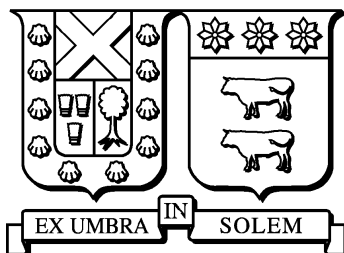


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES
SANTIAGO – CHILE



“PROPUESTA METODOLÓGICA PARA ESTIMAR
LOS BENEFICIOS ECONÓMICOS ASOCIADOS A
LA COORDINACIÓN TECNOLÓGICA BIM EN
CODELCO”

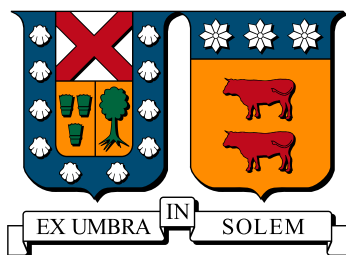
PASCUAL SOTO URIBE

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL DE MINAS

PROFESOR GUÍA: CARLOS HUNT

OCTUBRE 2020

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES
SANTIAGO – CHILE



**“PROPUESTA METODOLÓGICA PARA
ESTIMAR LOS BENEFICIOS ECONÓMICOS
ASOCIADOS A LA COORDINACIÓN
TECNOLÓGICA BIM EN CODELCO”**

PASCUAL SOTO URIBE

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL DE MINAS**

PROFESOR GUÍA: CARLOS HUNT

OCTUBRE 2020

Agradecimientos

A mi familia, por su apoyo incondicional.

A los Andes centrales.

Resumen

Abstract

Índice de Contenidos

Agradecimientos	III
Resumen	IV
Abstract	V
Índice de Contenidos	VI
Lista de Tablas	IX
Lista de Figuras	X
Glosario	XI
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes Generales	1
1.1.1. La Metodología BIM	1
1.1.2. La Construcción en el Sector Minero	3
1.1.3. BIM en CODELCO	4
1.2. Motivación	5
1.3. Objetivos	6
1.3.1. Objetivo General	6

1.3.2. Objetivos Secundarios	6
1.4. Alcances del Estudio	6
1.5. Metodología de Trabajo	7
1.6. Estructura de la Memoria	8
2. Definición del Problema	9
2.1. Contexto	9
2.1.1. Problema	10
3. Marco Teórico	11
3.1. La metodología BIM	11
3.1.1. Dimensiones BIM	12
3.1.2. Niveles de información BIM	13
3.1.3. Madurez BIM	17
3.1.4. BIM en Chile	19
3.1.5. Ventajas de la metodología BIM	19
4. Propuesta	22
4.1. Métrica propuesta	22
4.2. Selección y generación de datos	24
4.2.1. Criterio de selección de la fuente de la información	25
4.2.2. Input	25
4.2.3. Transformación	26
4.2.4. Output	27
4.2.5. Herramienta de selección y generación de base de datos	28
4.2.6. Evaluación de madurez BIM de los proyectos	28
4.3. Aplicación de la métrica propuesta	29

4.4. Teoría detrás del modelo propuesto	29
4.5. Modelo propuesto	33
4.5.1. Estimación del modelo según la muestra	34
4.5.2. Análisis de Resultados	36
Conclusiones	38
Referencias	41

Índice de tablas

1.1. Impacto en los costos de acuerdo a las etapas de un proyecto EPCM según CODELCO.	4
3.1. Niveles de madurez BIM de acuerdo a lo planteado por la Vicepresidencia de Proyectos, CODELCO.	18
4.1. Palabras clave para la selección de cada ítem asociado al BIM.	26
4.2. Desviaciones en costo de los proyectos estudiados.	27
4.3. Nivel de madurez BIM de cada proyecto según <i>rating</i> evaluado por especialista.	28
4.4. Base final que muestra el crecimiento de los costos junto a su respectivo indicador madurez (métrica propuesta).	29
4.5. Estadísticas asociadas al coeficiente de madurez BIM θ_1	35
4.6. Estadísticas asociadas al coeficiente de madurez BIM $\hat{\theta}_1 = 0,1083$	40

Índice de figuras

3.1. Ejemplo de nivel de definición.	14
3.2. Ejemplo de nivel de desarrollo.	16
4.1. Diagrama de generación de la data final.	24
4.2. Predicción de la desviación en costos en base a la muestra total.	35

Glosario

- Interferencias** : problemas que ocurren entre los planos de distintas especialidades, generando conflictos presentados entre los distintos objetos 3D que conforman la modelación.
- SDI** : solicitud de información.
- Otro** : something.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes Generales

1.1.1. La Metodología BIM

BIM es el acrónimo de *Bulding Information Modeling*, que traducido al español quiere decir Modelado de Información de la Construcción, el cual hace referencia al proceso de generación y gestión de datos de una construcción durante su ciclo de vida utilizando algún *software* dinámico de modelado en tres dimensiones y en tiempo real para disminuir la pérdida de tiempo y recursos en el diseño de la construcción. Este proceso produce el modelo de información de la construcción (al que se le conoce como modelo BIM), que abarca tanto la geometría de la construcción, las relaciones espaciales y la información geográfica, así como también las cantidades, las propiedades y atributos de cada uno de los componentes integrados en el modelo.

En otras palabras, el BIM representa un espacio virtual compartido de lo que será construido y su entorno, el que, además, está asociado a las herramientas (*software*), métodos (procedimientos de operación) y análisis (estructural, chequeo de interferencias, construcción, etc.) relacionados con dicho modelo (Saldías, 2010).

En esta línea, y para el propósito de esta Memoria, la definición de BIM que mejor se ajusta al trabajo realizado es la que propone el National Building Information Model Standard Project Committee (2019), que postula al BIM como una representación digital de las características físicas y funcionales de un proyecto. Así, el BIM es un fuente compartida de conocimiento e información sobre dicho proyecto, constituyendo una base confiable para la toma de decisiones durante el ciclo de vida de este.

Una premisa básica del BIM es la colaboración entre los actores involucrados durante las diferentes fases del ciclo de vida del proyecto, ya sea para insertar, extraer, actualizar o modificar algún tipo de información en el modelo BIM para apoyar los roles de cada actor.

Así, los requerimientos para que el modelo BIM sea intercambiable están basados en: una representación digital compartida, que la información contenida en el modelo sea interoperable (es decir, que permita intercambios entre distintos computadores), que los intercambios estén basados en estándares abiertos y comunes a la industria, y que los requerimientos de los intercambios puedan ser definidos en lenguaje contractual.

En términos prácticos, el BIM puede interpretarse de manera diferente dependiendo de la perspectiva de cada actor:

- Aplicado a un proyecto, el BIM representa la gestión de la información. Es decir, los datos contribuidos y compartidos por todos los participantes del proyecto. La información correcta para la persona correcta en el tiempo correcto.
- Para los participantes del proyecto, el BIM representa un proceso interoperable para la entrega del proyecto. Es decir, define el trabajo de los equipos y cuántos equipos deben trabajar en conjunto para concevir, diseñar, construir y operar el proyecto.
- Para el equipo de diseño, el BIM representa un diseño integrado. Es decir, hace uso de soluciones tecnológicas, incentivando la creatividad, entregando *feedback* y empoderando a los equipos.

1.1.2. La Construcción en el Sector Minero

Según lo establecido por la Comisión Chile del Cobre (COCHILCO) en su informe de inversión en la minería chilena, que considera aquellos proyectos con puesta en marcha dentro del período 2018 – 2027, existen 44 iniciativas avaluadas en unos US\$ 65.747 millones (Comisión Chilena del Cobre, 2018).

Estas 44 iniciativas se pueden dividir en dos grupos: aquellas con una mayor probabilidad de materializarse dentro de los plazos presupuestados, y aquellas cuya probabilidad de materializarse es menor.

Dentro del primer grupo se encuentran las iniciativas en condición base y probable, que suman un total de US\$ 36.257 millones con 25 proyectos, los cuales corresponden a un 55,1 % del total de la cartera.

En el segundo grupo se encuentran aquellos proyectos en condición posible, potencial y los más propensos a verse afectados por cambios en las condiciones de mercado. Corresponden a 19 iniciativas valoradas en US\$ 29.490 millones, que equivalen al 44,9 % del total de la cartera.

Si se adopta una postura pesimista y sólo se consideran los proyectos del primer grupo, se puede hacer un análisis separado de aquellas iniciativas en condición base y probable. Así, las iniciativas en condición base cuentan con 14 proyectos, cuya inversión asciende a los US\$ 21.931 millones, siendo la Corporación Nacional del Cobre (CODELCO) la compañía más relevante con un 68,8 % de la inversión para esta condición. Por otro lado, existen 14 iniciativas en condición probable avaluadas en US\$ 14.326 millones, donde la gran minería privada es la de mayor relevancia con un 91 % del total de la inversión para esta condición.

Para estudiar los montos asociados exclusivamente a la etapa de construcción, se toman en cuenta los porcentajes de impacto en los costos de un contrato EPCM establecidos por CODELCO para cada una de las etapas de dicho contrato (Corporación Nacional del Cobre, s/f). De esta manera, al asociar los porcentajes a los proyectos en condición base y probable se generan los siguientes resultados:

Tabla 1.1: Impacto en los costos de acuerdo a las etapas de un proyecto EPCM según CODELCO.

Etapas	% de impacto en costos	Proyectos condición base y probable, MM USD	Proyectos condición base, MM USD
Ingeniería	10 %	\$ 3.626	\$ 2.193
Adquisición	50 %	\$ 18.129	\$ 10.966
Construcción	35 %	\$ 12.690	\$ 7.676
Gestión	5 %	\$ 1.813	\$ 1.097

MM USD = millones de dólares.

Tal como se aprecia, la etapa de construcción es la que tiene el segundo mayor impacto en los costos de un contrato EPCM, alcanzando un 35 % de los costos totales de un proyecto.

Así, la inversión asociada a los proyectos en condición base y a la agrupación de proyectos en condición base y probable, representan un $\approx 7,35\%$ y un $\approx 12,16\%$ del PIB de Chile en 2018 respectivamente según lo indicado por el Banco Mundial (2019).

1.1.3. BIM en CODELCO

Tras un proceso gradual de implementación de metodologías y tecnologías BIM — que partió en 2010 con la incorporación de procesos de gestión documental y empleo de modelos 3D para el diseño de proyectos estructurales y de mantenimiento de instalaciones, en los que se entendía el BIM no sólo como un software, sino como una forma de gestionar información— CODELCO suscribe el “Acuerdo de Colaboración y Complementación de Capacidades para Incrementar la Productividad de la Industria de la Construcción” de Planbim en 2018 con el fin de aumentar la productividad y eficiencia en sus proyectos.

Planbim es una iniciativa de la Corporación de Fomento a la Producción (CORFO) a 10 años que tiene como una de sus metas la utilización de la metodología BIM para el

desarrollo y operación de proyectos de edificación e infraestructura pública al año 2020. El Plan tiene como objetivo incrementar la productividad y sustentabilidad – social, económica y ambiental – de la industria de la construcción mediante la incorporación de procesos, metodologías de trabajo y tecnologías de información y comunicaciones que promuevan su modernización a lo largo de todo el ciclo de vida de las obras (Planbim, 2019).

El convenio busca fomentar la incorporación de procesos, estándares y tecnologías de información y comunicaciones, junto con metodologías BIM, para generar un cambio metodológico que integre habilidades y capacidades a los trabajadores mediante el uso de nuevas tecnologías y trabajo colaborativo e interdisciplinario, que permitan la integración de la gestión de proyectos y el manejo optimizado de información a lo largo del ciclo de vida completo de los activos, desde su diseño hasta su operación.

Así, y con el fin de convertirse en la institución que realiza los proyectos más productivos del país, es que CODELCO emitió un mandato corporativo durante el primer semestre del 2019, en el que se indica el uso obligatorio de la metodología BIM para todos los proyectos de la corporación.

1.2. Motivación

Las iniciativas en estado base y probable proyectadas para el período 2018 – 2027 representan cerca de un 12,16 % del PIB nacional del año 2018. Asimismo, de acuerdo las ponderaciones mostradas en la Tabla 1.1, los costos asociados a la etapa de construcción de estos proyectos representan cerca de un 4,26 % del PIB registrado en 2018.

Tales cifras muestran la importancia de diseñar, construir y gestionar los proyectos de manera eficiente. Para ello, CODELCO ha establecido el uso del BIM con el fin de, entre otros, ajustarse a los costos inicialmente proyectados como presupuesto base.

Sin embargo, hasta ahora no existe una manera cuantitativa de estimar si el uso del BIM efectivamente contribuye a ajustarse a los costos inicialmente presupuestados, o bien cuál es el beneficio económico asociado al uso de dicha tecnología. Esta falencia es la que

ha motivado la realización de este estudio.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

- Proponer un método que se utilice como referencia para generar un modelo que sea capaz de estimar el beneficio económico asociado al uso del BIM, generando una estimación del crecimiento de los costos de construcción de un proyecto respecto de su presupuesto inicial según el nivel de integración BIM del proyecto.

1.3.2. Objetivos Secundarios

- Proponer un indicador de madurez BIM que relacione el nivel de integración BIM con el crecimiento de los costos de construcción de un proyecto.
- Desarrollar una pieza *software* para mejorar la estimación de los parámetros de la relación entre el indicador de madurez BIM y el crecimiento de los costos de construcción de un proyecto.

1.4. Alcances del Estudio

Para el desarrollo de este trabajo se consideró la desviación de los costos asociada a la etapa de construcción de los tres proyectos estudiados del presupuesto inicial de tales costos, información que fue extraída del detalle de los contratos de los proyectos en sus etapas iniciales y finales. Esto de acuerdo al requerimiento establecido por CODELCO, cuya prioridad era conocer el impacto de la implementación del BIM en el crecimiento de los costos de construcción de un proyecto.

La muestra sobre la que se trabajó es muy acotada —tres proyectos de construcción

de plantas minero-industriales—, sin embargo, el fin de este estudio no es entregar un modelo cuyo rigor estadístico permita su generalización, sino más bien proveer una metodología que sienta las bases para generar un modelo que sea capaz de entregar una buena predicción respecto de los sobrecostos en términos porcentuales de un proyecto bajo cualquier contexto (ya sea construcción industrial, construcción comercial, etc) considerando solamente el nivel de madurez BIM que el proyecto haya alcanzado, independiente de la escala que use para medirla.

1.5. Metodología de Trabajo

El desarrollo de la propuesta aquí presente se realizó de la siguiente manera:

- Proposición del tema por parte de Codelco. Codelco necesitaba conocer de manera cuantitativa las ventajas de la utilización del BIM, dado que el uso de la tecnología BIM estaba asociada a una “sensación” de ahorro que necesitaba ser cuantificada.
- Revisión bibliográfica y búsqueda en la literatura para conocer las maneras de medir cuantitativamente los beneficios asociados a la implementación del BIM en los diferentes proyectos de construcción en el mundo.
- Reuniones semanales con el jefe del área BIM en Codelco para evaluar los avances en la propuesta y recibir *feedback* sobre el trabajo realizado.
- Minería de datos para establecer los sobrecostos en los proyectos estructurales realizados con BIM en la Vicepresidencia de Proyectos y así poder generar un vector de desviaciones en los costos de cada uno de los proyectos en la etapa de construcción.
- Reuniones con el experto y coordinador BIM de los proyectos estudiados para conocer el *rating* de madurez de cada proyecto con el fin de generar un vector de *ratings* de madurez BIM.
- Desarrollo de un indicador de madurez consecuente con la relación inversa entre madurez BIM y desviación de los costos de un proyecto.

- Utilización de técnicas predictivas, en particular, mínimos cuadrados ordinarios, para generar un modelo capaz de predecir las desviaciones de costos en la etapa de construcción de los proyectos de acuerdo al nivel de madurez BIM alcanzado por cada uno de ellos.
- Presentación de resultados ante comisión experta de la Cámara Chilena de la Construcción, el jefe BIM de codelco y el equipo BIM de la Vicepresidencia de Proyectos.
- Entrega de informe con las conclusiones y sugerencias pertinentes.

1.6. Estructura de la Memoria

El presente trabajo de Memoria se estructura de la siguiente manera:

- **Capítulo 1 - Introducción:**
- **Capítulo 2 - Definición del problema:**
- **Capítulo 3 - Marco teórico:**
- **Capítulo 4 - Propuesta:**
- **Capítulo 5 - Conclusiones:**

Capítulo 2

Definición del Problema

2.1. Contexto

Al momento de realizar esta Memoria, CODELCO no contaba con una herramienta que le permitiera hacer estimaciones sobre cuál es el real impacto de usar la metodología BIM.

A la fecha, lo que se conocía de la metodología en BIM en términos de los beneficios asociados a la reducción de costos eran los planteados en la *National BIM survey* por Trejo Carvajal (2018). Allí, el autor indicaba que el uso del BIM impactaría reduciendo en un 33 % los costos iniciales de construcción y, en suma, de todo el ciclo de vida de un proyecto de construcción.

Esta aseveración, sin embargo, asume la condición ideal en que el BIM es aplicado con su máximo de madurez. Por lo que esta reducción de un 33 % bien puede tomarse como una condición de borde: un horizonte que todos los proyectos de construcción buscan alcanzar a la hora de aventurarse con la metodología BIM.

2.1.1. Problema

Así, pues, la principal motivación de CODELCO era conocer, en términos cuantitativos, el crecimiento de los costos de un proyecto de construcción de acuerdo al nivel de madurez BIM alcanzado por dicho proyecto respecto de su estimación inicial.

Capítulo 3

Marco Teórico

3.1. La metodología BIM

La metodología BIM consiste en un conjunto de tecnologías, metodologías y estándares que permiten y facilitan el diseño, la construcción y la operación de un proyecto de construcción de forma colaborativa en un espacio virtual compartido (Tabilo Vallade, 2019).

Por otro lado, es común encontrarse con dos definiciones en la literatura que difieren ligeramente la hora de abordar el BIM en términos conceptuales. Estas definiciones se pueden agrupar y conceptualizar de acuerdo a las siguientes definiciones:

1. **Building Information Model:** representación digital paramétrica del producto de construcción, es decir, losas, muros, pilares, equipamiento, puertas, ventanas, etcétera, que incluye su geometría e información (Librería Nacional BIM, 2018).
2. **Building Information Modeling:** metodología/proceso que permite desarrollar y utilizar diversos modelos de representación digital paramétrica para apoyar decisiones de diseño, construcción y operación durante todo el ciclo de vida de un proyecto, lo que implica una integración y gestión de información provista y usada por diferentes actores del proyecto. De esta manera, se busca disminuir la pérdida tanto de tiempo como de recursos durante el diseño y la ejecución de la obra (BIM Forum Chile, 2019).

Ambos conceptos son complementarios. En este sentido, no merece la pena hacer distinciones entre uno y otro y se pueden utilizar de manera intercambiable, dado que la metodología BIM requiere de un modelo BIM para su desarrollo. Asimismo, el modelo BIM pierde su potencial si este no se utiliza bajo un marco conceptual adecuado (Cárdenas, 2016).

El eje central del BIM es, entonces, la colaboración entre las diferentes partes que conforman las fases del ciclo de vida de un proyecto, y cuya tarea es insertar, extraer, actualizar o modificar información en el modelo BIM para apoyar y reflejar las funciones del proyecto de construcción. Esto permite el flujo de información (cuya particularidad es que se actualiza de manera instantánea), control, supervisión y validación de todos los procesos involucrados. Trabajar de esta manera permite que todos los cambios realizados en el modelo sean de conocidos por todos los *stakeholders* del proyecto (Trejo Carvajal, 2018).

Es importante mencionar que, si bien el BIM es una metodología que permite la pronta detección y corrección de errores de cualquier tipo, y que, además, reduce las tareas repetitivas y redundantes, la ingesta de información del modelo es responsabilidad de personas. Son las personas quienes reúnen y e ingresan la información, por lo que no se debe pensar en el BIM como una metodología *error free*.

3.1.1. Dimensiones BIM

Un proyecto concebido bajo la metodología BIM tiene un ciclo de vida que comienza con una idea y termina con la mantención del proyecto. Así, el ciclo de vida de un proyecto BIM se puede dividir en siete fases, que la literatura ha denominado como las dimensiones BIM (Tabilo Vallade, 2019):

- **1D (la idea):** la idea permite definir las condiciones iniciales, realizando las primeras estimaciones de superficie, volúmenes y costos. También se establece el plan de ejecución.
- **2D (el boceto):** se elije y prepara el *software* para hacer la modelación del proyecto. Se definen los materiales, las cargas estructurales y se establecen las bases para la sostenibilidad del proyecto.

- **3D (modelo de información de la construcción):** con toda la información recopilada se genera el modelo 3D que servirá como base para el resto del ciclo de vida del proyecto. No es sólo un modelo gráfico, sino que además incorpora toda la información que se necesitará para las siguientes fases.
- **4D (tiempo):** se incorpora la variable tiempo. Es decir, se definen las fases del proyecto y la duración de estas. Establece la planificación de los plazos de todo el proyecto.
- **5D (costos):** se incorpora el control de costos y estimación de gastos del proyecto.
- **6D (simulación):** consiste en simular las posibles alternativas del proyecto para finalmente llegar a la alternativa óptima, todo esto antes de comenzar la construcción del proyecto.
- **7D (instructivo):** se establece el manual de la vida útil del proyecto una vez construido, para el uso y mantenimiento de éste.

3.1.2. Niveles de información BIM

Existen distintos niveles de información BIM ya sea para el detalle, el desarrollo y la información del proyecto de construcción. Sin embargo, existe un concepto común que agrupa todos los niveles de información existentes. El concepto es el acrónimo LOD. No obstante, el LOD adopta interpretaciones distintas según la fuente de su procedencia. Así, para los estándares de Estados Unidos, definidos por la *National BIM Standard-United States®* (NBIMS-US™), LOD hace referencia a *Level of Development*. Por otro lado, los estándares británicos están definidos por la *National Building Specification* (NBS-UK), en los que LOD hace referencia a *Level of Definition* (Trejo Carvajal, 2018).

el BIM Forum Chile (2017) indica que la diferencia fundamental es que el nivel de detalle se incluye en el elemento del modelo (NBS-UK), mientras que el nivel de desarrollo es el grado en que la geometría e información del elemento se ha pensado; es decir, según la fase de diseño del proyecto, por lo que entrega un cierto nivel de confianza para seguir avanzando en el desarrollo del proyecto en el modelo (US).

Niveles de detalle

El NBS-UK plantea que el término *Level of Definition* se refiere al nivel de detalle (descripción gráfica de los modelos en cada etapa). Dicha institución también define un *Level of Information* (LOI), que describe el contenido no gráfico del modelo en cada etapa (Trejo Carvajal, 2018).

A continuación se describen los LOD e LOI definidos por el NBS-UK de acuerdo a lo señalado por el (BIM Forum Chile, 2017):

- **LOD 1:** conceptualización. Casi nula geometría.
- **LOD 2:** el elemento de construcción modelado proporciona una indicación visual del elemento en la etapa conceptual, identificando requerimientos claves como el acceso o zonas libres para el posterior mantenimiento. Esta información es adecuada para la coordinación espacial inicial de los elementos o sistemas.
- **LOD 3:** el elemento de construcción modelado proporciona una representación visual del elemento en la etapa de definiciones técnicas para su coordinación espacial completa.
- **LOD 4:** el elemento de construcción modelado proporciona una representación visual del elemento para una etapa de diseño, con su coordinación espacial completa.
- **LOD 5:** el elemento de construcción modelado proporciona una representación visual del elemento en el proyecto construido y provee una referencia, para su posterior uso y mantenimiento.



Figura 3.1: Ejemplo de nivel de definición.

Niveles de información

Los niveles de información (LOI) definidos por la NBS-UK y descritos por el BIM Forum Chile (2017) se muestran a continuación:

- **LOI 2 y 3:** el elemento modelado proporciona una descripción inicial para una entrega hacia el diseño.
- **LOI 4:** el elemento modelado proporciona una información suficiente para permitir la selección del producto de fabricante que cumpla con sus requerimientos. Esta información también puede ser utilizada para reemplazar un elemento durante el ciclo de vida del proyecto, una vez construido.
- **LOI 5:** el elemento modelado proporciona la información específica del producto de fabricante seleccionado o lo construido y entregado. Cualquier información adicional pertinente durante el proceso de construcción o instalación es indicada dentro de este nivel.
- **LOI 6:** el elemento modelado proporciona la información acumulada de los niveles anteriores y además considera información detallada del mantenimiento efectuado.

Niveles de desarrollo

Adicionalmente, el *American Institute of Architects* (AIA) define al nivel de desarrollo como la forma de identificar requisitos mínimos y usos específicos a cada elemento del modelo, en un respectivo nivel. Los siguientes, son los niveles de desarrollo, en base a lo expuesto por el BIM Forum Chile (2017):

- **LOD 100:** el elemento puede ser representado gráficamente en el modelo con un símbolo u representación genérica. Estas representaciones muestran la existencia de un componente, pero no su forma, tamaño o ubicación precisa. La información debe ser considerada aproximada.

- **LOD 200:** el elemento se representa gráficamente como un sistema genérico de objeto, tamaño, forma, ubicación y orientación aproximados. La información no gráfica también es aproximada. Estas representaciones son respecto del volumen o espacio reservado.
- **LOD 300:** el elemento representa gráficamente como un objeto o sistema específico en términos de cantidad, tamaño, forma, ubicación y orientación. La información no gráfica se corresponde con la información gráfica. Las cantidades, dimensiones, formas, ubicación y orientación según lo diseñado se pueden obtener directamente a del elemento.
- **LOD 350:** igual al LOD 300, pero las representaciones se vinculan con otros elementos del modelo cercano o adjunto y se incluyen las partes tales como soportes o conexiones.
- **LOD 400:** LOD 350 más la modelación. Estas representaciones se modelan con la precisión y detalle suficiente para su fabricación e instalación.
- **LOD 500:** el elemento modelado es una representación fiel del elemento de construcción ya ejecutado en obra, con su tamaño, forma, ubicación y orientación real en el proyecto. La información no gráfica está incluida en el objeto, así como sus vínculos con otros elementos. Estas representaciones se realizan una vez construido el proyecto y son las adecuadas para el mantenimiento y el funcionamiento del elemento en el inmueble.

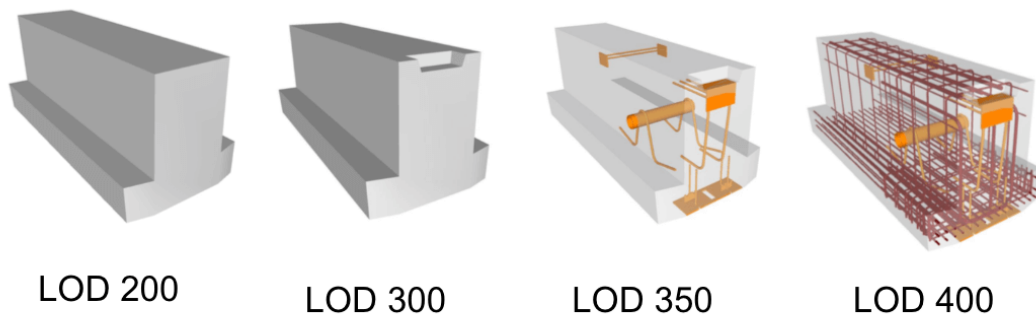


Figura 3.2: Ejemplo de nivel de desarrollo.

3.1.3. Madurez BIM

Existen diversos métodos y herramientas para estimar el nivel de madurez BIM de un proyecto. Por ejemplo, la NBIMS-USA® cuenta con un modelo de capacidades de madurez para definir la madurez de los modelos y permitir a los usuarios evaluar sus prácticas y procesos basados en un espectro y funcionalidades técnicas definidas. El objetivo de las capacidades de madurez es proveer criterios de comparación y metas para el progreso en la madurez proyectos. Esta herramienta consiste de diez niveles de madurez, siendo diez el máximo (Trejo Carvajal, 2018).

Por otro lado, la NBS-UK propone un modelo que consta de cuatro niveles, los que son (Trejo Carvajal, 2018):

- **Nivel 0:** no hay colaboración. CAD 2D solo utilizado en producción. Los *outputs* son distribuidos en papel, en digital o una mezcla de ambos.
- **Nivel 1:** mezcla de CAD 3D para trabajo conceptual y 2D para documentación. Se administran estándares CAD y el intercambio electrónico de datos se lleva a cabo desde un entorno de datos común, a menudo administrado por el contratista. Los modelos no se comparten entre los miembros del equipo del proyecto.
- **Nivel 2:** trabajo colaborativo en que todas las partes usan sus propios modelos CAD en 3D, pero no necesariamente trabajan en un solo modelo compartido. La colaboración tiene que ver con la manera en que se intercambia la información entre las diferentes partes (formato de archivo común).
- **Nivel 3:** colaboración completa entre todas las disciplinas mediante el uso de un único modelo de proyecto compartido que se mantiene en un repositorio centralizado. Todas las partes pueden acceder y modificar ese mismo modelo y el beneficio es que elimina la capa final de riesgo de información conflictiva. Esto se conoce como “Open BIM”.

Para Succar (2010), la madurez BIM se refiere a la mejora gradual y continua de la calidad, repetibilidad y predictibilidad dentro de una capacidad BIM disponible. La capacidad BIM, por su parte, hace referencia a las habilidades mínimas de una organización o

equipo para entregar resultados medibles.

Así, pues, el índice de madurez BIM planteado por Succar consta de cinco niveles de madurez. Estos son: nivel inicial, nivel definido, nivel gestionado, nivel integrado y nivel optimizado.

La Vicepresidencia de Proyectos de CODELCO, por su parte, utiliza la definición de Succar para asignar un *rating* de madurez a sus proyectos. Para CODELCO, las cinco etapas definidas por Succar se han modificado someramente para ajustarse sus propias necesidades. Los niveles de madurez para CODELCO son, entonces, los que se detallan a continuación:

Tabla 3.1: Niveles de madurez BIM de acuerdo a lo planteado por la Vicepresidencia de Proyectos, CODELCO.

Niveles de madurez BIM	Descripción
Nivel 0	Nivel inicial pre BIM. Es un diseño a través de planos.
Nivel 1	Nivel definido. Consiste en un diseño a través de planos junto a un modelo 3D sin datos adicionales.
Nivel 2	Nivel gestionado. Modelo basado en la colaboración. Aquí el diseño es a través de un modelo 3D multidisciplinario con datos y gestión a través de planos.
Nivel 3	Nivel integrado. Existe una integración virtual 3D con datos entre distintos contratos de un proyecto, y la gestión a través de un modelo 3D.
Nivel 4	Nivel optimizado. Post BIM. Consiste en un diseño virtual 3D con datos, multidisciplinario, colaborativo y con información integrada entre sistemas.

Cabe mencionar, sin embargo, que las empresas e instituciones suelen desarrollar sus propios métodos para medir la madurez BIM.

3.1.4. BIM en Chile

El BIM en Chile comenzó su desarrollo desde el ámbito de la arquitectura, expandiéndose a ingeniería, construcción y operaciones. Los primeros indicios del uso de BIM se dieron en la infraestructura hospitalaria, dadas las exigencias en las licitaciones desde el 2009. Dados los beneficios obtenidos en estas experiencias, el BIM se hizo cada vez más atractivos para las demás áreas de la industria (Trejo Carvajal, 2018).

El desarrollo de BIM en Chile ha sido monitoreado por distintas entidades, como lo son la CDT, el BIM Forum Chile, universidades, entre otros.

El BIM Forum Chile (2017), según sus propias definiciones, es una instancia técnica y permanente, que convoca a los principales profesionales e instituciones relacionadas al BIM en Chile. Busca canalizar las inquietudes técnicas, el conocimiento y la información relacionados a BIM, constituyéndose también en una instancia de desarrollo, difusión y buenas prácticas para el desarrollo tecnológico en el sector construcción.

Los propósitos de BIM Forum Chile son netamente técnicos y sesiona bajo la coordinación de la Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT) de la Cámara Chilena de la Construcción (CChC). También es una instancia abierta y convocante, agrupando a las empresas y profesionales que puedan aportar sus conocimientos y experiencias al mejoramiento de las técnicas relacionadas a BIM.

3.1.5. Ventajas de la metodología BIM

En términos generales, la Librería Nacional BIM (2018) indica que la principal ventaja es la visualización en 3D de lo que se está proyectando, permitiendo realizar ensayos o probar distintas configuraciones antes de la ejecución, cuantificación automática de cubificaciones, identificación de interferencias, fabricaciones e impulso en la industrialización de la construcción.

En esta línea, la Librería Nacional BIM (2018) plantea las siguientes ventajas para los usuarios y para el proyecto:

- El uso de la metodología y herramientas en general permite establecer un estándar de desarrollo de proyectos, un orden, una mejora de productividad; una vez superada la curva de aprendizaje, mayor rendimiento o menores plazos en el desarrollo de tareas habituales en los proyectos o abarcar más proyectos por la misma cantidad de profesionales, entre otras. El beneficio real que se obtenga de BIM depende de diversos factores, como los objetivos buscados por cada participante, la capacidad de comunicación entre actores, capacidades tecnológicas y humanas de cada oficina, entre otros.
- El uso de BIM en general requiere de un mayor esfuerzo en la fase de diseño de los proyectos, pero esto se retribuye con la posibilidad de realizar ensayos, simulaciones virtuales y distintos tipos de análisis permitiendo la toma de mejores decisiones y más informadas. También se pueden observar menores inconsistencias e interferencias al momento de construir, sin mayores aumentos de plazos y con costos controlados, evitando las ineficiencias por falta de definiciones en el proyecto. Tener múltiples opciones de diseño sin la necesidad de modificar todo el universo de planos o documentación puesto que, al estar vinculadas, la actualización es automática.

Si su uso durante todo el ciclo del proyecto es parte de los objetivos, los beneficios que puede llegar a generar en la planificación de las vías de acceso necesarias para el mantenimiento, en el rastreo y control de los componentes, en remodelaciones y posteriores demoliciones, pueden reflejar un ahorro final significativo en la totalidad de la vida del proyecto desde el punto de vista de la gestión de activos. Cabe destacar que el mayor ahorro de este nuevo proceso se produce en la fase de operación y mantenimiento.

Por otro lado, el BIM Forum Chile (2017) indica que:

“El mayor beneficio se encuentra cuando este modelo y la riqueza de información que incorpora, es usado en conjunto con aplicaciones de administración de edificios o Facilities Management (FM), sobre todo en proyectos complejos que requieren sistemas de apoyo para su funcionamiento como hospitales o industrias, para administrar las mantenciones y costos asociados a estos equipos.”

Asimismo, la metodología BIM, considerada como plataforma de coordinación, puede tener dos efectos en el comportamiento de un contrato (Chang y Howard, 2014):

- Digitalizar el diseño en un conjunto de objetos paramétricos 3D podría reducir la incidencia de malas interpretaciones de la información del diseño provenientes de errores humanos durante la transferencia de información. Digitalizar reduce, de manera inherente, la incidencia en las órdenes de cambio, lo que permite que el dueño del proyecto esté menos expuesto a retrasos en los pagos.
- El uso de la metodología BIM podría hacer posible que las empresas subcontratistas incorporasen sus inputs en el diseño digital durante una etapa temprana. Además, el uso de BIM facilita la detección de interferencias que podrían resultar en un cambio durante la etapa de construcción. Todo lo anterior también impacta en la reducción de la exposición a cambios indeseados del dueño.

Capítulo 4

Propuesta

El fin de este trabajo es postular un modelo capaz de estimar los beneficios económicos asociados al uso del BIM en los proyectos de construcción industriales en CODELCO, en particular, generando una metodología que sienta las bases para realizar estimaciones de los sobrecostos de los proyectos de construcción relativos al contexto de CODELCO respecto de su presupuesto inicial.

Sin embargo, esta propuesta también puede extenderse a otros contextos y tomarse como la base para generar estimaciones en cualquier tipo de industria que utilice la metodología BIM en sus proyectos de construcción.

4.1. Métrica propuesta

Las métricas propuestas por la literatura, en general, giran en torno al uso de contrafactuales, ya sea de comparando con otros proyectos similares que han utilizado la metodología BIM o bien haciendo una comparación con los beneficios teóricos que indica la literatura sobre el uso BIM.

En el primer grupo, por ejemplo, se tienen los siguientes estudios que son relevantes para el desarrollo de la propuesta de esta Memoria:

- Barlish y Sullivan (2012) proponen un método donde los indicadores propuestos permiten aventurar conclusiones en base a la comparación del nivel que estos alcanzaron en proyectos con BIM versus proyectos sin BIM. Sin embargo, una propuesta como esta tiene la desventaja de necesitar de un contrafactual para validarse.
- Lu et al. (2012) propone una métrica en la que el indicador es un parámetro derivado de otros indicadores, que son los esfuerzos (medidos en horas-hombre) y la superficie por unidad de trabajo (m^2 por piso, por ejemplo). Este método también cuenta con la desventaja de necesitar de un contrafactual para validarse.

Por otro lado, un ejemplo del segundo grupo es el siguiente estudio:

- Saldías (2010) proponen un método que permite levantar conclusiones en base a la cantidad de solicitudes de información (SDI) y órdenes de cambio que pudieron haberse evitado con el uso de la metodología BIM. Este método tiene la desventaja de comparar proyectos sin BIM contra el ideal esperado con el uso de BIM (madurez óptima), sin tomar en cuenta los puntos intermedios de proyectos que utilizan al menos algún nivel de esta metodología.

Así, y en línea con lo planteado como fin de esta Memoria, es esencial que el método propuesto desestime el uso de un contrafactual para validarse, y busque, alternativamente, una manera de producir estimaciones de sobre costos respecto de variables exógenas que se determinen dentro del modelo y en relación con otras variables internas.

La métrica a proponerse, entonces, debe:

1. Desestimar el uso de un contrafactual y utilización de una variable exógena.
2. Incluir cualquier nivel de adopción de la metodología BIM en el proyecto (madurez BIM).

Así, en vez de construir un modelo en base a indicadores que pueden extraerse de manera directa de los reportes de los proyectos, el modelo propuesto utiliza una métrica que

toma en cuenta el nivel de madurez BIM alcanzado (de acuerdo a una escala previamente determinada), el nivel óptimo de madurez y la desviación de los costos de los proyectos.

Asimismo, y dado que se espera que los costos de un proyecto crezcan en relación inversa al nivel de madurez BIM alcanzado por este, es necesario que el indicador se compare con respecto a su nivel de madurez óptimo. Formalmente, esto queda:

$$\text{Indicador Madurez} = \frac{\text{Madurez BIM óptima}}{\text{Nivel de madurez BIM del proyecto}} \quad (4.1)$$

4.2. Selección y generación de datos

El proceso de generación de los datos finales sobre los cuales se realizará el análisis para generar la propuesta se realiza a través de los procesos que muestran el siguiente diagrama:



Figura 4.1: Diagrama de generación de la data final.

Donde,

- Input:** es la data bruta (*raw data*) sobre la cual se buscará y seleccionará la información relevante.
- Transformación:** la data ingresada pasa por un proceso de transformación que selecciona sólo la data de interés.
- Output:** conjunto de datos finales sobre los cuales se realiza el análisis que sirve para proponer el método de estimación del crecimiento de los costos.

4.2.1. Criterio de selección de la fuente de la información

La métrica propuesta (4.1) es la variable independiente del modelo que busca explicar el crecimiento de los costos de un proyecto de construcción en relación a su presupuesto inicial y de acuerdo al nivel de integración BIM (madurez BIM) que haya alcanzado un proyecto.

Así, para generar un modelo es necesario conocer la información relativa a todos aquellos factores que devinieron en un aumento en los costos inicialmente proyectados, y que bien pudieron evitarse de haberse utilizado e integrado el BIM de manera óptima.

De esta manera, la selección de los datos utilizados para relacionar estas variables y generar un modelo capaz de predecir la desviación en costos basado en la métrica propuesta tiene dos fuentes principales desde las cuales era posible extraer la información de interés: la primera es el reporte final de los proyectos con sus respectivos cambios y tendencias; la segunda es el Detalle de los Contratos de los proyectos.

Sin embargo, dado el nivel de detalle de la información contenida en cada una de las fuentes, se escogió el reporte con el Detalle de los Contratos como la base de extracción de datos.

4.2.2. Input

Se fija como *input* la información contenida en el Detalle de los Contratos. Dicho reporte ofrece, adicionalmente, la ventaja de separar el detalle del costo base y el costo final. Esta clasificación permite generar una estructura de transformación de datos que ocurre de manera sistemática en orden detallado a continuación:

1. **Crecimiento contratos:** en primer lugar, se selecciona una submuestra que contiene únicamente los contratos que experimentan un crecimiento en sus costos finales respecto del costo base del proyecto.

2. **Crecimiento construcción:** luego, se considera sólo la información referida a los crecimientos de los costos de cada contrato en la fase de construcción.
3. **Itemización BIM:** finalmente, se separa la información por ítems relacionados al uso (o falta de uso) de la metodología BIM. La itemización BIM se compone de los siguientes ítems: extensión de plazo, obras adicionales, materiales e ingeniería.

La selección de información asociada a cada uno de los ítems de la itemización BIM puede variar según el proyecto. Sin embargo, para el caso de los proyectos analizados en este estudio, las palabras clave para dicha selección eran coincidentes entre proyectos. Esto dado que quienes crean el reporte son parte de la misma Dirección (Dirección de Contratos de la Vicepresidencia de Proyectos) y de la misma compañía (CODELCO).

Se tiene, entonces, que para el filtrado por ítem, las palabras clave fueron:

Tabla 4.1: Palabras clave para la selección de cada ítem asociado al BIM.

Ítems	Palabras clave
Extensión de plazo	Extensión plazo, plazo
Obras adicionales	Montaje, obras adicionales, rellenos, reemplazos, reparaciones, etc.
Materiales	Hormigón, piping, cañerías, cables, válvulas, etc.
Ingeniería	Ingeniería, ingeniería de terreno, etc.

4.2.3. Transformación

La transformación ocurre a través de una pieza de *software* desarrollada en Python que obedece a la lógica que se detalla a continuación:

Primero, los datos ingresados son seleccionados de acuerdo a la condición,

$$C_{fi} > C_{0i} \quad (4.2)$$

Donde,

C_{fi} : costo final del proyecto i .

C_{0i} : costo inicial del proyecto i .

Para efectos de esclarecimiento, se denominará este set de datos como DC_i . A continuación, desde DC_i se extraen solamente los datos de los contratos asociados a la construcción del proyecto i . Este subconjunto será denominada como CC_i y cumple con la condición:

$$CC_i \subset DC_i \quad (4.3)$$

Finalmente, desde CC_i se extraen los datos para cada ítem de la itemización BIM, tal que:

$$\text{itemización BIM} \in CC_i \quad (4.4)$$

4.2.4. Output

El *output* del proceso de transformación de la data da como resultado el siguiente desglose en términos porcentuales para cada uno de los proyectos estudiados. Así, las desviaciones en costos para los proyectos estudiados en este trabajo se distribuyen de acuerdo a lo mostrado en la siguiente Tabla:

Tabla 4.2: Desviaciones en costo de los proyectos estudiados.

Ítem	Ministro Hales	Moly corporativo	Planta de Ácido
Extensión plazo	2,0 %	5,4 %	-
Obras adicionales	19,7 %	2,4 %	5,6 %
Materiales	3,2 %	8,1 %	5,9 %
Ingeniería	0,08 %	0,12 %	0,3 %
Total	24,9 %	16,2 %	11,8 %

4.2.5. Herramienta de selección y generación de base de datos

El reporte con el Detalle de los Contratos es una planilla Excel con varios miles de datos, por lo que el filtrado a través de Excel es poco conveniente y susceptible a errores. Por esta razón, se desarrolló un código en Python capaz de seleccionar y transformar los datos requeridos a través de una pseudo minería de datos. Dicho código está disponible en el siguiente repositorio GitHub www.github.com/psotou/contract-data-selection.git

Cabe mencionar que si bien el código se creó para trabajar con cualquier reporte de Detalle de Contratos emitidos por la Vicepresidencia de Proyectos de CODELCO, basta con ajustar algunos parámetros para que dicho código pueda usarse con un reporte de similares características de cualquier otra empresa o institución.

4.2.6. Evaluación de madurez BIM de los proyectos

La evaluación del nivel de madurez BIM alcanzado por cada uno de los proyectos estudiados realizada por Marcelo Vásquez, quien fue la persona encargada de la coordinación BIM de todos estos proyectos en CODELCO.

Marcelo utilizó la metodología desarrollada por Succar (2010) y utilizó la matriz de madurez que el autor propone para entregar el *rating* asociado a cada proyecto según los niveles establecidos en la Tabla 3.1. Bajo este contexto, la evaluación de Marcelo Vásquez para los proyectos fue la siguiente:

Tabla 4.3: Nivel de madurez BIM de cada proyecto según *rating* evaluado por especialista.

Proyecto	Nivel de madurez BIM
Ministro Hales	1,7
Moly corporativo	1,8
Planta de ácido	2,2

4.3. Aplicación de la métrica propuesta

Al transformar los datos de la Tabla 4.3 de acuerdo a la métrica propuesta (4.1), el conjunto de datos sobre los que se levanta la propuesta de este estudio queda como se muestra a continuación:

Tabla 4.4: Base final que muestra el crecimiento de los costos junto a su respectivo indicador madurez (métrica propuesta).

Proyecto	Desviación	Nivel de madurez	Indicador madurez
Ministro Hales	24,9 %	1,7	2,35
Moly corporativo	16,2 %	1,8	1,82
Planta de ácido	11,8 %	2,2	2,22

En base a la información de la Tabla 4.4 se construye la propuesta de un modelo que permite realizar estimaciones del crecimiento de los costos de un proyecto de acuerdo a su nivel de madurez BIM alcanzado.

4.4. Teoría detrás del modelo propuesto

En términos generales, la relación entre el crecimiento de los costos de un proyecto i y los factores que lo motivan se puede expresar de la siguiente manera:

$$y_i = \theta_0 + \sum_{i=1}^n \theta_i x_i \quad (4.5)$$

O bien, de manera vectorial:

$$y_i = \mathbf{x}_i^T \boldsymbol{\theta} \quad (4.6)$$

Donde tanto y_i como \mathbf{x}_i son variables observadas. Se asumirá que ε_i (término de error o de perturbación no observado) es absorbido por la constante θ_0 . Aquí, \mathbf{x}^T es un vector fila cuyos elementos son los indicadores de madurez propuestos ($1, x_1, x_2, \dots, x_n$), y $\boldsymbol{\theta}$ es un vector columna con $(\theta_0, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)^T$ parámetros desconocidos que son los que se desea estimar con el fin de poder generar un modelo que sirva como base para explicar la influencia de factores tales como el uso de alguna nueva metodología (que es el caso de este estudio), en el crecimiento de los costos de un proyecto.

Para efectos de esta Memoria, y_i representa los crecimientos de los costos de construcción para el proyecto i , y \mathbf{x}_i representa la métrica propuesta como indicador de madurez en la (4.1).

Adicionalmente, la ecuación (4.6) se puede escribir usando notación matricial:

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (4.7)$$

Donde \mathbf{y} y $\boldsymbol{\varepsilon}$ son vectores de dimensiones $(N \times 1)$, \mathbf{X} es una matriz de dimensión $(N \times K)$ y $\boldsymbol{\theta}$ un vector de dimensión $(K \times 1)$. Esta será la forma que se utilizará para hacer el ingreso de la data a la pieza de *software* desarrollada. Aquí también se considera el supuesto en que el vector de errores $\boldsymbol{\varepsilon}$ es absorbido por el vector $\boldsymbol{\theta}$, de manera que la ecuación sobre la que se trabajará queda de la siguiente manera:

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\theta} \quad (4.8)$$

Antes de comenzar con la estimación de los parámetros de interés $\boldsymbol{\theta}$, se deben levantar algunos supuestos para darle significado al modelo de manera que este no carezca de sentido estadístico. En primer lugar, se asume que las variables explicativas \mathbf{x}_i son exógenas, lo que implica que $E[y_i|\mathbf{x}_i] = 0$. Bajo este supuesto, se sostiene que :

$$E[y_i|\mathbf{x}_i] = \mathbf{x}_i^T \boldsymbol{\theta} \quad (4.9)$$

De manera que la curva $\mathbf{x}_i^T \boldsymbol{\theta}$ describe la esperanza condicional de y_i dados los valores

de \mathbf{x}_i , y los coeficientes de $\boldsymbol{\theta}$ miden cuánto cambia el valor esperado de y_i si cambia un valor x_{ik} (siendo éste el k -ésimo elemento del vector \mathbf{x}_i) manteniendo todos los otros elementos de \mathbf{x}_i constantes (condición *ceteris paribus*) (Verbeek, 2004).

Los parámetros de $\boldsymbol{\theta}$ se estimarán on el estimador de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO). Utilizando la notación de la ecuación (4.7), el estimador está dado por:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (X^T X)^{-1} X^T \mathbf{y} \quad (4.10)$$

Luego, la predicción de valores de desviación vendrá dada por:

$$\hat{\mathbf{y}} = X\hat{\boldsymbol{\theta}} \quad (4.11)$$

Donde $\hat{\mathbf{y}}$ son las predicciones de las desviaciones dada la estimación de los parámetros de $\boldsymbol{\theta}$.

La muestra sobre la cual se funda este estudio consiste de un conjunto muy reducido de datos, por lo que se utilizará MCO para muestra pequeña. Las propiedades del estimador MCO para muestra pequeña son:

$$E[\varepsilon_i] = 0 \quad (4.12)$$

$$\varepsilon_i \text{ independiente de } \mathbf{x}_i \quad (4.13)$$

$$V[\varepsilon_i] = \sigma^2 \quad (4.14)$$

$$\text{cov}[\varepsilon_i, \varepsilon_j] = 0, \quad i \neq j \quad (4.15)$$

El supuesto (4.12) indica que el valor esperado del término de error es cero, esto significa que, en promedio, la curva de regresión debería estar correcta.

El supuesto (4.14) indica que todos los términos de error poseen la misma varianza, esto se conoce como *homoceasticidad*.

El supuesto (4.15) impone cero correlación entre los términos de error, excluyendo así cualquier forma de autocorrelación. Usando la notación matricial, estos tres supuesto se pueden reescribir de la siguiente forma:

$$E[\varepsilon] = 0 \quad \text{y} \quad V[\varepsilon] = \sigma^2 I_N \quad (4.16)$$

Con I_N matriz identidad de dimensiones $(N \times N)$. Esto muestra que la matriz de covarianza del vector de los términos de error ε es una matriz diagonal con σ^2 en la diagonal.

El supuesto (4.13) indica que X e ε son independientes. Este es un supuesto fuerte que implica:

$$E[\varepsilon|X] = E[\varepsilon] = 0 \quad (4.17)$$

$$V[\varepsilon|X] = V[\varepsilon] = \sigma^2 I_N \quad (4.18)$$

Es decir, la matriz de regresores X no provee ninguna información sobre los valores esperados de los términos de error o sus (co)varianzas.

Una propiedad muy relevante del estimador de mínimos cuadrados es que se trata de un **estimador insesgado**. Esto quiere decir que, en promedio, se espera que los valores del estimador $\hat{\theta}$ sean iguales a los valores verdaderos de θ (Verbeek, 2004). Formalmente, esto es:

$$E[\hat{\theta}] = \theta \quad (4.19)$$

Hasta ahora se ha descrito la interpretación del modelo para un valor esperado de y_i dados los valores observado de las variables explicativas x_i .

Además de ese análisis, es importante conocer el **efecto marginal** de dichas variables sobre el valor esperado de y_i . En otras palabras, en cuántas unidades se espera que cambie y_i

si x_{ik} cambia en una unidad siempre que el resto de las variables en \mathbf{x}_i se mantenga constante (condición ceteris paribus) (Hansen, 2018). Esta medida viene dada por:

$$\frac{\partial E[y_i|\mathbf{x}_i]}{\partial x_{ik}} = \theta_k \quad (4.20)$$

4.5. Modelo propuesto

La coordinación digital de un proyecto de construcción a través del uso de la metodología BIM supone reducir los costos asociados a errores, interferencias, omisiones, etc, por lo que a medida que el grado de integración de la metodología en el proyecto crece, los costos asociados a los problemas mencionados disminuyen.

Dado este escenario, es de esperarse que el uso del BIM impacte de manera positiva en el ahorro en costos de construcción de un proyecto. Se desprende, entonces, que un proyecto que alcanza un buen nivel de madurez BIM debería tener un sobre costo menor al esperado en un proyecto realizado sin BIM.

Por lo anterior, la hipótesis sobre la que se basa esta propuesta es que la desviación de los costos de un proyecto es inversamente proporcional a su grado de madurez BIM. Para ello, se define la variable explicativa x_{ik} de la siguiente manera:

$$x_{ik} = \frac{m}{m_i} \quad (4.21)$$

Donde m es el óptimo de madurez BIM, y m_i es el nivel de madurez BIM alcanzado por el proyecto i . Aquí, x_{ik} no es otra cosa que la métrica propuesta en (4.1).

Con esto, la ecuación (4.5) queda:

$$y_i = \theta_0 + \sum_{i=1}^n \theta_i \left(\frac{m}{m_i} \right) \quad (4.22)$$

Además, la desviación en los costos de un proyecto está sujeta las siguientes condiciones de borde de acuerdo a la NBS-UK (NBS, 2018):

$$y_i = \begin{cases} 0,33 & \text{si } m_i = m_{\text{máx}} \\ 0,001 & \text{si } m_i = m_{\text{mín}} \end{cases} \quad (4.23)$$

Estos valores son referenciales dado que consideran una integración óptima (máxima madurez BIM posible) de la metodología BIM.

4.5.1. Estimación del modelo según la muestra

La muestra de la que se disponía y sobre la que se trabajó consistía de tres proyectos minero-industriales, dos de estos proyectos de construcción *greenfield* mientras que el otro, un proyecto *brownfield* (Planta de ácido) de *overhauling*.

Ahora, ingresando los datos de los crecimientos de los costos y el indicador de madurez estimado según (4.1) de toda la muestra, se generan las siguientes matrices:

$$Y = \begin{bmatrix} 0,330 \\ 0,249 \\ 0,161 \\ 0,118 \\ 0,001 \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & 4,000 \\ 1 & 2,353 \\ 1 & 1,818 \\ 1 & 2,222 \\ 1 & 1,000 \end{bmatrix}$$

Lo que produce el siguiente estimador:

$$\hat{\theta} = \begin{bmatrix} -0,0746 \\ 0,1083 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

Con lo que la relación entre desviación y madurez se modela como sigue:

$$\hat{y}_i = -0,0746 + 0,1083 \cdot \left(\frac{4}{m_i} \right) \quad (4.25)$$

Cuyo efecto marginal sobre la desviación esperada de los costos es 0,1083 según se estima a través de la ecuación (4.20). Es decir, por cada una unidad de madurez BIM se espera una reducción en la desviación esperada de aproximadamente un 10,83 %.

El gráfico asociado a la ecuación (4.25) es:

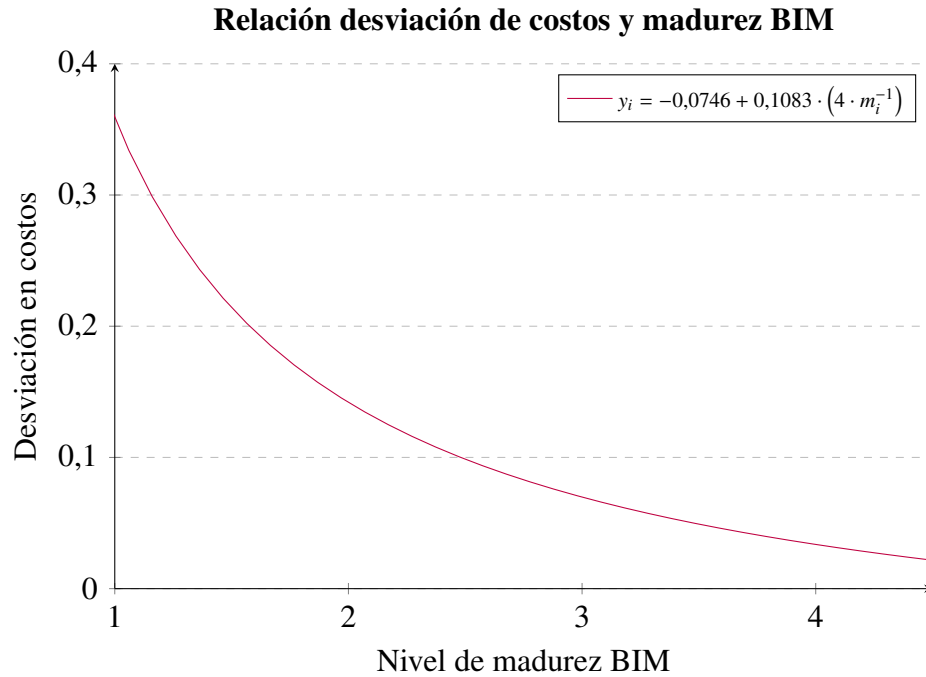


Figura 4.2: Predicción de la desviación en costos en base a la muestra total.

Y las estadísticas asociadas al coeficiente que acompaña al indicador de madurez BIM (las cuales se generan a través de la pieza de *software* desarrollada) se muestran en la siguiente Tabla:

Tabla 4.5: Estadísticas asociadas al coeficiente de madurez BIM θ_1 .

Coeficiente	error estándar	<i>p</i> -value	R^2
0,1083	0,022	0,015	0,893

4.5.2. Análisis de Resultados

La propuesta de este estudio es proponer una metodología que permita generar un modelo capaz de estimar los crecimientos de los costos de construcción de un proyecto de acuerdo al nivel de madurez BIM alcanzado por dicho proyecto.

Además, se sostiene la hipótesis de que, efectivamente, existe una relación inversa entre el nivel de madurez BIM de un proyecto y los crecimientos de los costos de construcción. Formalmente:

H_0 : La madurez BIM no tiene un efecto inversamente proporcional en el crecimiento de los costos de construcción de un proyecto.

H_1 : La madurez BIM sí tiene un efecto inversamente proporcional en el crecimiento de los costos de construcción de un proyecto.

Donde H_0 es la hipótesis nula y H_1 la hipótesis alternativa.

Para validar el modelo propuesto en términos estadísticos se debe contar con evidencia suficiente para rechazar H_0 . La manera de corroborar dicha información es tomando en cuenta el valor que muestra el p -value. Puesto de otra manera, si $p < 0,05$ existe evidencia para rechazar H_0 ; de lo contrario, si $p > 0,05$, la evidencia en contra de H_0 es débil y no se puede rechazar.

En este caso, y a pesar de lo limitada de la muestra, se tiene que $p < 0,05$, por lo que se puede decir que existe evidencia para rechazar H_0 en favor de H_1 , indicando así que existe evidencia estadística para validar la hipótesis de la relación inversa entre madurez BIM y el crecimiento de los costos.

Así, tomando en cuenta el resultado arrojado por la muestra total, el modelo representado en la ecuación (4.25) demuestra que tanto la metodología como el indicador de madurez propuesto es una buena manera de estimar el crecimiento de los costos de construcción de un proyecto.

Sin embargo, y a pesar de que si bien el resultado de la muestra total se condice con

lo esperado en teoría, ha de tenerse en cuenta que se utilizó una muestra bastante acotada, por lo que se debe tener el cuidado pertinente si se quiere generalizar sobre este resultado. No obstante, el modelo propuesto se comporta de manera bastante apropiada y viene a validar, en términos cuantitativos, aquella *sensación* de ahorro que genera la utilización de la metodología BIM.

Conclusiones

Esta Memoria persigue, principalmente, actuar como un marco de referencia para poder estimar los beneficios económicos asociados al uso de la metodología BIM en un proyecto determinado. En consecuencia, y con el fin de poder actuar de manera independiente para adecuarse la realidad de cualquier proyecto o empresa, el método se puede dividir en las siguientes etapas:

1. Selección y tratamiento de la data.
2. Estimación de los parámetros de interés mostrados en la ecuación (4.22).

La primera etapa es tal vez la más engorrosa, dado que requiere de:

- (a) Recopilación de toda la información que pudiese ser relevante para estimar el crecimiento de los costos en la etapa de construcción.
- (b) Elegir algún *software* para el tratamiento de los datos, o bien (como es el caso de esta Memoria), generar un desarrollo interno que permite hacer la selección de la información a usarse aplicando las condiciones de transformación de la data.

Por otro, la segunda etapa depende exclusivamente del *software* o el desarrollo generado. Aquí la única dificultad que se podría experimentar es trabajar con un set de datos masivo que pueda disminuir el tiempo de procesamiento para estimar los parámetros de interés.

Una condición importante para el éxito del modelo es definir una métrica que relacione el crecimiento de los costos con el nivel de integración o madurez BIM alcanzada por el o los proyectos estudiados. Como la relación entre madurez BIM y crecimiento de los costos de construcción es inversamente proporcional, la métrica propuesta es la siguiente:

$$\text{Indicador Madurez} = \frac{\text{Madurez BIM óptima}}{\text{Nivel de madurez BIM del proyecto}}$$

Este indicador tiene la ventaja de que funciona con cualquier *rating* o evaluación de madurez BIM, ya sea una desarrollada de manera interna por alguna empresa, o bien usar alguna de las formas de evaluación que propone la literatura. Esta Memoria utiliza la matriz de evaluación de madurez propuesta por Succar (2010).

Adicionalmente, esta Memoria ha dispuesto de manera libre el código de fuente de los desarrollos tanto para la transformación de la data como para la estimación de los parámetros de interés. Dicha información se encuentra alojada en los siguientes repositorios: <https://github.com/psotou/contract-data-selection.git> (código para la transformación de la data) y https://github.com/psotou/stats_model.git (para la estimación de los parámetros).

Finalmente, y a pesar de lo acotada de la muestra con la que se contaba para este trabajo de Memoria, el modelo propuesto arrojó los siguientes resultados en términos de la ecuación propuesta (4.22) y sus parámetros de interés:

$$\hat{y}_i = -0,0746 + 0,1083 \cdot \left(\frac{4}{m_i} \right)$$

Con unos estadísticos que permiten sostener la hipótesis alternativa en que la madurez BIM efectivamente tiene un efecto inversamente proporcional en el crecimiento de los costos de construcción de un proyecto. Los estadísticos son:

Tabla 4.6: Estadísticas asociadas al coeficiente de madurez BIM $\hat{\theta}_1 = 0,1083$.

Coeficiente	error estándar	p -value	R^2
0,1083	0,022	0,015	0,893

Con lo que puede concluirse que, para la realidad de los proyectos analizados para CODELCO, el modelo podría usarse como una referencia para tener presente el nivel de crecimiento que podrían experimentar los costos de construcción de sus proyectos.

Referencias

- Banco Mundial. (2019). *Banco mundial datos*. Recuperado de <https://datos.bancomundial.org/pais/chile>.
- Barlish, K., y Sullivan, K. (2012). How to measure the benefits of BIM — A case study approach. *Automation in construction*, 24, 149–159.
- BIM Forum Chile. (2017). *Guía inicial para implementar BIM en las organizaciones*. Recuperado de https://www.academia.edu/42990150/Bc90_6_guia_inicial_para_implementar_bim_en_las_organizaciones_version_imprensa.
- BIM Forum Chile. (2019). *BIM forum Chile participará en actividad de DOUC UC*. Recuperado de <https://www.bimforum.cl/2017/04/28/bim-forum-chile-participara-en-actividad-de-duoc-uc/>.
- Cárdenas, M. (2016). Incorporación de metodología bim en la gestión integrada de proyectos (tesis de maestría). *Universidad Europea. Madrid, España*. Recuperado de: bimchannel.net/wpcontent/uploads/2017/01/201701_TFM_Margarita-C%20C3%A1rdenas.pdf.
- Chang, C.-Y., y Howard, R. (2014). An economic framework for analyzing the incentive problems in building information modeling systems. En *Proceedings of academy of management annual meeting, philadelphia, usa*.
- Comisión Chilena del Cobre. (2018). *Inversión en la minería chilena - cartera de proyectos 2018 - 2027*.
- Corporación Nacional del Cobre. (s/f). *Gestión metodología BIM*.
- Hansen, B. (2018). *Econometrics*.
- Librería Nacional BIM. (2018). *Qué es BIM*. Recuperado de <http://www.librerianacionalbim.cl/que-es-bim/>.

- Lu, W., Peng, Y., Shen, Q., y Li, H. (2012). Generic model for measuring benefits of BIM as a learning tool in construction tasks. *Journal of Construction Engineering and Management*, 139(2), 195–203.
- National Building Information Model Standard Project Committee. (2019). *What is BIM?* Recuperado de <https://www.nationalbimstandard.org/faqs#faq1>.
- NBS. (2018). *National BIM report*.
- Planbim. (2019). *Qué es planbim*. Recuperado de <https://planbim.cl/que-es-planbim>.
- Saldías, R. O. L. (2010). Estimación de los beneficios de realizar una coordinación digital de proyectos con tecnologías BIM.
- Succar, B. (2010). Building information modelling maturity matrix. En *Handbook of research on building information modeling and construction informatics: Concepts and technologies* (pp. 65–103). IGI Global.
- Tabilo Vallade, M. I. (2019). Estudio de la metodología bim en la gestión de construcción y aplicación demostrativa.
- Trejo Carvajal, N. A. (2018). Estudio de impacto del uso de la metodología bim en la planificación y control de proyectos de ingeniería y construcción.
- Verbeek, M. (2004). *A guide to modern econometrics*. John Wiley & Sons.