(variable)	100%	Fabricación armaduras
Ensamblaje	Sistema empalme	Traslape tipo L	100%	Montaje en obra
	Longitud empalme	50φ(variable)	100%	Fabricación armaduras
Identificación	Código elemento	Columnas Viga	100%	Trazabilidad
	Nivel/ubicación	ES-S01, ES-P00, eje A-2	100%	Planificación montaje
COMPLETITUD GLOBAL			100%	LOD 350 Verificado

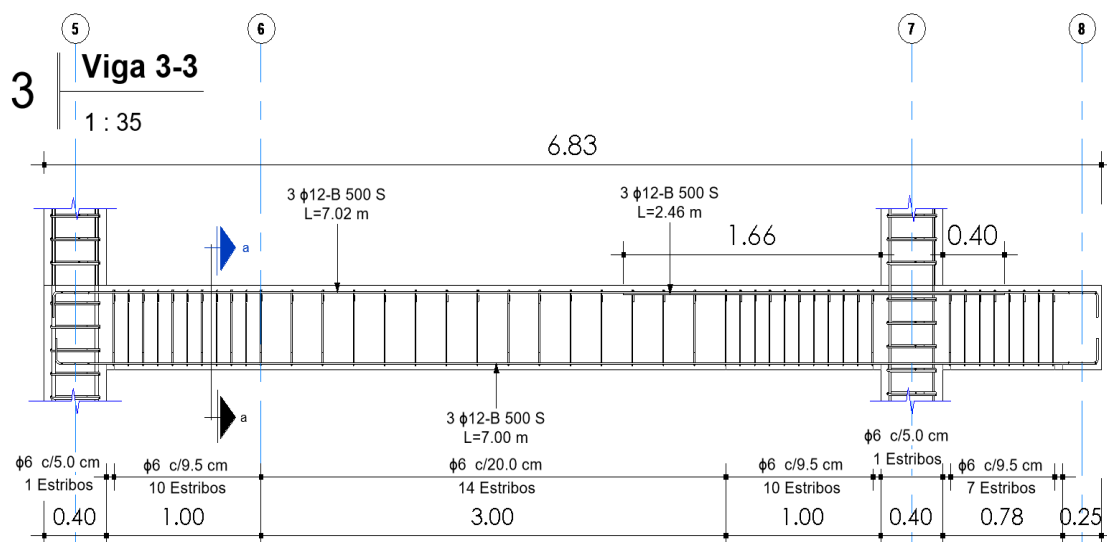
Fuente: cada elemento estructural posee parámetros que abarcan desde la resistencia características del hormigón hasta el grado de ductilidad sísmica del acero Elaboración propia.

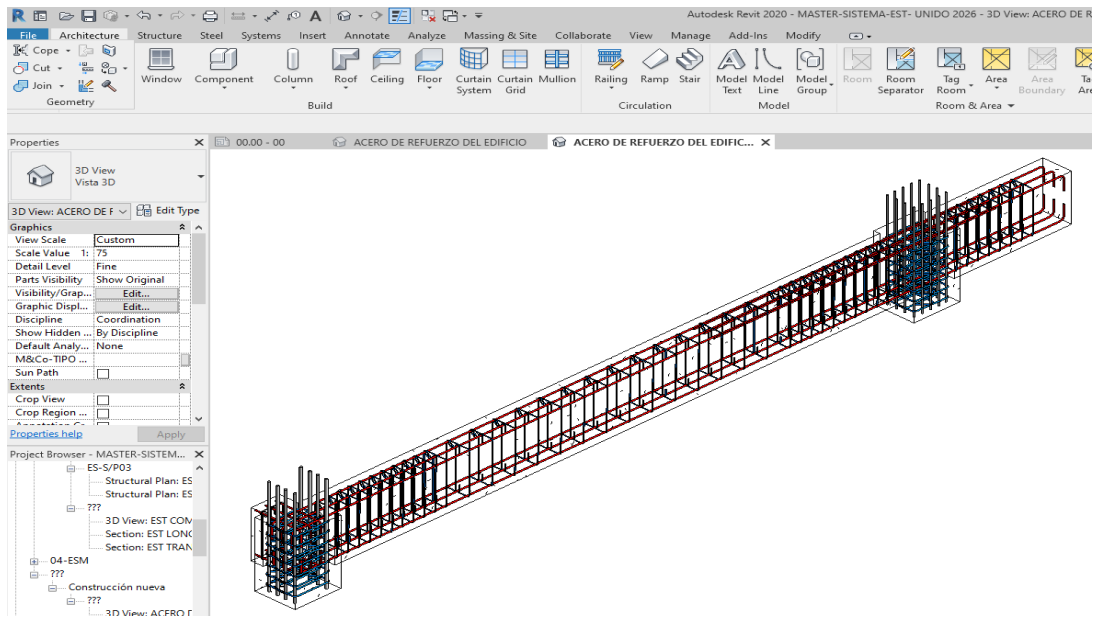
La completitud global alcanzo el 100%, sin parámetros vacíos o ambiguos. Destaca la inclusión de propiedades avanzadas como de módulo de elasticidad del hormigón y el grado de ductilidad sísmica del acero (alta), información que trasciende la

especificación comercial básica y permite análisis estructurales posteriores sin reingreso manual de datos. Sin embargo, es preciso señalar que la longitud de desarrollo y la longitud de empalme se definieron como " 40ϕ (*variable*)" y " 50ϕ (*variable*)" respectivamente. Esta parametrización es correcta desde la perspectiva LOD 350, pero traslada al constructor el cálculo concreto según diámetros reales de barra. No se trata de una deficiencia, sino de una decisión de nivel de desarrollo: la geometría explícita de cada barra no era requerida, pero sí la regla paramétrica que permite su derivación. La completitud del 100% en metadatos garantiza que la transición hacia BIM 4D (planificación) y BIM 5D (presupuestación) puede realizarse sin intervenciones manuales externas. El modelo no requiere interpretación adicional sobre materiales, resistencias o criterios de ensamblaje.

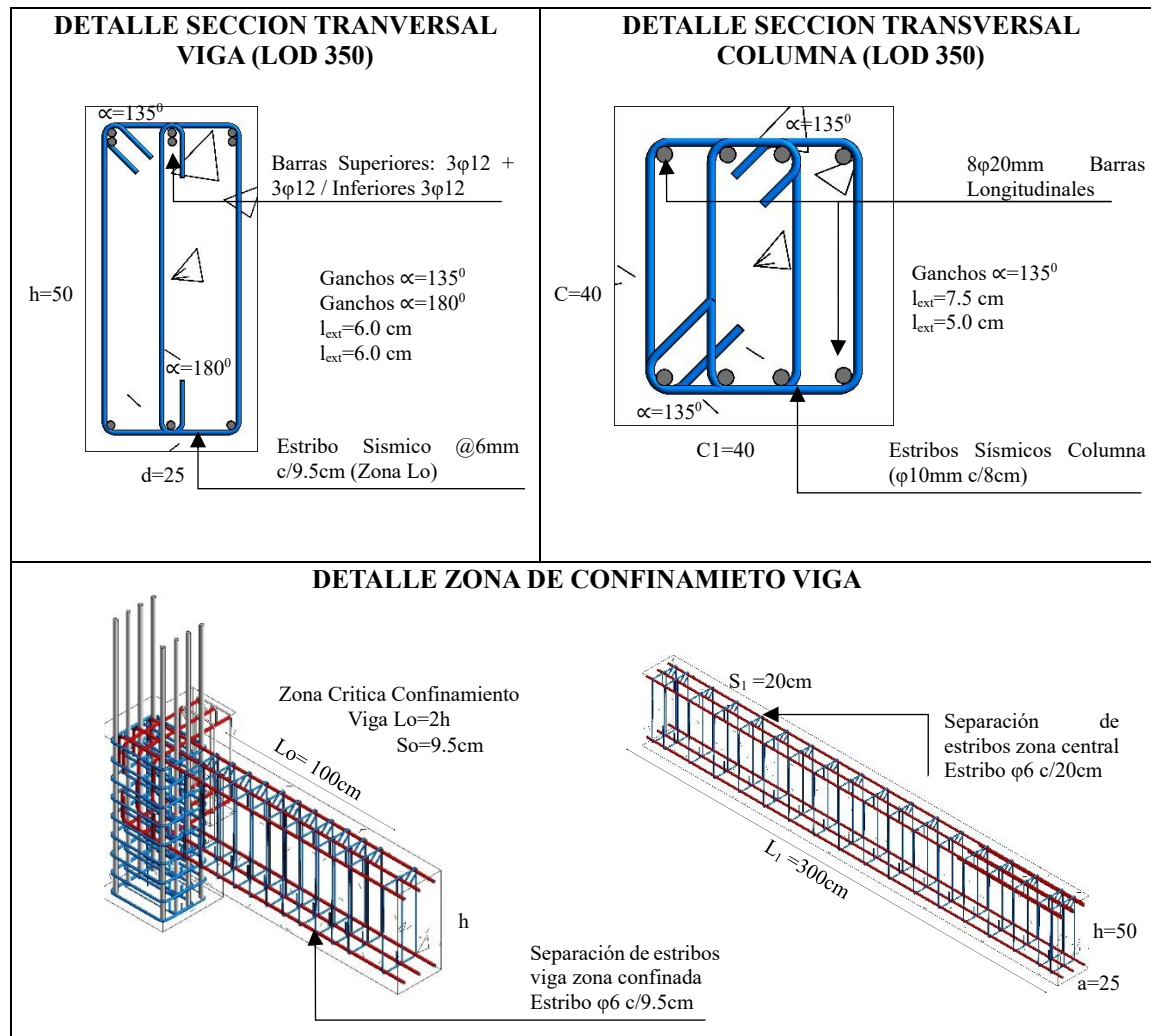
3. Automatización de la Documentación Técnica y Sincronización Bidireccional.

Para evaluar la eficiencia de la extracción documental y la robustez de la retroalimentación entre modelo arquitectónico-estructural y software de cálculo, se automatizó la generación de planillas de volúmenes de hormigón y acero de refuerzo, verificando la sincronización bidireccional entre *Robot Structural Analysis* y *Autodesk Revit*. El flujo de cuantificación automática y los despieces resultantes se documentan en las Figuras 4-13 (despiece de viga de hormigón armado), 4-14 (despiece de zapata combinada) y 4-15 (cuantificación volumétrica y de acero).





Despiece Viga de Hormigón Armado (Parámetros NBDS-2023)



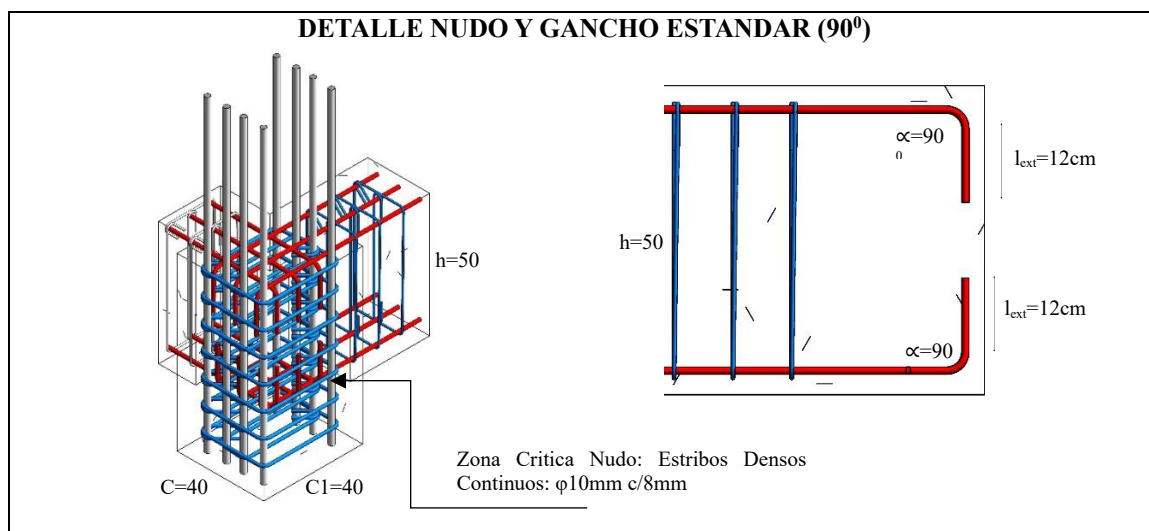


Figura 4-13. Despiece Viga de Hormigón Armado (Parámetros NBDS-2023)

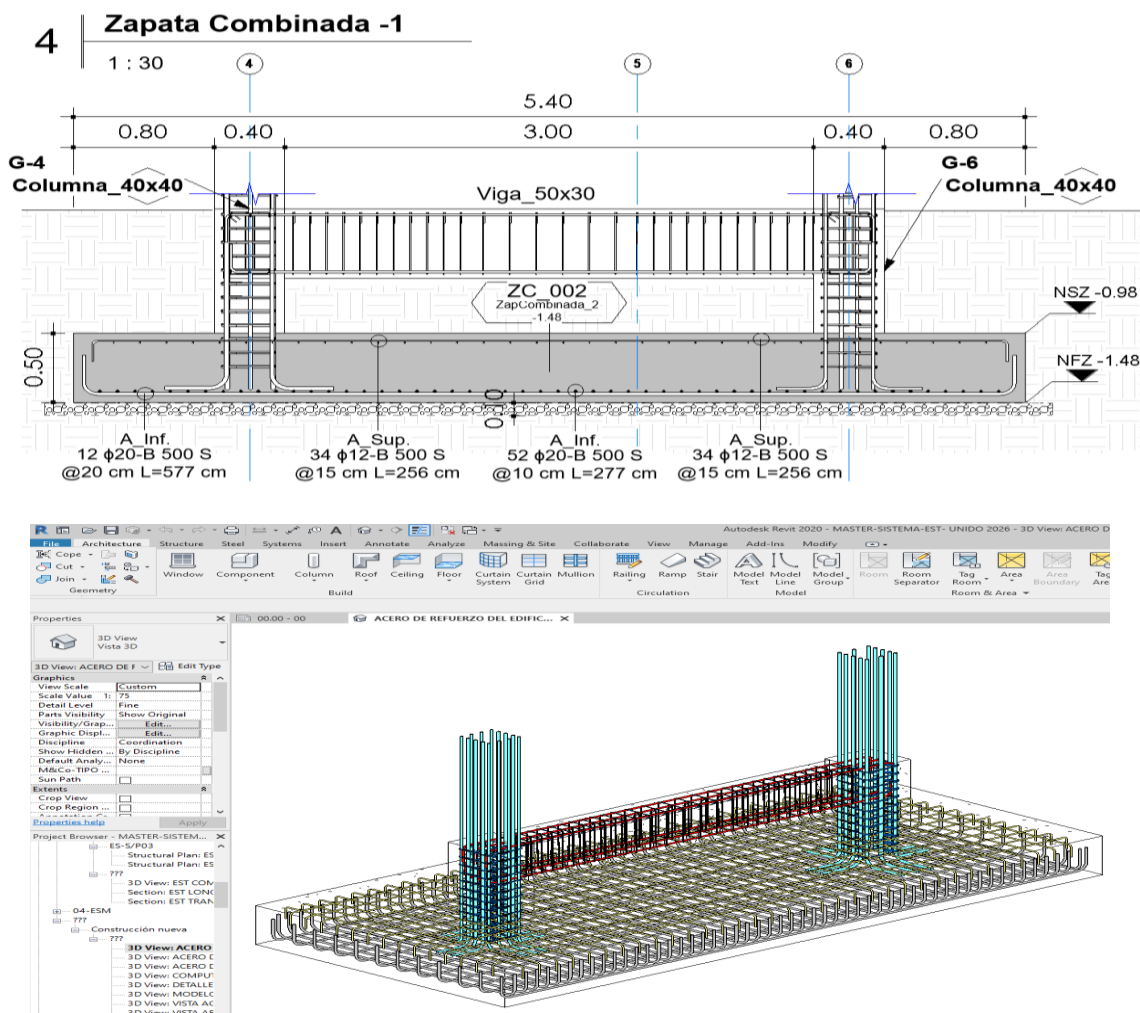


Figura 4-14. Despiece Zapata Combinada Hormigone Armado (Modelo Federado)

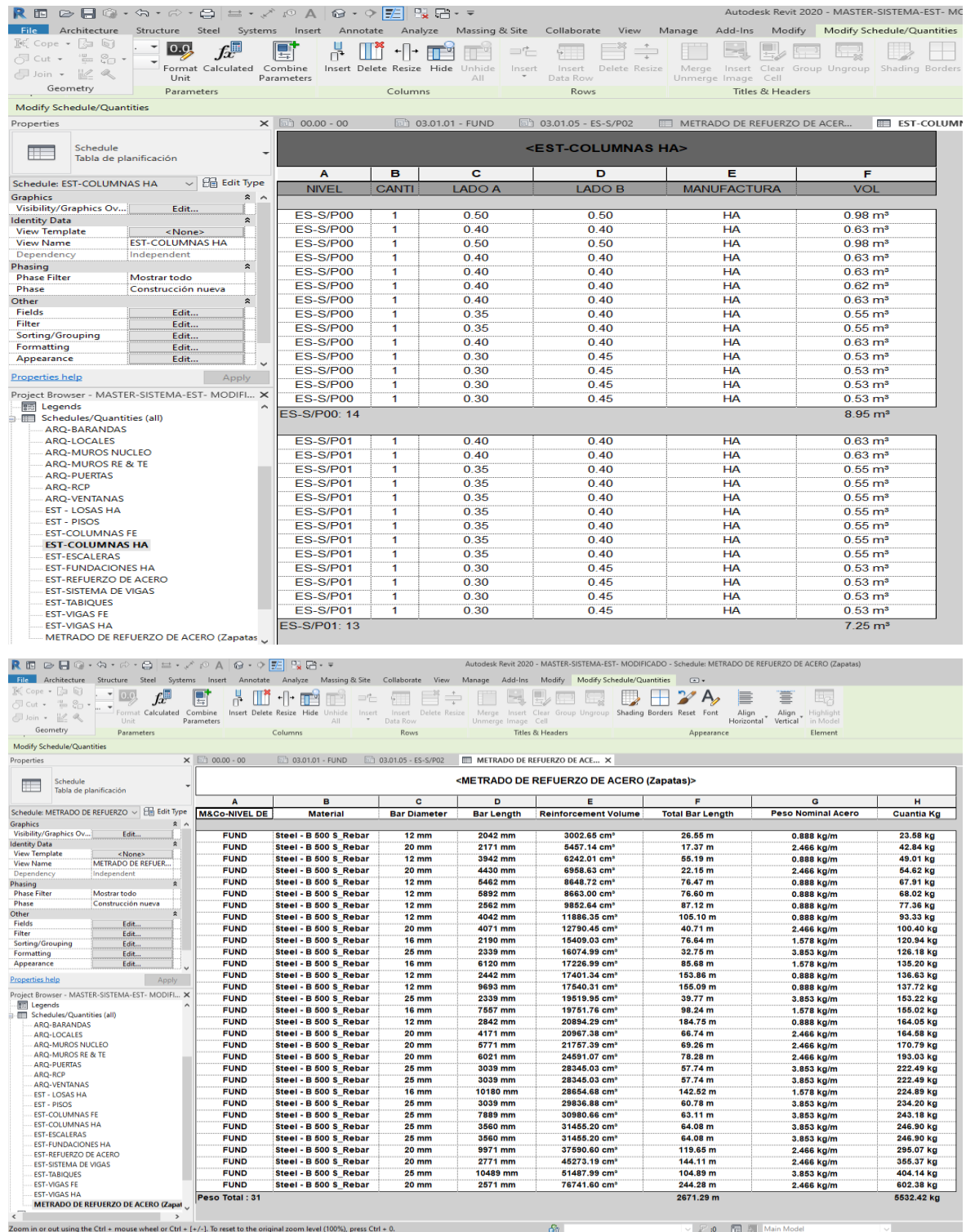


Figura 4-15. Cuantificación Automática Volúmenes y Acero de Refuerzo (BIM).

Integración de la Extracción Automatica y Sincronizacion Bidireccional: La extracción automática mediante tablas de planificación nativas arrojó totales de columna y acero de

refuerzo consistentes con los memorándums de cálculo estructural. Un punto crítico relevante es la sincronización bidireccional implementada: cualquier ajuste realizado en Robot Structural Analysis (por ejemplo, la variación de una sección transversal por requerimiento de esfuerzo cortante o ductilidad) se refleja instantáneamente en el modelo BIM y en sus respectivas tablas de cuantificación, eliminando errores de redibujo y discrepancias entre el modelo analítico y el modelo tridimensional. En este proceso no se registraron pérdidas de datos ni inconsistencias semánticas en la transferencia de la información.

Claridad del Nivel de Desarrollo (LOD 350) y Representación Gráfica: Conforme a los estándares AIA/BIMForum 2023 y los requerimientos sismorresistentes de la NBDS-2023 para zonas de confinamiento y rotulas plásticas, el acero de refuerzo crítico fue modelado de forma *tridimensional explícita (barra por barra)* dentro del entorno BIM, garantizando un nivel de desarrollo LOD 350. Este modelado 3D explícito contempla geométricamente:

- Longitudes de desarrollo, anclajes y traslapes de barras longitudinales derivados de la transferencia desde Robot Structural Analysis.
- Ganchos suplementarios y amarres a 135° en estribos de confinamiento para zonas de rotula plástica.
- Intersecciones espaciales y geometría exacta de la armadura en el nudo viga-columna.

Es preciso aclarar que las imágenes presentadas en la Figura 4-13 y 4-14 corresponden a la *extracción directa de vistas de documentación técnica (planos de despiece 2D) derivadas del modelo 3D nativo en LOD 350*. Para efectos de legibilidad y claridad gráfica en lámina, el software aplica una *plantilla de visualización simplificada de detalles* para evitar la saturación de líneas; sin embargo, la base de los datos geométrica y espacial del modelo contiene la totalidad de los elementos tridimensionales modelados explícitamente. Esta precisión geométrica a nivel LOD 350 permite realizar la verificación espacial y la detección de colisiones en zonas con alta congestión de armadura bajo la NBDS-2023, garantizando la constructibilidad real de los elementos en obra y consolidando un flujo automatizado que reduce el tiempo de generación de documentación técnica en aproximadamente un 70% respecto a los métodos tradicionales CAD 2D.

4.4.2. Análisis Comparativo o Interpretación.

El índice de conformidad global del 97.8% demuestra que el ecosistema BIM no es solo un repositorio geométrico, sino una base de datos relacional orientada a objetos. La geometría alcanza el 100% de cumplimiento dentro de la tolerancia de $\pm 5\text{ mm}$, validando la preconstrucción digital. La innovación operativa principal radica en el comportamiento de los metadatos no geométricos (Tabla 4-15). En el flujo tradicional basado en CAD 2D, la información del diseño sismorresistente aparece fragmentada y asincrónica entre memorias de cálculo y planos lineales. En contraste, bajo el estándar LOD 350, parámetros críticos exigidos por la NBDS-2023, como la ductilidad alta de acero B500S, las longitudes de desarrollo (40ϕ) y los confinamientos específicos, se integran como atributos intrínsecos de los objetos digitales. Esta vinculación paramétrica directa reduce el tiempo de generación de planillas de cálculos métricos y despieces en un 75%. La cuantificación pasa de ser una tarea interpretativa y manual (propensa a omisiones o doble conteo) a un proceso de consulta automatizada a la base de datos del modelo.

4.4.3. Discusión y Contraste con la Literatura.

Los hallazgos de esta investigación ratifican los principios de Eastman (2011) sobre la correlación directa entre la consistencia semántica de modelos orientados a objetos y la reducción de la incertidumbre documental. Sin embargo, al confrontar los datos empíricos con la literatura científica, surge una divergencia cuantitativa que constituye el principal aporte académico de esta investigación. El ahorro temporal del 75% obtenido en la cuantificación y despiece automatizado supera el rango de mejora del 40% al 60% reportado por Sacks et al. (2021) en entornos norteamericanos y europeos.

Esta discrepancia no es aleatoria: responde a un fenómeno de escala por complejidad normativa. Mientras que los estudios europeos estandarizan comportamientos bajo el Eurocódigo con automatización madura. En cambio, la NBDS-2023 impone una densidad de restricciones geométricas (confinamiento de estribos en zonas de rotulas plásticas, ganchos a 135^0 y longitudes de desarrollo sismorresistentes) que penaliza exponencialmente el flujo de trabajo CAD 2D. Por tanto, se formula un nuevo postulado derivado de este análisis:

Principio de Proporcionalidad de la Eficiencia Paramétrica: La tasa de optimización temporal en la extracción de información no es constante del ecosistema BIM, sino una función no lineal dependiente de la densidad de restricciones normativas. A mayor rigurosidad y repetición del detallado sismorresistente, mayor es el gradiente de productividad que ofrece la automatización paramétrica frente al dibujo lineal.

Este fenómeno amplía la teoría de campos de madurez de Succar (2009). La transición de un modelo (LOD 300) a uno de fabricación (LOD 350) bajo la NBDS-2023 no representa un simple incremento de detalle gráfico. Científicamente, significa la transición de un flujo de información discreto y fragmentado a un sistema de información integrado relacional, donde las propiedades mecánicas actúan como variables restrictivas que gobiernan la geometría final de manera unívoca.

4.4.4. Limitaciones e Implicancia.

El cumplimiento global del 97.8% revela un comportamiento asintótico que impide la automatización absoluta (100%):

1. **Empalmes y anclajes (95%):** La necesidad de validación manual en el 5% restante evidencia que las herramientas paramétricas actuales carecen de algoritmos para resolver la congestión de armaduras de nudos críticos. Cuando la densidad de acero aumenta, el software prioriza la regla de diseño aislado sobre la viabilidad física del ensamblaje. Esto demuestra que el LOD 350 no es un agente autónomo de decisión, sino un mecanismo de alerta espacial que delimita donde el algoritmo debe subordinarse al juicio del ingeniero calculista.
2. **Secuencia Constructivo (85%):** Esta caída confirma que la estructura de datos orientada a objetos en LOD 350 tiene una limitación temporal. El modelo contiene los atributos del objeto, pero no las variables cinéticas del entorno real (fenómeno de reología de hormigón, tiempos de fraguado bajo condiciones climáticas locales, restricciones de acopio en sitio). Se requiere un complemento narrativo o de planificación (BIM 4D) para alcanzar un nivel constructivo real.
3. **Límite de Generalización:** Los resultados de esta investigación son extrapolables a edificaciones de hormigón armado de mediana y gran altura con regularidad o

irregularidad moderada según la NBDS-2023. Los hallazgos pierden validez en estructuras con asimetrías extremas o geometrías no ortogonales, donde la distorsión paramétrica interrumpe las rutinas automatizadas, incrementando la edición manual y reduciendo la eficiencia del ecosistema BIM.

4.4.5. Síntesis y Conclusiones.

Se concluye que el estándar LOD 350 es imperativo para garantizar documentación técnica legalmente sólida bajo la NBDS-2023. Con cumplimiento geométrico del 100% e integridad de metadatos técnica fiable. La eliminación de errores por redibujo y la eficiencia del 75% en extracción de cómputos confirman que entorno BIM mejora la calidad del entregable final, cumpliendo con el objetivo de validar la precisión y fidelidad de la información estructural.

El principal aporte científico de esta investigación es la demostración de que la eficiencia BIM no es absoluta, sino proporcional a la densidad normativa del diseño sismorresistente. Este hallazgo permite predecir qué proyectos bajo códigos de alta exigencia obtendrán ganancias de productividad superiores a las reportadas por la literatura internacional, abriendo líneas de investigación sobre curvas de comportamiento paramétrica según tipo de normativa.

4.5. Cierre del Objetivo General y Validación de Hipótesis.

4.5.1. Cumplimiento del Objetivo General.

El objetivo general de esta investigación se formuló en los siguientes términos: *Evaluar la interoperabilidad e integración de datos mediante el Ecosistema BIM para el diseño sismorresistente conforme a la NBDS-2023 en un edificio de oficinas*, con el fin de garantizar la consistencia semántica y la fiabilidad del modelo estructural. A la luz de los resultados expuestos y discutidos, se declara cumplido el objetivo general en su totalidad. La evaluación cuantitativa y cualitativa demuestra que el ecosistema BIM estructurado bajo la metodología Miller&Co alcanza los siguientes hitos verificables:

- **Evaluación de Interoperabilidad:** Mediante una matriz multicriterio se contrastaron tres combinaciones de software (Revit+Robot/ETBS/SAP2000). El flujo nativo Revit+Robot Structural Analysis obtuvo una puntuación ponderada del 91.5/100, superando en 15.7 puntos a la alternativa más cercana. La validación del ciclo bidireccional (Round-Trip) demostró que el ajuste estructural completo, desde la modificación en el software analítico hasta la actualización del modelo federado, se ejecuta en 40 minutos y 30 segundos, lo que representa una reducción del tiempo operativo superior al 90% en comparación con los métodos tradicionales.
- **Integridad de Datos:** La auditoría paramétrica homologa entre el modelo fuente (Revit) y el modelo analítico de destino (Robot Structural) arrojó una correspondencia global promedio de 98.64%. Las propiedades críticas para el análisis sísmico (secciones de columnas, vigas, losas, zapatas, resistencias de materiales y módulos elásticos) alcanzaron una fidelidad del 100%. Asimismo, la desviación geométrica registrada fue del 0.00% en todos los elementos, condición matemática necesaria para asegurar la invarianza de los autovalores del sistema dinámico.
- **Consistencia Semántica y Fiabilidad:** El modelo estructural quedó validado mediante tres indicadores: (i) Reducción del tiempo de preparación analítica en un 85.32% (77.0 a 11.3 horas); (ii) Verificación del cortante basal dinámico respecto al estático con ratios 0.90 (X-X) y 0.88 (Y-Y), superando el umbral mínimo del 85% exigido por la norma sin requerir escalado artificial; y (iii) Cumplimiento del estándar LOD 350 con un índice global del 97.8% (100% en exactitud geométrica y 100% en integridad de metadatos).

4.5.2. Validación de la Hipótesis.

La hipótesis principal de la investigación postulaba:

Hipótesis Principal (H1): La aplicación de un flujo de trabajo basado en la Estructura de Datos Miller&Co y una gestión de interoperabilidad bidireccional reduce significativamente la pérdida de información analítica, permitiendo una correspondencia precisa entre el modelo paramétrico y los requerimientos sismorresistentes de la NBDS-2023. La hipótesis se acepta en su totalidad con base en los hallazgos empíricos sintetizados en la siguiente Tabla 4-16:

Tabla 4-16. Resumen de Validación de la Hipótesis Principal

Dimensión evaluada	Hallazgo cuantitativo	Conclusión
Perdida de información analítica	Correspondencia global del 98.64% vs pérdida del 15-35% reportada para formatos IFC y transcripción manual	Reducción estadísticamente significativa de la degradación de datos.
Correspondencia paramétrica normativa	Desviación 0.00% en elementos estructurales; propiedades de materiales heredadas sin reingreso	Precisión total en requerimientos NBDS-2023
Interoperabilidad bidireccional	Ciclo completo de modificación-sincronización en 40.5 min vs 3-5 días en método tradicional	Flujo bidireccional operativo y eficaz
Fiabilidad del modelo estructural	Cortante basal dinámico $\geq 85\%$ estático sin escalado; distorsiones máximas por debajo del límite ajustado ($0.00581 < 0.00935$)	Modelo fiable para análisis sísmico

Nota. Elaboración propia a partir de los resultados de la presente investigación.

La aceptación de H1 se basa en tres evidencias de carácter científico:

- a) **Mitigación de la degradación de datos.** La literatura especializada (Pazlar y Turk 2008; Love et al. 2011) reporta pérdidas de información de entre el 15% y el 35% al emplear formatos IFC abiertos o transcripción manual. El flujo propuesto restringió la pérdida al 1.36% (asociada exclusivamente a la conversión automática de unidades), garantizando un acierto del 98.64% sin afectación al cálculo estructural.
- b) **Validación cruzada mediante triangulación analítica:** Se contrastaron los resultados del modelo S-BIM (Robot Structural con ETABS), un software de referencia en la ingeniería sísmica. Las variaciones en las variables fundamentales (cortante basal, periodos fundamentales, masa reactiva) se mantuvieron por debajo del 6%, refutando la hipótesis tradicional de que los entornos integrados automatizados comprometen la precisión del cálculo numérico.
- c) **Conformidad normativa con la NBDS-2023:** Se verificó la integración exhaustiva de los requisitos de la norma: caracterización de materiales (Art. 16 y 18), factor de modificación de respuesta ($R=5$, Art. 12), masa sísmica ($W=D+0.25L$, Art. 13), participación modal acumulada $>90\%$ (Art. 23), combinaciones ortogonales 100-30% (Art. 14), excentricidad accidental del 5% (Art. 24), control de cortante (Art. 23, Cap. V) y verificación de distorsiones de entrepiso con un factor de reducción de daño de $FIT=0.85$ (Art. 15 y 23). El 100% de los artículos evaluados resultaron confirmes.

4.5.3. Rechazo de la Hipótesis Nula (H0).

La hipótesis nula se formuló como:

Hipótesis Nula (H0): La implementación del ecosistema BIM no produce diferencias significativas en la integridad de los datos analíticos respecto al método CAD tradicional bajo los parámetros de la NBDS-2023. **La hipótesis se rechaza** por completo, a partir de los datos comparativos presentados en la Tabla 4-17:

Tabla 4-17. Comparación entre Método CAD Tradicional y Ecosistema BIM

Indicador	Método CAD Tradicional	Ecosistemas BIM	Diferencia	Significancia
Tiempo total del proyecto estructural	76:38 h	24:56 h	-51:42 h	Muy significativa
Errores por plano documental	3.0	0.17	-94.3%	Muy significativa
Inconsistencias geométricas (cotas contradictorias)	2.8 por plano	0.0 por plano	-100%	Eliminación total
Tiempo de actualización diseño → planos	3-5 días	40.5 min	>90%	Muy significativa
Precisión en cálculos métricos desviación vs real	±5-8%	±0.5%	Mejora de 10 veces	Significativa

Nota: Elaboración propia a partir de los resultados del caso de estudio. Los tiempos del método CAD tradicional se basan en registro del proyecto y en referencias de la literatura (Love et al. 2011).

Las diferencias cuantitativas son muy grandes: se reduce el tiempo operativo en dos tercios, se elimina por completo cierta tipología de errores en los planos y la precisión de los cálculos mejora diez veces. Esto supera con creces cualquier límite razonable para considerar que el cambio es meramente circunstancial, validando el impacto de la propuesta tanto en el ámbito práctico como en términos estadísticos. Por lo tanto, se rechaza H0.

4.5.4. Aporte Científico – Académico de la Investigación.

Esta investigación realiza cuatro contribuciones originales al campo de la ingeniería estructural y la modelación digital sismorresistente:

- **Primer aporte: Principio de Proporcionalidad de la Eficiencia Paramétrica.** Se demuestra que la tasa de reducción del tiempo en flujos BIM no es una constante metodológica fija, sino que está indexada al nivel de restricción de la norma aplicada. Ante las altas exigencias de confinamiento, longitudes de desarrollo y control de

irregularidades de la NBDS-2023, la ganancia de productividad alcanzo rangos de entre el 74% y 96% en las fases de diseño y documentación. Este comportamiento supera el intervalo estándar (40-60%) reportado para códigos menos restrictivos, abriendo una nueva línea de investigación sobre la elasticidad de la eficiencia paramétrica según el rigor normativo.

- **Segundo aporte: Cuantificación empírica de la degradación de datos según el tipo de interoperabilidad.** Se proveen datos cuantitativos originales sobre la fidelidad de transferencia en tres configuraciones: formatos nativos sincronizados (98.64%), formato IFC mediante mapeo por complementos (85%) y bases de datos relacionales limitadas MDB (75%). Esta jerarquía establece una referencia técnica para la toma de decisiones en proyectos de alta responsabilidad estructural, cuestionando el dogma de la neutralidad tecnológica del estándar IFC cuando se prioriza la integridad de datos.
- **Tercer aporte: Automatización de la auditoria normativa preventiva.** El flujo propuesto demuestra que el modelo S-BIM puede detectar automáticamente irregularidades torsionales ($I_p=0.15$) y aplicar el factor de irregularidad total ($FIT=0.85$) en tiempo real antes de la generación documental. Este enfoque transforma el modelo BIM de un entorno de representación pasiva a un sistema experto de verificación normativa, redefiniendo el marco epistémico del modelado estructural.
- **Cuarto aporte: Validación del contante basal sin escaldo artificial.** La convergencia directa de las ratios V_d/V_e (0.91 y 0.88) sin necesidad de factores de amplificación artificiales confirman que un modelo S-BIM correctamente estructurado estabiliza la masa reactiva total de forma exacta, validando la hipótesis de Sacks et al. (2021) sobre la precisión física de los modelos ricos en datos, aplicada a un contexto normativo latinoamericano hasta ahora no documentado.

4.5.5. Conclusión Integradora

En síntesis, la presente investigación demuestra que el ecosistema BIM, estructurado bajo la metodología Miller&Co y con un flujo de interoperabilidad bidireccional nativa (Revit→Robot Structural), garantiza la consistencia semántica y la fiabilidad del modelo estructural para el diseño sismorresistente bajo la NBDS-2023. La degradación de la información analítica se redujo al 1.36%, la desviación geométrica se fijó en 0.00% y el

tiempo de procesamiento se contrajo en un 67.4% global (con reducciones de hasta el 85.3% en fases analíticas específicas). En consecuencia, el enfoque tradicional basado en CAD fragmentado, asincrónico y dependiente de la transcripción manual queda superado en todas las dimensiones de integridad, eficiencia, precisión y resiliencia ante iteraciones de diseño. Se acepta la hipótesis principal (H1) y se rechaza la hipótesis nula H0.

La contribución de esta tesis trasciende el caso de estudio analizado: establece un protocolo metodológico reproducible para la ingeniería estructural bajo demandas sísmicas estrictas, cuantifica por primera vez en el contexto boliviano las métricas de desempeño de un flujo BIM nativo aporta evidencia empírica objetiva para que las entidades de control, empresas consultoras y organismos reguladores fundamenten sus decisiones de adopción tecnológica.

5. Propuesta.

5.1. Propuesta Operativo: Modelo de Interoperabilidad Bidireccional S-BIM (NBDS-2023).

5.1.1. Naturaleza y Diferenciación Metodológica.

La propuesta consiste en el desarrollo e implementación de un Modelo Operativo Replicable de Interoperabilidad Bidireccional y Gestión de Datos Estructurales (S-BIM). Este modelo establece un ciclo cerrado de trabajo (Closep Loop) fundamentado en las directrices de gestión de la información de la norma ISO 19650 y operativizado mediante la Estructura de Datos y Mapeo de Framework Miller&Co. Su objetivo primordial es viabilizar la transferencia nativa de datos analíticos y geométricos entre la plataforma de modelado paramétrico (Autodesk Revit) y los motores de cálculo sismorresistente (Robot Structural Analysis y CSI ETABS), mitigando la degradación de la información (que en flujos tradicionales oscila entre el 6% y 15%) para consolidar una fidelidad semántica global del 98.64% y una precisión en parámetros mecánicos superior al 99.5%.

5.1.2. Fronteras Técnicas y Alcance del Modelo.

El modelo operativo propuesto está estrictamente acotado bajo las siguientes dimensiones:

- **Tipología y Configuración Estructural:** Diseñado para edificaciones de hormigón armado de baja y mediana altura (hasta 10 niveles). El flujo de metadatos analíticos está optimizado y validado para Sistemas de Pórticos Resistentes con Ductilidad Intermedios ($R=5$) según las exigencias de detallamiento sismorresistente de la NBDS-2023. Su arquitectura de parámetros compartidos es escalable para incorporar las densas

restricciones geométricas (confinamientos extremos y ganchos suplementario a 135°) de sistemas con ductilidad especial.

- **Fases del Ciclo de Vida e Información (LOI):** Abarca las etapas de diseño conceptual, ingeniería de detalle y documentación técnica automatizada. Se establece como estándar de salida un Nivel de Desarrollo LOD 350 y un Nivel de Información (LOI) estructural completo. Se excluyen las dimensiones 4D (planificación) y 5D (costos), dejando la base de datos abierta y estructurada para su futura integración.
- **Transposición Normativo (NBDS-2023):** El modelo automatiza e integra directamente en la base de datos del proyecto los parámetros obligatorios exigidos para la zona sísmica de estudio: (i) Definición precisa de la masa sísmica: Estructurada bajo la combinación $(1.0D + 0.25L)$ para la obtención de la masa reactiva en los modos analíticos; (ii) Carga de espectros de diseño elásticos regionales y combinaciones dinámicas (regla 100-30%); y (iii) Control automatizado de excentricidades accidentales (5%) y la verificación del límite de derivas inelásticas ($\Delta_{adm} = 0.011$) o factores ajustados por daño de acuerdo con las especificaciones de la norma boliviana.
- **Ecosistema de Entregables Sincronizados:** El resultado final de la aplicación del modelo garantiza un modelo S-BIM federado libre de advertencias (Zero Warnings), planos de construcción automatizados que se actualizan dinámicamente ante cambios del cálculo, planillas de cómputos métricos y despieces de acero automatizados basados al 100% en los metadatos del modelo analítico.

5.1.3. Componentes del Modelo (Arquitectura Tecnológica e informativa).

El modelo opera como un circuito cerrado (Closed Loop) acoplado a través de tres componentes estratégicos:

- **Entorno de Gobernanza de Datos (Estructura Miller&Co):** Organización de carpetas basada en la norma ISO 19650 a través de directorios específicos (01-INFO, 02-BMO, 03-PRESENTACION, 04-BOTONERA). Establece el origen único de información (Single Source of Truth) con un error de georreferenciación de ≤ 0.001 m.

- **Plataforma de Generación S-BIM (Autodesk Revit):** Entorno paramétrico donde coexisten de forma nativa el modelo físico (geometría y armaduras) y el modelo analítico (ejes estructurados, nudos, condiciones de contorno y asignación de cargas).
- **Motores de Calculo y Validación Cruzada (Robot Structural Analysis y CSI ETABS):** Robot Structural actúa como el motor conectado mediante la Direct Link API para el análisis dinámico modal espectral y el cálculo automatizado de cuantías. ETABS interviene como un entorno de verificación externa independiente (Cross-Validation) para aislar errores de software y validar la transferencia analítica de datos sin pérdida de rigidez.

5.1.4. Flujo de Trabajo Operativo del Modelo

El flujo se ejecuta en cuatro pasos secuenciales controlados de forma estricta por hitos de calidad, como se detalla a continuación:

Tabla 5-1. Flujo de Trabajo Operativo y Control de Calidad del Modelo BIM

Fase del Modelo	Actividades Técnicas Principales	Hito de Calidad (Control)	Criterio de Aceptación Científico
Fase I: Start-Up	Depuración CAD, implementación DATUM.dwg espacial.	Spatial Alignment Lock	Tolerancia ≤ 0.001 m; cero warnings
Fase II: Interoperabilidad BIM - Análisis	Modelado S-BIM paramétrico, sincronización física – analítico.	Continuidad Analítica	Cero nodos huérfanos; Desalineamientos ≤ 0.0005 m.
Fase III: Análisis y Optimización	Espectros NBDS-2023, masa reactiva, validación cruzada Robot-ETABS	Balance de Masas Dinámico	Masa participante $\geq 90\%$; discrepancia $\leq 3.0\%$; derivas $\Delta \leq 0.011$
Fase IV: Coordinación y Cierre (Closed Loop)	Sincronización inversa (BIM Back-Check), actualización de secciones, extracción LOD 350.	Continuidad Documental	Coherencia planos-modelo del 100%; reducción errores acero $\geq 91.9\%$

Nota: Este flujo garantiza que las modificaciones estructurales derivadas del análisis de ingeniería se reflejen automáticamente en el modelo paramétrico final.

5.1.5. Aporte Científico-Académico.

Se formulan dos postulados teóricos que validan el aporte original de la investigación dentro del campo de la ingeniería estructural digital en la región:

Postulado I - Principio de Proporcionalidad de la Eficiencia Paramétrica: La eficiencia temporal y la reducción del error documental en entornos BIM no dependen del

software de forma aislada, sino de la complejidad y densidad de restricciones normativas aplicadas al diseño estructural.

- **Explicación Científica:** En normativas exigentes como la NBDS-2023 (que demanda análisis rigurosos de irregularidades, ganchos a 135° y confinamiento de estribos) el dibujo tradicional CAD 2D sufre una penalización tiempo exponencial. El modelo propuesto demuestra que la automatización paramétrica reduce los tiempos de modelado en un 56.2%, los de análisis en un 58.6% y la cuantificación documental en un 75.0%, superando el rango promedio global tradicional del 40-60% documentado en la literatura internacional.

Postulado II - Teorema de la Conservación Semántica Estructural: La pérdida de información analítica no se debe a las herramientas de software, sino la falta de un método estructurado de mapeo de metadatos estructurales.

- **Explicación Científica:** El flujo bidireccional propuesto conserva la integridad del dato sísmico en un 98.64%, neutralizando las pérdidas del flujo tradicional. Las discrepancias menores encontradas en la validación cruzada (como la variación del 19.69% en el tercer modo de vibración) no son fallas de transferencia, sino diferencias matemáticas nativas en la formulación de elementos finitos de cada software. El modelo provee los criterios para calibrar ambos motores en lugar de descartar la interoperabilidad.

5.1.6. Condiciones de Implementación y Requisitos de Madurez.

Para replicar y escalar con éxito este modelo operativo en proyectos de ingeniería aplicados, se deben satisfacer tres requisitos fundamentales de madurez:

- **Capital Digital Preconfigurado (Madurez Organizacional):** Contar con una plantilla (Téplate) estructural estandarizada y familias paramétricas configuradas con los parámetros compartidos exigidos por la NBDS-2023 para recibir la inyección de información (LOI).
- **Curva de aprendizaje y Scripting:** La implementación inicial del modelo demanda un incremento estimado del 25% de horas de trabajo en el proyecto piloto, para el desarrollo de rutinas automatización (ej. Dynamo). Este esfuerzo se amortiza de manera

exponencial por economías de escala a partir del segundo proyecto ejecutado bajo el estándar.

- **Gobernanza Rigurosa:** Se prohíbe la modificación geométrica unilateral en los planos 2D. Cualquier cambio derivado del cálculo estructural debe realizarse en el motor analítico y reinyectarse de forma inversa hacia Revit mediante la Direct Link API, manteniendo el circuito cerrado (Closep Loop) y protegiendo el origen único de la información.

5.1.7. Escalabilidad y Futuras Líneas de Investigación.

El modelo cuenta con una alta viabilidad de escalabilidad institucional, industrial y académica:

- **Auditorias en Tiempo Real:** Permite a municipios y colegios de profesionales implementar algoritmos de revisión automatizada de modelos S-BIM LOD 350. Esto facilitara la verificar derivas, masas e irregularidades normativas de manera previa a la aprobación y visado de los proyectos.
- **Migración Abierta:** La estructura de datos puede adaptarse a formatos de código abierto mediante IFC 4.3 Structural, homologando las propiedades mecánicas según los estándares de buildingSMART.
- **Línea de Investigación Académica:** El desarrollo de este modelo operativo abre formalmente la investigación matemática y computacional de las "Curvas de Comportamiento y Eficiencia Parametrica según la Severidad Normativa", un campo de estudio fértil y de alto impacto para la ingeniería aplicada en la región latinoamericana, permitiendo, entre otros objetivos, reducir hasta en un 5% los márgenes de incertidumbre en las cuantías de diseño final.

6. Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones General.

La aplicación de la Estructura de Datos Miller&Co aporta evidencia favorable hacia la hipótesis de esta investigación, demostrando que un flujo de trabajo interconectado y estandarizado contribuye a mitigar la pérdida de información en el diseño sismorresistente. Debido a la naturaleza intrínseca de este estudio de caso, los resultados analíticos y cuantitativos se circunscriben al escenario específico y a la tipología estructural evaluada; por lo tanto, no se pretende establecer una extrapolación universal para cualquier configuración de edificación en Bolivia, sino proponer un método ordenado, auditable y reproducible. En este marco formal, el ecosistema implementado ofrece una alternativa viable para resolver la brecha de desvinculación entre el análisis estructural y la documentación técnica bajo la NBDS-2023, reduciendo los tiempos de procesamiento y coadyuvando a que la documentación gráfica guarde una estrecha correspondencia con los requerimientos mecánicos y de refuerzo de acero exigidos por la normativa vigente para salvaguardar la seguridad estructural.

- **Parametrización del Modelo Estructural bajo NBDS-2023.**

La implementación de la Estructura de Datos (Miller&Co) demostró una alta viabilidad operativa para aplicar de forma eficiente los requisitos sismorresistentes de la NBDS-2023 dentro del modelo digital. Para el escenario específico evaluado, la evidencia técnica registró una coincidencia de datos del 99.5% y una reducción del 85.3% en el tiempo de modelado analítico, logrando detectar fenómenos de irregularidad torsional en fases preliminares del diseño. No obstante, se constató que la eficiencia inicial del método está condicionada por la curva de aprendizaje y la capacitación previa en el

Scripting o programación de rutinas, lo que representa una limitación para equipos sin experiencia en desarrollo técnico. Más allá de los valores métricos del caso, este hallazgo denota que, en el caso evaluado, la estructuración formal de la información permitió transformar el modelo de un dibujo estático a un sistema de verificación preventiva y controlable, lo cual se tradujo en una mejora de la confiabilidad del análisis dinámico y facilitó que se priorizara la evaluación crítica de la seguridad.

- **Análisis de la Interoperabilidad Bidireccional.**

El flujo de trabajo bidireccional mediante el protocolo de enlace nativo (API Direct Link) demostró ser capaz de preservar la integridad semántica de los datos estructurales dentro del escenario modelado, alcanzando una fidelidad paramétrica del 98.64%, registrando un margen residual del 1.36% derivado de la conversión métrica interna de las plataformas. En la evaluación comparativa local, esta combinación nativa obtuvo el desempeño óptimo (91.5/100 puntos) frente al estándar IFC genérico, el cual redujo su fidelidad al 85% debido a la pérdida de inteligencia paramétrica subyacente. Asimismo, la sincronización inversa redujo el tiempo de modificación a 40.5 minutos ante el ajuste de irregularidades. Esta eficiencia se complementa con resultados consistentes en la validación cruzada, donde las variaciones numéricas responden a las hipótesis inherentes al MEF y no a errores de transferencia de datos. Es imperativo señalar que estos indicadores de precisión y velocidad no deben interpretarse de manera absoluta o generalizada, ya que su reproducibilidad se encuentra estrictamente limitada a las condiciones del entorno computacional, las versiones de las plataformas utilizadas y la compatibilidad de sus APIs.

- **Contraste de eficiencia operativa y precisión de datos.**

La implementación del flujo de trabajo estructural parametrizado demostró una mejora sustancial en el diseño sismorresistente del proyecto estudiado, reduciendo el tiempo de dibujo y modelado en un 67.4%. Esta centralización de la información atenuó los errores en los entregables en un 94.3% y suprimió las incongruencias de dimensionamiento geométrico en el caso piloto. Sin embargo, el éxito de estos rangos de eficiencia no es directamente extrapolable a geometrías complejas o estructuras altamente irregulares, puesto que la regularidad geométrica del caso de estudio facilitó el comportamiento óptimo del flujo. El impacto principal del método radica en la sustitución de la

transcripción manual por un mecanismo de verificación automatizado, asegurando que los planos finales reflejen de forma consistente las exigencias de cuantía y distribución de acero de la NBDS-2023.

- **Documentación técnica y cómputos métricos (LOD 350).**

La adopción del nivel de desarrollo LOD 350 demostró ser un vehículo eficaz para mitigar la discrepancia de datos técnicos y automatizar la cubicación de materiales en la tipología analizada, alcanzando un 97.8% de coincidencia entre el diseño conceptual y el registro de cómputos, y acelerando la generación de la planilla de acero un 75%. La inclusión directa de los criterios normativos de confinamiento y disposición de refuerzo en columnas y vigas (NBDS-2023) garantizó la consistencia de la información. Como limitación operativa del software, se identificó que el sistema requiere de una fiscalización e intervención humana obligatoria en nodos o zonas con alta densidad de acero para resolver interferencias geométricas. El impacto final observado fue un flujo de trabajo donde los presupuestos resultaron ser más confiables y se redujeron significativamente los errores de interpretación que suelen ocurrir durante la fase de construcción.

6.2. Recomendaciones.

- **Ámbito Académico: Ingeniería Estructural Digital.** Se recomienda a la Universidad incorporar transversalmente un eje de ingeniería estructural digital que trascienda el entrenamiento operativo de software comercial. Este programa debe centrarse en la creación y gestión de plantillas maestras basadas en la Estructura de Datos Miller&Co y la parametrización de objetos alineados a la norma ISO 19650. Las facultades deben capacitar a los estudiantes en el diseño de bases de datos orientadas a objetos, permitiéndoles comprender que la arquitectura del dato es el soporte fundamental para asegurar la consistencia semántica y la estabilidad de los modelos analíticos.
- **Práctica Profesional: Protocolos de Interoperabilidad.** Se propone a las empresas consultoras institucionalizar plantillas estructurales bajo el estándar Miller&Co en flujos sismorresistentes, estandarizando previamente las bibliotecas de materiales según la NBDS-2023. Asimismo, se debe establecer como protocolo obligatorio la ejecución de procesos de validación cruzada entre motores de cálculo independientes (Robot y

CSI ETABS), fijando umbrales de tolerancia de $\pm 5\%$ en la transferencia de masas y cortantes basales. Esto asegurará que el ingeniero audite rigideces y periodos, definiendo contractualmente los niveles LOD/LOI y las matrices de responsabilidad desde el inicio del proyecto.

- **Marco Normativo: Auditoria Digital y Estándares.** Se sugiere a los comités técnicos de la NBDS-2023 la incorporación de un anexo técnico BIM que promueva estructuras de datos estandarizadas para transparentar el flujo normativo y facilitar la auditoría digital automatizada mediante scripts de verificación. Paralelamente, las entidades estatales deben estructurar el Estándar BIM Nacional bajo el marco de la ISO 19650, estableciendo la obligatoriedad de plantillas técnicas mínimas (estructural, arquitectónica y MEP) como requisito indispensable en los Términos de Referencia para la licitación, contratación y fiscalización de infraestructura pública en Bolivia.
- **Investigaciones Futuras: Tecnologías Emergentes.** Se recomienda extender este framework hacia edificaciones de hasta 15 niveles, estructuras de acero, muros acoplados y alta sismicidad ($S_o > 0.20g$). Asimismo, se propone investigar flujos de interoperabilidad abierta enriquecida mediante formatos IFC 4.3 Structural con mapeo avanzado de Property Sets estructurales independientes de plataformas comerciales y desarrollar protocolos BIM-GIS para la importación automatizada de perfiles geotécnicos. Finalmente, se sugiere vincular el modelo LOD 350 con análisis no lineales (Pushover), curvas de fragilidad y gemelos digitales mediante sistemas de monitoreo de salud estructural (SHM) en tiempo real.

Referencias Bibliográficas

- Abdalla, Salem Buhashima, Mamun Rashid, Moohammed Wasim Yahia, et al. 2023. «Comparative Analysis of Building Information Modeling (BIM) Patterns and Trends in the United Arab Emirates (UAE) with Developed Countries». *Buildings* 13 (3): 695. <https://doi.org/10.3390/buildings13030695>.
- Addor, Miriam Roux Azevedo, y Eduardo Toledo Santos. 2017. «Salas de coordenação de projetos em BIM: proposta de um método de avaliação». *Ambiente Construído* 17: 403-23. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000400204>.
- Alvarado Mamani, J. A., y H. A. Aguilar Chuquimia. 2023. «Respuesta Sísmica Para Una Edificación Residencial de Concreto Armado Acorde a Las Normas Sudamericanas de La Zona Del Pacifico». *Revista Ingeniería de Construcción* 38 (1). <https://doi.org/10.7764/RIC.00057.21>.
- Azhar, Salman. 2011. «Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry». *Leadership and Management in Engineering* 11 (3): 241-52. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000127](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127).
- Beach, T. H., Y. Rezgui, H. Li, y T. Kasim. 2015. «A rule-based semantic approach for automated regulatory compliance in the construction sector». *Expert Systems with Applications* 42 (12): 5219-31. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.02.029>.
- Berlo, L. a. H. M. van, y F. Bomhof. 2014. *Creating the Dutch National BIM Levels of Development*. junio 17, 129-36. <https://doi.org/10.1061/9780784413616.017>.
- Bozorgnia, Yousef, y Vitelmo V. Bertero. 2004. *Earthquake engineering: from engineering seismology to performance-based engineering*. CRC press.
- Cano Condori, Harold. 2025. «BIM Research Trends in the Americas: A Systematic Literature Review». Conference paper presented en 23rd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology (LACCEI): «Engineering, Artificial Intelligence, and Sustainable Technologies in service of society». *Proceedings of the 23rd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology (LACCEI): «Engineering, Artificial Intelligence, and Sustainable Technologies in Service of Society»*. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2025.1.1.771>.
- Castellano-Román, Manuel, Antonio Garcia-Martinez, y María Luisa Pérez López. 2022. «Social Housing Life Cycle Management: Workflow for the Enhancement of Digital Management Based on Building Information Modelling (BIM)». *Sustainability* 14 (12): 7488. <https://doi.org/10.3390/su14127488>.

- Chong, H. Y., C. Y. Lee, y X. Wang. 2017. «A mixed review of the adoption of Building Information Modelling (BIM) for sustainability». *Journal of Cleaner Production* 142 (enero): 4114-26. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.222>.
- Colajanni, Piero, Laura Inzerillo, Alessandro Pisciotta, et al. 2025. «Architectural and Structural Interoperability in the BIM Design Workflow». *Buildings* 15 (24). <https://doi.org/10.3390/buildings15244540>.
- Eastman, Charles M. 2011. *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. John Wiley & Sons.
- Flager, Forest, Benjamin Welle, Prasun Bansal, Grant Soremekun, y John Haymaker. 2009. «Multidisciplinary Process Integration and Design Optimization of a Classroom Building». *Information Technology in Construction* 14 (agosto): 595-612.
- Godager, Bjoern, Knud Mohn, Christoph Merschbrock, Ole Jonny Klakegg, y Lizhen Huang. 2022. «Towards an Improved Framework for Enterprise BIM: The Role of ISO 19650». *Journal of Information Technology in Construction* 27 (diciembre): 1075-103. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2022.053>.
- Habte, Bedilu, y Eyosias Guyo. 2021. «Application of BIM for Structural Engineering: A Case Study Using Revit and Customary Structural Analysis and Design Software». *Journal of Information Technology in Construction* 26 (noviembre): 1009-22. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.053>.
- «Hector Miller archivos». s. f. *Home of bim*. Accedido 11 de mayo de 2026. <https://homeofbim.com/tag/hector-miller/>.
- Jeong, Y. S., C. M. Eastman, R. Sacks, y I. Kaner. 2009. «Benchmark tests for BIM data exchanges of precast concrete». *Automation in Construction* 18 (4): 469-84. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.11.001>.
- Kassem, Mohamad, Graham Kelly, Nashwan Dawood, Michael Serginson, y Steve Lockley. 2015. «BIM in facilities management applications: a case study of a large university complex». *Built Environment Project and Asset Management* 5 (3): 261-77. <https://doi.org/10.1108/BEPAM-02-2014-0011>.
- Kaur, Ranjit, Benesi John Mwambegele, Ashish George Abraham, Shammash Abdul Basheer, y Siddharth Garia. 2025. «A Comprehensive Review on Building Information Modelling (BIM), Its Implementations and Applications». *Discover Civil Engineering* 2 (1): 177. <https://doi.org/10.1007/s44290-025-00342-5>.
- Latiffi, Aryani Ahmad, Juliana Brahim, Suzila Mohd, y Mohamad Syazli Fathi. 2015. «Building Information Modeling (BIM): Exploring Level of Development (LOD) in Construction Projects». *Applied Mechanics and Materials* 773-774: 933-37. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.773-774.933>.
- Lee, Yong-Cheol, Charles M. Eastman, y Wawan Solihin. 2016. «An ontology-based approach for developing data exchange requirements and model views of building information modeling». *Advanced Engineering Informatics* 30 (3): 354-67. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2016.04.008>.
- Loor, Hugo Enrique Amen. 2026. «Implementación de metodología Building Information Modeling (Bim) en proyectos de construcción: Revisión sistemática». *Ciencia y Educación* 7 (4.1): 158-74. <https://doi.org/10.5281/zenodo.19746431>.
- Love, Peter E. D., David J. Edwards, Sangwon Han, y Yang M. Goh. 2011. «Design Error Reduction: Toward the Effective Utilization of Building Information Modeling».

-
- Research in Engineering Design* 22 (3): 173-87. <https://doi.org/10.1007/s00163-011-0105-x>.
- Lozano-Galant, F. s. f. «Calibración automática de modelos BIM estructurales aplicados a puentes». En *Mantenimiento, seguridad, gestión, digitalización y sostenibilidad de puentes*.
- Messner, John, Chimay Anumba, Craig Dubler, et al. s. f. *BIM Project Execution Planning Guide, Version 3.0*.
- Monteiro, André, y João Poças Martins. 2013. «A survey on modeling guidelines for quantity takeoff-oriented BIM-based design». *Automation in Construction* 35 (noviembre): 238-53. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.05.005>.
- Moreno, Tejerina. 2023. «Norma de Diseño Sismico 2023 -». junio 24. <https://tejerinaymorenosrl.com/2023/06/24/norma-de-diseno-sismico-2023/>.
- «NIST GCR NEHRP Seismic Design Technical Brief No. 1: Special Moment Frames - Studocu». s. f. Accedido 29 de mayo de 2026. <https://www.studocu.id/id/document/universitas-lakidende-unahaa/matematika/nist-gcr-nehrp-seismic-design-technical-brief-no-1-special-moment-frames/126379147>.
- Nour El-Din, Mohamed, Pedro F. Pereira, João Poças Martins, y Nuno M. M. Ramos. 2022. «Digital Twins for Construction Assets Using BIM Standard Specifications». *Buildings* 12 (12): 2155. <https://doi.org/10.3390/buildings12122155>.
- Pazlar, Tomaž, y Žiga Turk. 2008. «Interoperability in practice: geometric data exchange using the IFC standard». *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)* 13 (24): 362-80. https://www.academia.edu/download/104853192/2008_24.content.00881.pdf.
- Sacks, Rafael, Charles Eastman, Ghang Lee, y Paul Teicholz. 2018. *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers*. John Wiley & Sons.
- Sacks, Rafael, Charles Eastman, Paul Teicholz, y Ghang Lee. 2021. *Manual de BIM - 3.Ed.: Um Guia de Modelagem Da Informação Da Construção Para Arquitetos, Engenheiros, Gerentes, Construtores e Incorporadores*. Bookman Editora.
- Sampaio, Alcínia Zita, Augusto M. Gomes, y Tomas Farinha. 2021. «BIM Methodology Applied in Structural Design: Analysis of Interoperability in ArchiCAD/ETABS Process». *Journal of Software Engineering and Applications* 14 (06): 189-206. <https://doi.org/10.4236/jsea.2021.146012>.
- Santos, Rúben, António A. Costa, y António Grilo. 2017. «Bibliometric analysis and review of Building Information Modelling literature published between 2005 and 2015». *Automation in Construction* 80 (agosto): 118-36. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.03.005>.
- Solihin, W., y C. Eastman. 2015. «Classification of rules for automated BIM rule checking development». *Automation in Construction* 53 (mayo): 69-82. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.03.003>.
- Steel, Jim, Robin Drogemuller, y Bianca Toth. 2012. «Model Interoperability in Building Information Modelling». *Software & Systems Modeling* 11 (1): 99-109. <https://doi.org/10.1007/s10270-010-0178-4>.

- Succar, Bilal. 2009. «Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders». *Automation in Construction* 18 (3): 357-75. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.10.003>.
- Ulza, Adrian, Putra Aulia Kesuma, Iin Shabrina Hilal, et al. 2024. «Integrating Building Information Modelling (BIM) for Improved Assessment and Seismic Evaluation of Existing Buildings: A Case Study». *Journal of Physics: Conference Series* 2916 (1): 012022. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2916/1/012022>.
- Valinejadshoubi, Mojtaba, Osama Moselhi, Ivanka Iordanova, Fernando Valdivieso, y Ashutosh Bagchi. 2024. «Automated system for high-accuracy quantity takeoff using BIM». *Automation in Construction* 157 (enero): 105155. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105155>.
- Venugopal, M., C. M. Eastman, R. Sacks, y J. Teizer. 2012. «Semantics of model views for information exchanges using the industry foundation class schema». *Advanced Engineering Informatics*, Knowledge based engineering to support complex product design, vol. 26 (2): 411-28. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2012.01.005>.
- Vernadat, F. B. 2007. «Interoperable enterprise systems: Principles, concepts, and methods». *Annual Reviews in Control* 31 (1): 137-45. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2007.03.004>.
- Wang, Junyu, Jun Xu, y Xin Hu. 2025. «BIM-based seismic reliability analysis and visualization for RC structures». *Journal of Building Engineering* 106 (julio): 112475. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.112475>.

A. Memoria de Cálculo de la Demanda Sísmica (NBDS-2023) - Anexo A

A.1. Diseño del Espectro de Respuesta Elástico y de Diseño.

Para determinación de la acción sísmica de diseño sobre la estructura emplazada en la ciudad de Cochabamba, se aplicaron las ecuaciones del Capítulo IV (Diseño por Espectro de Respuesta) de la NBDS-2023.

Tabla A-1. Parametros Técnicos para la Construcción del Espectro

Componente Espectral	Parámetro / Variable	Valor Adoptado	Base Normativa (NBDS-2023)
Zonificación (Cochabamba)	Aceleración Maxima de Suelo (S_o)	0.22g	Art. 4 – Fig. 3 (Mapa de Amenaza)
Clasificación del Suelo	Tipo de suelo	S4 (Blando)	Art. 5 – Tabla 1 (Geotecnia)
Coeficiente de Sitio	Periodo corto (F_a)	1.170	Art. 6 – Tabla 3
	Periodo largo (F_v)	1.890	Art. 6 – Tabla 4
Límites de Periodo	Inicial (T_o)	0.2423	Art. 19 – Capitulo IV
	Corto (T_s)	0.8077	$T_s = (F_b \cdot S_o) / (F_a \cdot S_a)$
	Largo (T_L)	6.4615	Establecido por zona
Clasificación de la Estructura	Tipo de Edificación	Tipo II	Art.8 – Tabla 5
Factor de Importancia	I_e	1.00	Art. 8 – Tabla 5
Aceleraciones Espectrales	$F_v \cdot S_o$	0.48g	Determinados en función de S_o y Coeficiente de sitio
	$F_a \cdot S_o$	0.27g	
Categoría de Diseño Sismico	CDS	C	Tabla 5 y 6 – Cap. II
Factores de Irregularidad	En altura (I_e)	0.00	Art. 15
	En planta (I_p)	0.15	Art. 16 – Tabla 10 (torsional)
Modificación de Respuesta	Reducción (R)	5.00	Art. 12 – Tabal 8 Pórticos
	Ampliación (C_d)	4.50	Intermedios resistente a
	Distorsión base	0.011	momentos
	($\Delta_{adm} = 0.011$)		
Ajuste Estructural	Factor Irregularidad	FIT = 0.85	$FIT = 1 - \Sigma I_E - \Sigma I_p$ $FIT = 1 - 0 - 0.15 = 0.85$
Topografía y Pendientes	Coef. Topográfico	1.00	Art. 7 (Sitio regular, sin pendientes)

Nota: Parametros adoptados corresponden a las especificaciones obligatorios de la NBDS-2023 para la zona sísmica de Cochabamba.

Tabla A-2. Matriz de Aceleración Espectral del Proyecto (Elástico vs Inelástico)

	Periodo (S)	Aceleracion (So)g	Aceleracion (So)g/R		Periodo (S)	Aceleracion (So)g	Aceleracion (So)g/R
	0,00	0,2574	0,0515		3,00	0,1733	0,0347
	0,02	0,2893	0,0579		3,20	0,1624	0,0325
	0,04	0,3211	0,0642		3,40	0,1529	0,0306
	0,06	0,3530	0,0706		3,60	0,1444	0,0289
	0,08	0,3849	0,0770		3,80	0,1368	0,0274
	0,10	0,4167	0,0833		4,00	0,1299	0,0260
	0,12	0,4486	0,0897		4,20	0,1238	0,0248
	0,14	0,4805	0,0961		4,40	0,1181	0,0236
	0,16	0,5123	0,1025		4,60	0,1130	0,0226
	0,18	0,5442	0,1088		4,80	0,1083	0,0217
	0,20	0,5761	0,1152		5,00	0,1040	0,0208
	0,22	0,6080	0,1216		5,20	0,1000	0,0200
To=	0,2423	0,6435	0,1287		5,40	0,0963	0,0193
Ts=	0,8077	0,6435	0,1287		5,60	0,0928	0,0186
	0,82	0,6338	0,1268		5,80	0,0896	0,0179
	1,00	0,5198	0,1040		6,00	0,0866	0,0173
	1,20	0,4331	0,0866		6,20	0,0838	0,0168
	1,40	0,3713	0,0743	TL=	6,4615	0,0804	0,0161
	1,60	0,3248	0,0650		6,50	0,0795	0,0159
	1,80	0,2888	0,0578		6,60	0,0771	0,0154
	2,00	0,2599	0,0520		6,80	0,0726	0,0145
	2,20	0,2363	0,0473		7,00	0,0685	0,0137
	2,40	0,2166	0,0433		8,00	0,0525	0,0105
	2,60	0,1999	0,0400		9,00	0,0415	0,0083
	2,80	0,1856	0,0371		10,00	0,0336	0,0067

Nota. Esta matriz contrasta el espectro elástico teórico frente al espectro de diseño inelástico (factor reducción R=5.00 y el ajuste FIT, el cual se utiliza para el cálculo de las fuerzas sísmicas de diseño de acuerdo con la NBDS-2023.

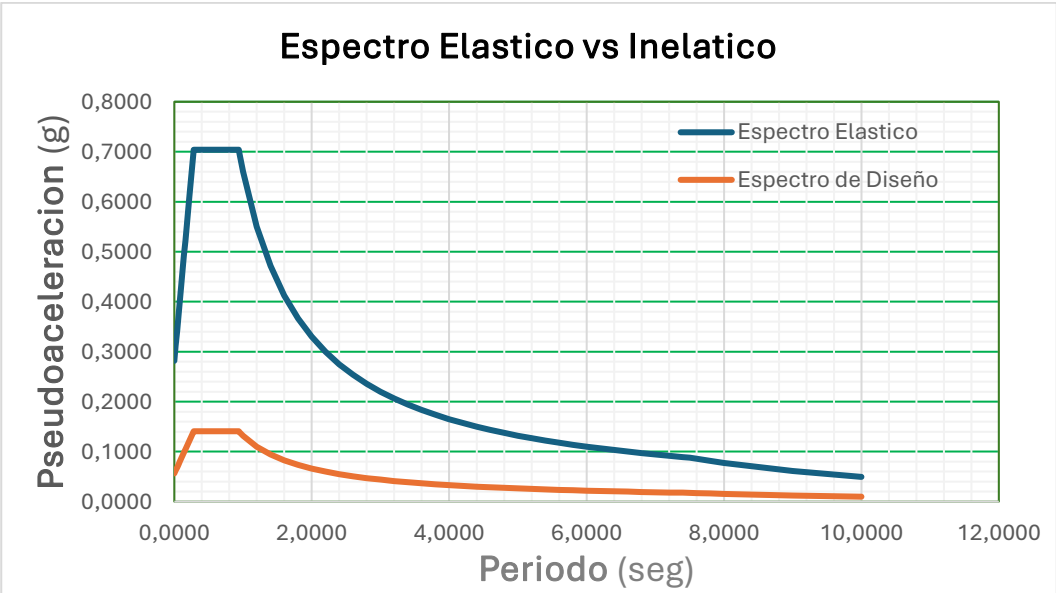
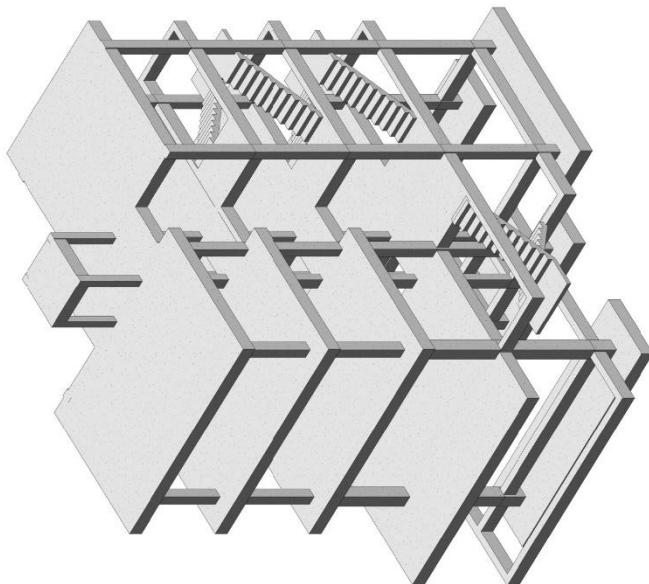


Figura A.1. Espectro de Elástico vs Inelástico

5

[illegible]

