

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**“PLANIFICACIÓN DE UN PROYECTO DE EDIFICACIONES  
UTILIZANDO MODELOS BIM 5D Y LÍNEAS DE FLUJO”**

Tesis para optar el título de **Ingeniero Civil**, que presenta el bachiller:

**JUAN CARLOS SUÁREZ CABELLOS**

Asesor

**JAIME FRANCISCO ZAPATA CARREÑO**

Lima, octubre del 2019

## RESUMEN

Los métodos de planificación en la industria de la construcción evolucionan constantemente. Últimamente, se ha desarrollado el *Location Based Management System (LBMS)*, el cual es una metodología que optimiza la planificación y el control basando toda la información del proyecto en locaciones jerarquizadas; además, el *Building Information Modelling (BIM)* es una metodología que tiene múltiples dimensiones de aplicación en proyectos de construcción, donde destaca el BIM 5D, que integra las cuantías (3D) con información del plazo y costo. Las ventajas de aplicación de ambas metodologías han sido discutidas ampliamente en textos académicos; sin embargo, no se han aplicado extensamente en Perú. Así, en la presente investigación se planificará la fase de estructuras de un proyecto de edificaciones utilizando un modelo BIM 5D, con base en el Sistema de Locaciones, que mejore la visualización, automatización y confiabilidad de los cronogramas y reportes de costo. Para obtener los resultados se elaborará un modelo 3D de la fase de estructuras mediante el software Revit 2018, un modelo BIM 5D con el software Vico Office R6.7, y cronogramas de planificación mediante líneas de flujo utilizando el software Schedule Planner (vinculado a Vico Office). Se concluyó que el modelo BIM 5D planificado con base en el LBMS mejora la visualización de cronogramas, automatiza la elaboración de reportes de costos y plazo, y optimiza la confiabilidad de la planificación; además, se determinó que existe una sinergia entre la teoría del Sistema de Locaciones con los reportes de Valor Ganado, y una sinergia entre el modelo BIM 5D con el Sistema de Locaciones; finalmente, se deduce que las líneas de flujo influyen en el marco legal respecto al control de atrasos en obra.

## TABLA DE CONTENIDOS

CAPITULO 1: GENERALIDADES .....	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. OBJETIVOS .....	5
1.3. METODOLOGÍA DEL TRABAJO .....	6
1.4. ALCANCE .....	9
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	10
2.1. LOCATION BASED MANAGEMENT SYSTEM.....	10
2.1.1. Antecedentes del Sistema de Locaciones.....	10
a.Introducción. ....	10
b.Conceptos.....	12
2.1.2. Sistemas de planificación basada en locaciones. ....	13
a.Location Breakdown Structure (LBS).....	14
b.Visualización con líneas de flujo. ....	14
c.Estructura lógica del Sistema de locaciones.....	15
d.Proceso de planificación de cronogramas. ....	17
2.2. BUILDING INFORMATION MODELING .....	18
2.2.1. Introducción. ....	19
2.2.2. Dimensiones del BIM. ....	21
2.2.3. Sinergia LBMS – BIM.....	21
2.3. LAST PLANNER SYSTEM .....	23
2.3.1. Conceptos.....	23
2.3.2. Herramientas .....	25
CAPÍTULO 3: CASO DE ESTUDIO.....	27
3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	27
3.1.1 Información General del proyecto. ....	27
3.1.2. Consideraciones de Construcción y Planificación. ....	28
3.1.3. Documentos de planificación del plazo y costo del proyecto. ....	29
3.1.4. Flujo de la información de la planificación. ....	32
3.2. DEFINICIONES PREVIAS .....	35
3.2.1. Definiciones Previas en Plazo.....	35
3.2.2. Definiciones Previas en costo. ....	40
3.3. SECTORIZACIÓN.....	42
3.4. ELABORACIÓN DE MODELO 5D.....	45

3.4.1. Modelo 3D: Revit 2018. ....	45
3.4.2. Modelo 5D: Vico Office. ....	48
a.Elaboración del modelo 5D.....	48
b.Elaboración de Líneas de Flujo.....	50
c.Consideraciones en el modelo 5D.....	56
CAPITULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	58
4.1. RESULTADOS .....	58
4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	73
4.2.1. Modelo 5D .....	73
4.2.2. Plazo y Líneas de Flujo.....	74
4.2.3. Costos.....	80
4.2.4. Flujo de la información.....	85
CAPITULO 5: RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES.....	88
5.1. RECOMENDACIONES .....	88
5.2. CONCLUSIONES.....	90
FUENTES CITADAS.....	99

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 2.1</b> Línea de flujo de dos tareas, es posible ver oportunidades de optimización, secuencia de trabajo y la ruta crítica (Adaptado de Seppänen, 2017) .....	15
<b>FIGURA 2.2</b> Línea de flujo ilustrando diferentes capas de lógica (Adaptado de Seppänen, 2017) .....	17
<b>FIGURA 2.3</b> (a) Línea de flujo de un edificio de 6 pisos con ratios no sincronizados (Seppänen, 2017)	
(b) Cronograma con líneas de flujo balanceadas y con buffers incorporados (Seppänen, 2017) .....	18
<b>FIGURA 2.4</b> Integración del modelo BIM 5D con el LBMS (Adaptado de Trimble, 2014) .....	23
<b>FIGURA 3.1</b> Área de influencia de las Torres grúas en el proyecto .....	28
<b>FIGURA 3.2</b> Extracto del Cronograma de Obra.....	31
<b>FIGURA 3.3</b> Curva S del Cronograma Valorizado del proyecto .....	31
<b>FIGURA 3.4</b> Flujo de la información en la etapa de Pre-Construcción utilizado en el proyecto .....	33
<b>FIGURA 3.5</b> Flujo de la información en la Etapa de Pre-Construcción y Construcción utilizado en el proyecto .....	34
<b>FIGURA 3.6</b> Nivel 1 de desglose por locaciones .....	36
<b>FIGURA 3.7</b> Desglose por locaciones .....	36
<b>FIGURA 3.8</b> Desglose por locaciones en muros de sostenimiento. ....	37
<b>FIGURA 3.9</b> Distribución de Sectores por Bloques en cimentación.....	43
<b>FIGURA 3.10</b> Distribución de Sectores por Bloques en Sótano. ....	43
<b>FIGURA 3.11</b> Distribución de Sectores por Bloques en Piso Superior.....	43
<b>FIGURA 3.12</b> División por sectores del Anillo 7.....	44
<b>FIGURA 3.13</b> Modelado de cimentación, subestructuras y superestructura en Revit 2018.....	45
<b>FIGURA 3.14</b> Nombre detallado de Muro Perimetral en Revit. ....	46
<b>FIGURA 3.15</b> Consideraciones de corte de elementos verticales y horizontales. ....	46

<b>FIGURA 3.16</b> Modelado de relleno según situación en obra. ....	47
<b>FIGURA 3. 17</b> Modelo de tierra y concreto en estructuras de sostenimiento.....	47
<b>FIGURA 3.18</b> Mediciones según Losas modeladas en todo el proyecto. ....	48
<b>FIGURA 3.19</b> Desglose de locaciones por piso en Vico Office. ....	48
<b>FIGURA 3.20</b> Proceso de vincular las mediciones del modelo 3D al presupuesto. ....	49
<b>FIGURA 3.21</b> Proceso de vincular el presupuesto (con mediciones relacionadas) a los grupos de Tareas.....	49
<b>FIGURA 3.22</b> Líneas de flujo sin dependencias ni ajuste de pendientes.....	51
<b>FIGURA 3.23</b> Tareas de cimentaciones con líneas balanceadas a partir del backbone.....	52
<b>FIGURA 3. 24</b> Dependencias Tipo 1 en la planificación de cimentaciones del proyecto. ....	52
<b>FIGURA 3. 25</b> Dependencias Tipo 2 en la planificación de la locación de Techo del proyecto.....	53
<b>FIGURA 3.26</b> Dependencias Tipo 3 en la planificación de la locación de Sótano 1. ....	53
<b>FIGURA 3.27</b> Dependencias Tipo 4 en la planificación del Relleno. ....	53
<b>FIGURA 3.28</b> Buffers de tiempo y Locación. ....	54
<b>FIGURA 3.29</b> Áreas Verticales e Hito en Líneas de Flujo de subestructura. ....	55
<b>FIGURA 3.30</b> Tareas Discontinuas por día en calzaduras.....	56
<b>FIGURA 4.1</b> Extracto del Cronograma Maestro de la fase de casco estructural del proyecto utilizando Líneas de Flujo.....	60
<b>FIGURA 4.2</b> Planificación por Fases de la etapa de cimentaciones del proyecto con detalle por grupos de partidas utilizando Líneas de Flujo. ....	61
<b>FIGURA 4.3</b> Planificación por Fases de la etapa de Cimentaciones del proyecto con detalle por partidas utilizando Líneas de Flujo.....	62
<b>FIGURA 4.4</b> Planificación por Fases de la etapa de Pórtico Inferior del proyecto con detalle por partidas utilizando Líneas de Flujo.....	63
<b>FIGURA 4.5</b> Planificación por Fases de la etapa de Pórtico Superior del proyecto con detalle por partidas utilizando Líneas de Flujo. ....	64

<b>FIGURA 4.6</b> Planificación de la etapa de Calzaduras del proyecto utilizando Líneas de Flujo.....	65
<b>FIGURA 4.7</b> Anillo 7 y 8 de la Planificación en la etapa de Calzaduras del proyecto utilizando Líneas de Flujo. ....	66
<b>FIGURA 4.8</b> Planificación del proyecto con barras Gantt.....	67
<b>FIGURA 4.9</b> Captura de la Simulación 4D de la planificación del proyecto. ....	67
<b>FIGURA 4.10</b> Gráfica de recursos de Mano de Obra de todo el proyecto con detalle Semanal .....	68
<b>FIGURA 4.11</b> Histograma acumulado planificado de Acero de refuerzo por ejecución (toneladas) y costo (soles) con detalle mensual para todo el proyecto. ....	68
<b>FIGURA 4.12</b> Histograma acumulado planificado de Encofrado por ejecución (metros cuadrados) y costo (soles) con detalle mensual para todo el proyecto. ....	69
<b>FIGURA 4.13</b> Histograma acumulado planificado de Concreto por ejecución (metros cúbicos) y costo (soles) con detalle mensual para todo el proyecto. ....	69
<b>FIGURA 4.14</b> Histograma acumulado planificado de Horas Hombre de Operarios (HH) con detalle mensual para todo el proyecto. ....	70
<b>FIGURA 4.15</b> Histograma acumulado planificado de Concreto por ejecución (metros cúbicos) con detalle semanal para las partidas de Cimentaciones. ....	70
<b>FIGURA 4.16</b> Histograma acumulado planificado de Concreto por ejecución (metros cúbicos) con detalle semanal para las partidas de Pórtico Inferior. ....	71
<b>FIGURA 4.17</b> Histograma acumulado planificado de Concreto por ejecución (metros cúbicos) con detalle semanal para las partidas de Pórtico Superior. ....	71
<b>FIGURA 4.18</b> Histograma acumulado del Cronograma de Avance de Obra elaborado a partir del Modelo BIM 5D.....	72
<b>FIGURA 4.19</b> Diagrama comparativo de Costo Directo obtenido a partir del modelo 5D respecto al Presupuesto contractual. ....	72
<b>FIGURA 4.20</b> Locación Piso 1 delimitada en el modelo 5D.....	73
<b>FIGURA 4.21</b> Falta de Uniformidad en líneas de flujo por diferencia de metrado entre sectores. ....	75

<b>FIGURA 4.22</b> Horizonte de 6 semanas resaltado en el cronograma planificado para la etapa de Cimentaciones.....	76
<b>FIGURA 4.23</b> (A) Detalle de visualización en líneas de Flujo (B) Detalle de visualización en Barras Gantt.....	77
<b>FIGURA 4.24</b> Tareas y dependencias adicionales requeridas para el detalle por localización en Diagrama Gantt.....	78
<b>FIGURA 4.25</b> Planificación con líneas de flujo discontinuas teniendo en cuenta la secuencia real en obra. ....	79
<b>FIGURA 4.26</b> Detalle Horario en líneas discontinuas.....	80
<b>FIGURA 4.27</b> Histograma de m2 de Encofrado por partidas de Losa Maciza.....	82
<b>FIGURA 4.28</b> Comparación de la Curva S del modelo BIM 5d y cronograma valorizado.....	84
<b>FIGURA 4.29</b> Flujo de información durante la etapa de Pre-Construcción para Modelo BIM 5D.....	86
<b>FIGURA 4.30</b> Flujo de información durante la etapa de Construcción para Modelo BIM 5D. ....	87

## LISTA DE TABLAS

<b>TABLA 3.1</b> Velocidades de ejecución estimadas para Bomba estacionaria y Torre grúa .....	39
<b>TABLA 3.2</b> Descripción de partidas y locación a la que corresponden en casco estructural .....	41
<b>TABLA 3.3</b> Velocidad según elementos .....	42
<b>TABLA 3.4</b> Location Breakdown Structure del proyecto y fase de Estructuras.....	44

## CAPITULO 1: GENERALIDADES

### 1.1. INTRODUCCIÓN

La construcción en el Perú es una de las industrias principales en términos de producción nacional; también, es un sector que tiene un desarrollo continuo determinado por factores como el avance físico en obras (INEI, 2018). Esta industria está creciendo a un ritmo muy acelerado; por ejemplo, en términos de consumo interno de cemento, se ha reportado una variación positiva del 11.9% respecto al 2018 (INEI, 2019); adicionalmente, existe un aumento continuo en la complejidad de estructuras, en la demanda de calidad y en la exigencia de plazos ajustados. Debido a las condiciones descritas en la industria, existe una demanda creciente por mejorar la eficiencia en las obras de construcción; lo que, a su vez, presiona a contratistas y clientes a adoptar nuevas metodologías, tecnologías y modelos de construcción que les brinden una ventaja competitiva (Trimble Buildings, 2014). Entre las principales metodologías de construcción desarrolladas en empresas constructoras se encuentra el *Building Information Modeling* y *Lean Construction*; las cuales basan la planificación en el método de la Ruta Crítica.

El *Building Information Modeling* consiste en el desarrollo de un proceso integrado aplicado a la industria de la construcción que gestiona la información en diversas fases, este sistema mejora la visualización y comunicación de herramientas del *Last Planner System* (Huatuco Rodríguez, 2017). La metodología es muy difundida en el medio de la construcción, donde existen especificaciones desarrolladas para la adopción y guía universal en proyectos (BIMForum, 2018); además, existen diversas asociaciones que respaldan la metodología contribuyendo a su desarrollo (*Building Information Modeling for Masonry*, ACG of America, *The American Institute of Architects*, Comité BIM del Perú). Respecto al ámbito de

construcción peruano, el inicio del uso de la metodología BIM se da en el año 2010, aproximadamente; desde este la adopción de la metodología ha evolucionado constantemente. En el año 2017 se muestra que 1 de cada 4 proyectos de edificación ha tenido algún uso de BIM a cargo de la mediana y gran empresa; respecto a la etapa de adopción, se ha determinado que el 61% de proyectos inicia el uso de BIM en la etapa de diseño, 19% en la etapa de licitación y 20% durante la construcción de obra (Murguía, 2017). Sin embargo, la adopción de este sistema en la etapa de construcción tiene un enfoque, en su gran mayoría, que limita el alcance al modelado 3D con el fin de detectar incompatibilidades y mejorar la visualización del proyecto (Murguía, 2017); este enfoque debe ampliarse para entender que la metodología, en la etapa mencionada, tiene muchas más capacidad como, por ejemplo, integrar información como costos, plazos y cuantías.

El sistema *Lean Construction* tiene como principal filosofía reducir pérdidas y aumentar valor en el desarrollo de proyectos. Para lograr dicho objetivo se han desarrollado diversas herramientas de planificación y programación, entre las cuales se encuentra el *Last Planner System*, que es, probablemente, una de las metodologías más utilizadas en nuestro medio por empresas constructoras que comienzan la adopción de la filosofía *Lean construction* (Orihuela, Canchaya, & Rodríguez, 2015). Las razones para la utilización del *Last Planner System* son variadas, entre estas destaca la reducción de la duración de proyectos, creación de cronogramas predecibles y mejora en el proceso de producción (Mossman, 2015). El *Last Planner System* tiene, a su vez, herramientas y metodologías para lograr aumentar el valor en proyectos; sin embargo, el desarrollo de estas se da utilizando medios muy simples (planos 2D y hojas de cálculo), los cuales, en muchos casos, no responden con la eficiencia esperada ante proyectos de amplia diversidad y excesivo manejo de datos. Las principales herramientas que integran el sistema *Last Planner* son las siguientes: Cronograma Maestro, Programación por Fases,

Lookahead, Programa Semanal y Programa Diario; las dos primeras se consideran herramientas de planificación a largo plazo debido al amplio horizonte de tiempo que abarcan; además, son las herramientas que determinaran las fechas importantes y el ritmo al cual debe avanzar un proyecto para completar lo solicitado contractualmente; sin embargo, estas no se elaboran con frecuencia en los proyectos, los cuales sólo se basan en un Master Plan que abarca todas las partidas del proyecto. Tradicionalmente el Master Plan de las obras de construcción se realiza mediante el Método de la Ruta Crítica, usando diversos programas de computación especializados como: *Primavera Project Planner* y *Microsoft Project* (Orihuela & Estebes, 2013). En el Perú se han hecho investigaciones implementando Last Planner System relacionándolas con otras áreas de soporte tales como seguridad, calidad, entre otras (Arteta, 2015; Villagarcía, 2011; Brioso, 2017; Brioso, 2013).

La técnica de la Ruta Crítica tiene una aplicación muy diversificada, es a partir de esta que se elaboran los cronogramas a base de barras Gantt, que son una obligación contractual en el ámbito público y privado; sin embargo, la elaboración del Master Plan de obra, a base de barras Gantt, se ha limitado a un control en base a hitos dentro de la construcción; en otras palabras, sólo se recurre a ellos para advertir que la fecha actual del proyecto se acerca a algún hito establecido contractualmente. En base a resultados empíricos en la investigación de Kenley & Seppänen, 2010 se indica que en la construcción existen diversos cambios que hacen que el uso de fechas e hitos para el control de obra se vuelva perjudicial para el proyecto; con esto se llega a establecer un control *PUSH* en obras; sin embargo, este control no tiene en cuenta la situación actual de la producción en obra (Orihuela & Estebes, 2013). Así, en diversos países se ha diversificado el uso de una nueva metodología que brinda horizontes claros a la planificación, reduce su variabilidad a niveles que el Lean no podría alcanzar como herramienta

individual, y brinda pronósticos de futuros problemas de producción, este es el *Location Based Management System* (LBMS).

El *Location Based Management System* (Sistema de Locaciones) es conocido como un sistema técnico de planificación y control que optimiza la estructuración y visualización de la información mediante cronogramas basados en líneas de flujo, este presenta información estructurada que mejora la calidad de la planificación (Seppänen, Ballard, & Pesonen, 2010). El sistema ha sido desarrollado principalmente en Finlandia por la empresa Skanska, siendo adoptado en principales países como Estados Unidos. Así, esta metodología es adoptada para la planificación de cronogramas maestros, programaciones por fases y seguimiento semanal. En el Perú se han hecho algunas investigaciones usando LBMS (Brioso et. al, 2016; Brioso et al. 2017 a). Sin embargo, el potencial de la herramienta consiste en complementar las líneas de flujo con las cuantías y costos del proyecto; por lo cual, se han desarrollado software que vinculan la información de costos, modelos 3d, cuadrillas y rendimientos, esto se conoce como BIM 5D.

Los modelos BIM 5D se diferencian por la cantidad de información que abarcan; así, mientras que los modelos 4D engloban altura, ancho, profundidad y tiempo (por ejemplo, los modelos 4D integran cantidades obtenidas de elementos, cantidades basadas en locaciones, recursos, ratios de productividad y costo de producción); los modelos 5D abarcan los objetos (con sus respectivas mediciones extraídas del modelo), costos (partidas y análisis de costo unitario), recursos y rendimientos. (Trimble Buildings, 2014)

Sin embargo, en el Perú existen muy pocos reportes académicos sobre la adopción del *Location-Based Management System* y *Building Information Modeling* (Brioso et al. 2017 b); además se conoce que son muy pocas las empresas que han adoptado el uso del BIM, entre

ellas se destaca a Graña y Montero, Cosapi, DVC y otras (Comité BIM del Perú). Cabe mencionar que en la búsqueda de bibliografía no se ha encontrado investigaciones en Perú que muestren la implementación estandarizada del Sistema de Locaciones en conjunto con los modelos BIM 5D.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **Objetivo general:**

Planificar la fase de estructuras de un proyecto de edificaciones utilizando un modelo BIM 5D con base en el Sistema de Locaciones que mejore la visualización, automatización y confiabilidad de los cronogramas y reportes de costo.

### **Objetivos secundarios:**

Desarrollar modelos de información BIM 3D para la etapa de estructuras y describir las consideraciones tomadas para facilitar la elaboración de un modelo BIM 5D.

Determinar si el Cronograma Maestro y la Planificación por Fases elaborados mediante líneas de flujo tienen el detalle demandado por la Teoría del Último Planificador.

Discutir las ventajas y limitaciones de planificar con tareas discontinuas en líneas de flujo.

Comentar la sinergia entre los cronogramas planificados, con base en el Sistema de Locaciones; y los reportes de costos, con base en la teoría del Valor Ganado.

Comentar la sinergia entre modelos BIM 5D y el Sistema de Locaciones.

Analizar la sinergia entre el modelo BIM 5D, en base al Sistema de Locaciones, y el Lookahead.

Comentar la influencia de las líneas de flujo en el marco legal del control contractual de un proyecto.

### 1.3. METODOLOGÍA DEL TRABAJO

El trabajo de investigación se llevará a cabo en ocho etapas que involucran la planificación de un proyecto de edificaciones en la fase de estructuras:

a) Revisión de la literatura: **Capítulo 2**

Se realizará la recopilación y búsqueda de información respecto al Sistema de Locaciones, desarrollo de cronogramas utilizando líneas de flujo, y elaboración de modelos BIM 5D que integren cuantías, costo y plan de obra

b) Análisis del modelo actual de planificación de costo y plan: **Capítulo 3.1**

Se recopilará la información respecto a la planificación del plazo y costo del proyecto, esta será analizada para detectar cómo el modelo propuesto puede mejorar el flujo de la información respecto a la planificación del proyecto. Las herramientas a analizar son las siguientes: Presupuesto, Análisis de Costos Unitarios, Cronograma de Obra, Cronograma de Avance de Obra, Resultados Operativos y Cronogramas de Planificación.

c) Consideraciones para la planificación del proyecto usando Líneas de flujo y modelos 5D: **Capítulos 3.2 y 3.3**

En primer lugar, se especificará el alcance en plan y costo de la investigación, luego se recopilarán las principales restricciones y se analizarán los cuellos de botella de las fases de casco estructural y estructura de sostenimiento, esto con el fin de determinar

la velocidad de ejecución estimada. Finalmente, a partir de las mediciones totales y velocidad de ejecución planificada, se determinará el número de sectores.

d) Elaboración de modelos 3D: **Capítulo 3.4.1**

Se desarrollarán dos modelos 3D en el proyecto de edificaciones, mediante el software Revit 2018. El primer modelo representará la información del proyecto en la etapa de casco estructural y el segundo representará la etapa de estructura de sostenimiento.

e) Elaboración del modelo 5D y de las Líneas de Flujo: **Capítulos 3.4.2 y 4.1**

Utilizando el modelo 3D del casco estructural e información del proyecto en la fase de estructuras, se elaborará el modelo 5D que vincula el presupuesto, recursos, rendimientos, cuantías y tareas para la fase mencionada; además, se desarrollarán tres cronogramas: Cronograma Maestro y Planificación por Fases, mediante líneas de flujo, y un diagrama Gantt; los cronogramas tendrán un detalle semanal. También se elaborará una planificación de la etapa de muros de sostenimiento para comparar las consideraciones y resultados de una planificación con líneas de flujo.

f) Elaboración de reportes de costos: **Capítulo 4.1**

A partir de la planificación mediante líneas de flujo se obtendrán reportes de consumo de los recursos principales, de la fase de estructuras, como horas hombre, m<sup>3</sup> de concreto, m<sup>2</sup> de encofrado y kg de acero; estos se complementarán con las gráficas de costos correspondientes. Además, se desarrollará un Cronograma de Avance de Obra compatible con el modelo BIM 5D.

g) Discusión de resultados: **Capítulo 4.2**

Se analizarán y compararán las líneas de flujo obtenidas mediante el modelo BIM 5D para toda la etapa de estructuras respecto a los cronograma contractuales del proyecto. El análisis se centrará en la visualización de tareas y planificación de flujos de trabajo, cuadrillas y rendimientos respecto al Cronograma del Proyecto (documento contractual elaborado en base a barras Gantt). Adicionalmente, se analizarán las diferentes consideraciones en la representación de flujos y localizaciones en el cronograma a base de líneas de flujo en las etapas de casco estructural y estructuras de sostenimiento. Finalmente, se analizará los reportes de recursos (mano de obra, concreto, acero y encofrado) y el Cronograma de Avance de Obras del modelo BIM 5D.

h) Conclusión y recomendaciones: **Capítulo 5**

Mediante lo obtenido se elaborarán recomendaciones respecto al modelo 3D, modelo 5D, limitaciones de alcance y estimación de producción diaria. Se elaborarán conclusiones respecto a la mejora de la visualización, automatización y confiabilidad de los cronogramas y reportes del proyecto, la capacidad de detalle de las líneas de flujo demandada por las herramientas del Último planificador, las ventajas y limitaciones de planificación con líneas discontinuas, la sinergia entre líneas de flujo y reportes del valor ganado, la sinergia entre modelos BIM 5D y el Sistema de Locaciones, y, finalmente, la influencia de las líneas de flujo en el marco legal del control contractual.

#### **1.4. ALCANCE**

En la presente investigación se desarrollarán modelos BIM 5D, cronogramas con líneas de flujo y reportes de recursos para un proyecto de edificaciones en Lima. Se analizará la fase de estructuras del proyecto, que engloba las etapas de casco estructural y estructuras de sostenimiento. Respecto etapa de casco estructural, se analizarán documentos contractuales como el presupuesto, análisis de costos unitarios, Cronograma de obra (Gantt) y planos de diversas especialidades; además, otros documentos internos (no contractuales) utilizados para planificar y controlar los costos, como el Cronograma de Avance de Obra (CAO) y Resultados Operativos. A partir de estas herramientas, se elaborarán modelos 3D, modelos BIM 5D, líneas de flujo, gráficas de recursos, cronograma de avance obra y simulación 4D; las líneas de flujo se utilizarán para elaborar un Cronograma Maestro y una Planificación por Fases. Respecto a la etapa de estructura de sostenimiento, se analizará documentos contractuales como el análisis de costos unitarios (para el rendimiento de cuadrillas), cronograma Gantt y planos de estructuras; a partir de estas, se elaborará un modelo 3D, un modelo BIM 4D y la Planificación por Fases usando líneas de flujo con tareas discontinuas.

En resumen, en la presente investigación se desarrollarán las principales herramientas de planificación del costo y plazo del proyecto durante la etapa previa a la construcción del mismo, para esto se elaborará un modelo BIM 5D con base en la teoría del Sistema de Locaciones; así, este modelo englobará toda la información referente a: modelo 3D, recursos, costos y rendimientos del proyecto. No se profundizará en las herramientas de control utilizadas en la etapa de Construcción, pero se tiene como alcance mencionarlas y describir las ventajas de automatización, seguimiento y pronóstico que se obtienen al trabajar a partir del modelo mencionado.

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

En la presente investigación se desarrollarán conceptos generales de tres sistemas: *Location-Based Management System (LBMS)*, *Building Information Modeling (BIM)* y *Last Planner System (LPS)*; además, se desarrollarán conceptos de la sinergia entre el LBMS y BIM.

### 2.1. LOCATION BASED MANAGEMENT SYSTEM

El *Location Based Management System* o “Sistema de Locaciones” es una herramienta técnica de planificación y control de proyectos en construcción que basa su desarrollo en dos principales conceptos: locaciones y tasas de producción (locación/día).

#### 2.1.1. Antecedentes del Sistema de Locaciones.

##### a. *Introducción.*

El antecedente directo del método de locaciones es la planificación con Líneas Balance, estas fueron descritas en 1968 por Lumsden quien se basó en el método de planificación y control desarrollado por la Marina de los Estados Unidos. En el desarrollo de las Líneas balance se consideró modelar el proyecto como un proceso constructivo donde se representaba las tareas mediante líneas inclinadas, en las cuales el eje vertical representaba el número de unidades repetitivas producidas y el eje horizontal representa las fechas; se dibujaban, además, dos líneas, una de inicio y otra de fin de obra (Lumsden,1968).

En el año 1979, Mohr en su reporte llamado *Project management and control* muestra el concepto y desarrollo de las líneas de flujo, estas se elaboran como una representación de los movimientos de cuadrillas y cada tarea es ilustrada por una línea inclinada, este método fue una herramienta, en gran parte, visual; por ende, no tenía muchas consideraciones técnicas y se utilizaba mayormente para la visualización de cronogramas.

En base a los antecedentes de Líneas de flujo y Líneas balance, en 1998 se reportó la primera utilización de métodos basados en locaciones en un proyecto, específicamente en la construcción del edificio Empire State en Estados Unidos. La empresa Starrett Brothers se hizo cargo de la construcción de los 102 pisos en un tiempo récord de 18 meses, teniendo una tasa de producción aproximada de 1 piso por día; además, respecto a costos, siempre estuvo bajo el presupuesto meta en estructuras. Se reportó que utilizaron un método que se basó en trabajo repetitivo, en un flujo continuo y en lograr línea de montaje de producción; sin embargo, el método, al igual que lo enunciado por Mohr, solo se utilizó para la visualización y no tuvo una base analítica con sustento de cálculos en el mismo. El método basado en locaciones se reportó primero como una herramienta de planificación, teniendo su aparición en la IGLC (2003) de la mano de los investigadores *Kankainen* y *Seppänen*, quienes desarrollaron el artículo “A line-of-balance based schedule planning and control system”. No sería hasta 2009 cuando *Seppänen* en su tesis doctoral “Empirical research on the success of production control in building construction projects” incorporó las herramientas de control al sistema de locaciones.

A partir de este punto, se ha ido desarrollando la metodología como un sistema que maneja herramientas de planificación y control. *Olli Seppänen* es el principal investigador de este método, él desarrolla artículos académicos que muestran la influencia en las medidas de control y productividad al implementar herramientas de control del sistema basado en locaciones en diversos proyectos (Seppänen, Evinger, & Mouflard, 2014). El método de locaciones también ha ido evolucionando al adaptarse a otros sistemas; se ha integrado, principalmente, al Last Planner System, el cual, con sus herramientas orientadas a la colaboración en equipo, complementa el aspecto técnicas del sistema de locaciones (Seppänen, Ballard, Pesonen, 2010).

**b. Conceptos.***Locaciones.*

Son la unidad fundamental de la planificación y control. Se definen como contenedores lógicos para la información del proyecto; además, permanecen fijas y son fáciles de monitorear (Kenley & Seppänen, 2010). Dentro de un proyecto se puede considerar como locaciones a las torres, pisos, bloques o sectores.

*Líneas de Flujo.*

Es un método de visualización a través del cual se representa las tareas mediante líneas inclinadas en un plano con un eje horizontal (X) y uno vertical (Y). El eje horizontal representa el tiempo en días y el eje vertical representa las locaciones. Además, la pendiente de las líneas muestra los índices de productividad; por lo cual, la variación del rendimiento o del número de cuadrillas lleva a una variación en la inclinación de las líneas. Así, las barras Gantt pueden incluir miles de actividades en docenas de páginas; en cambio, las líneas de flujo pueden representar largas fases de construcción en un solo diagrama (Seppänen, 2017).

*Método basado en actividades.*

Los métodos basados en actividades son los precursores de los métodos basados en locaciones, estos desarrollan las actividades como el principal elemento de planificación. Para la implementación de estos métodos se comienza utilizando una Estructura de Descomposición del Trabajo, donde se descompone los procesos en diferentes subprocesos, y estos, a su vez, en actividades. Muestran, además, las holguras y Ruta crítica del proyecto a través de duraciones.

Los principales problemas que presenta este sistema son los siguientes: 1) La Estructura de Descomposición del Trabajo se basa en actividades, las cuales se pueden repetir en diferentes instancias y ubicaciones del proyecto; por tanto, en un proyecto real estos métodos

incluyen miles o cientos de actividades repetidas en la lógica de su estructura (Kenley, 2005). Lo descrito dificulta el seguimiento de las actividades; convirtiendo, así, a las herramientas basadas en actividades en un elemento protocolar que solo aporta a la visualización temporal.

2) El sistema muestra la ruta crítica pero este no implementa herramientas de control, lo que genera que estos métodos se basen en reaccionar ante una desviación de la ruta (Seppänen, 2017); en otras palabras, no permiten prevenir ante posibles problemas de producción.

#### *Métodos basados en locaciones.*

Son métodos que transforman cantidades en locaciones y utilizan estas como unidad básica de control y planificación. Las ventajas del sistema basado en locaciones, respecto a los métodos basados en actividades, consisten en lo siguiente: 1) se combina trabajo similar en diferentes locaciones, lo que resuelve la complejidad de los métodos basados en actividades (Kenley, 2005); 2) las tareas van fluyendo de modo continuo a través de locaciones: así, estas pueden usarse para planificar un “trabajo continuo” que, a su vez, incrementa efectos de aprendizaje y productividad; 3) y permite, por medio de indicadores de producción, realizar el control y pronósticos del estatus de producción.

#### **2.1.2. Sistemas de planificación basada en locaciones.**

Es un sistema técnico de planificación que basa su visualización y control en las líneas de flujo; además, tiene algoritmos que disponen la lógica entre tareas. Esta metodología maneja 5 principales conceptos: *Location Breakdown Structure*, visualización con líneas de flujo, Lógica en capas, manejo de buffers y proceso de planificación de cronogramas.

***a. Location Breakdown Structure (LBS).***

Los métodos de planificación basados en actividades manejan una “Estructura de Descomposición de Actividades”; análogamente, los métodos basados en locaciones manejan un *Location Breakdown Structure (LBS)* traducido como “Estructura de Descomposición en locaciones”. La estructura se elabora en columnas, donde se muestra verticalmente las locaciones ordenadas a nivel jerárquico; además, se pueden ordenar de abajo hacia arriba para que se acomode a la secuencia constructiva del proyecto. Es la decisión más importante del sistema de locaciones ya que se definirá el orden jerárquico de la planificación y control del proyecto.

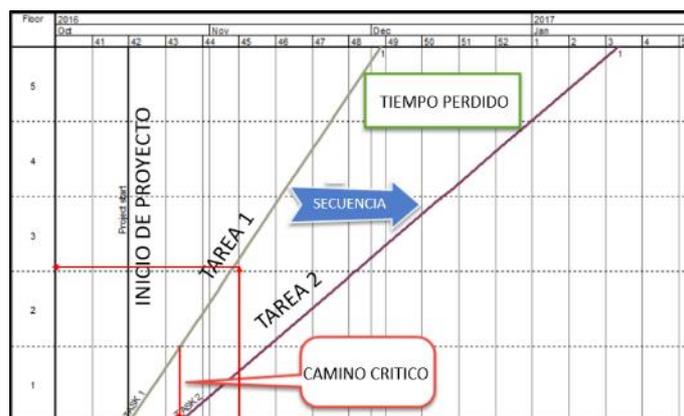
***b. Visualización con líneas de flujo.***

El cronograma se representa a partir de dos ejes: uno vertical y otro horizontal; en el primero se muestra el LBS definido; y en el segundo, el tiempo. Además, las tareas se muestran como líneas inclinadas cuya pendiente representa la tasa de producción (locación/día).

Respecto a la pendiente de las líneas, se puede decir que si existe un aumento en la dificultad o disminución de los indicadores de producción, se generará una variación de la inclinación de la línea; asimismo, si la tarea no tiene variación en factores de dificultad o producción, permanecerá con la misma pendiente de inicio a fin.

Para analizar las líneas de flujo se muestra la Figura 2.1, donde el eje Y representa el LBS; el eje X las semanas; y las tareas 1 y 2 se representan por las líneas inclinadas de color verde y morado respectivamente. Para saber en qué locación se encuentra una tarea en una fecha determinada, se traza una perpendicular desde el eje X (paralelo al eje Y) hasta intersectar la tarea deseada, luego con una línea paralela al eje X se determina la locación. La secuencia

constructiva de tareas (representada por la flecha azul) se observa analizando las líneas de flujo de izquierda a derecha en un mismo nivel de locación; además, el tiempo perdido se puede visualizar revisando los espacios vacíos entre las tareas, esto también permite identificar una oportunidad de optimización (Seppänen, 2017). Es posible observar la ruta crítica (espacios donde no hay holgura) revisando la ubicación de las tareas en un mismo día.



**FIGURA 2.1** Línea de flujo de dos tareas, es posible ver oportunidades de optimización, secuencia de trabajo y la ruta crítica (Adaptado de Seppänen, 2017)

### *c. Estructura lógica del Sistema de locaciones.*

Kenley y Seppänen (2010) desarrollaron los lineamientos para la estructuración de la lógica entre tareas, cuya creación es automatizada a través del uso de locaciones. A continuación, se explica los lineamientos de la lógica entre tareas a partir de 5 capas según lo descrito por Kenley y Seppänen (2010).

*Dependencias lógicas externas entre actividades dentro de las mismas locaciones (Capa o Tipo1):* Una relación que involucre 2 tareas se aplicará en todas las locaciones donde se ejecuten las mismas. Por ejemplo, la tarea de drywall es previa a la de acabados (como masillado), esta relación de precedencia se respetará en todas las locaciones (pisos y sectores)

donde corresponda realizar drywall; por ende, relaciona tareas en un **mismo nivel jerárquico de locación**.

*Dependencias lógicas externas conducidas por distintos niveles jerárquicos (Capa o Tipo 2):* En esta se amplía el alcance (respecto al Tipo 1) a otro nivel jerárquico (a otra locación). Por ejemplo, para ejecutar el Drywall desde un piso (nivel jerárquico 1 de locación) se debe tener ejecutado, previamente, la estructura del techo del nivel inferior; por ende, relaciona **tareas en diferentes niveles jerárquicos de locaciones**.

*Dependencia lógica interna entre locaciones dentro de tareas (Capa o Tipo 3):* Representa la secuencia del movimiento de cuadrillas entre locaciones; así, asume que las cuadrillas deben terminar toda la tarea en una locación antes de moverse a la siguiente. Por ejemplo, la cuadrilla de albañilería trabaja en todo los sectores del Piso 1 para luego pasar al Piso 2.

*Enlaces adicionales basados en ubicación (Capa o Tipo 4):* Son similares al Tipo 1 pero incluye retrasos en locaciones debido a procesos constructivos. Por ejemplo, para iniciar el relleno se tiene que las zapatas deben estar ejecutadas hasta el sector 3.

*Enlaces estándar del Método de la ruta Crítica entre cualquier tarea y diferente locación (Capa o Tipo 5):* Permite que cualquier tarea y locación sea precedida por cualquiera de otra fase o locación; esto permite enlazar diferentes **fases de la construcción**.

Los tipos de dependencias se conocen como *Layers* o Capas porque cada una amplía el alcance del tipo anterior; así, mientras la Capa 1 tiene como alcance relacionar dos partidas en una misma locación, la Capa 5 relacionará tareas entre distintas fases de construcción. En la Figura 2.2 se muestra un cronograma usando línea de flujo con varias tareas, en este se especifica las Capas o enlaces de lógica entre tareas.

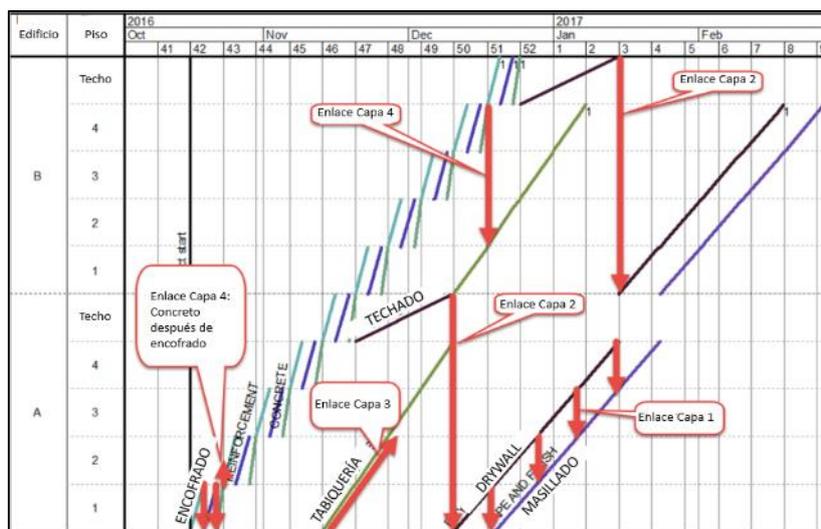


FIGURA 2.2 Línea de flujo ilustrando diferentes capas de lógica (Adaptado de Seppänen, 2017)

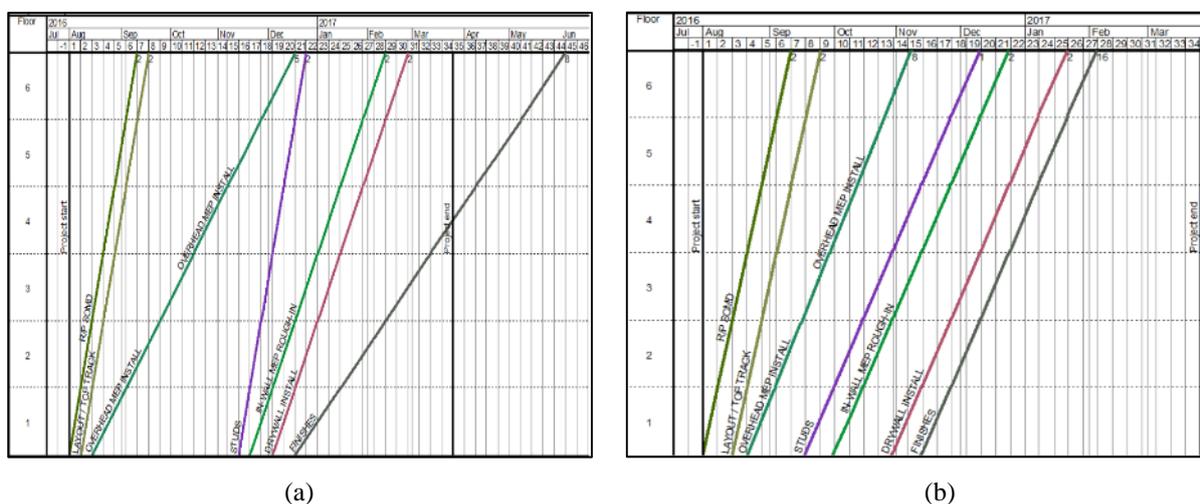
#### d. Proceso de planificación de cronogramas.

Para planificar utilizando el método de locaciones se especifica el siguiente proceso:

1) Se define la Estructura de Descomposición por Locaciones (LBS), para esto es necesario involucrar a todos los responsables debido a que futuros cambios adicionales en las locaciones generarían reprocesos. Las líneas de las tareas se trazan tomando en cuenta la pendiente que representa la tasa de producción (sector o locación /día), para esto se utiliza técnicas pull partiendo desde los hitos. En la Figura 2.3 (a) se muestra una línea por cada tarea, estas tienen diferente pendiente y relaciones. A esta etapa se le denomina **ratios no sincronizados**.

2) El cronograma con líneas de flujo es más eficiente conforme se trate de obtener líneas paralelas entre sí; por ende, se trata de balancear los ratios (por ejemplo: aumentando recursos). En la Figura 2.3 (b) se muestran las líneas de diferentes tareas estructuradas de forma paralela debido a sus ratios similares, a esta etapa se le denomina **cronograma alineado**.

3) Con el cronograma alineado es posible incorporar buffers según se crea conveniente. Los buffers se visualizan como espacios entre las líneas inclinadas, lo cual se puede evidenciar en la Figura 2.3 (b).



**FIGURA 2.3** (a) Línea de flujo de un edificio de 6 pisos con ratios no sincronizados (Seppänen, 2017)

(b) Cronograma con líneas de flujo balanceadas y con buffers incorporados (Seppänen, 2017)

## 2.2. BUILDING INFORMATION MODELING

En este capítulo se tienen 3 secciones; en primer lugar, se hará una introducción al BIM (2.2.1) donde se compilan algunas definiciones, se describe la historia de su implementación y se especifica el nivel de adopción; luego, se definirán y desarrollarán las Dimensiones del BIM (2.2.2); finalmente, se describirá la sinergia entre el *Location Based Management System* (LBMS) y el BIM (2.2.3).

### **2.2.1. Introducción.**

El término BIM es la abreviación de *Building Information Modeling*, el cual hace referencia a un conjunto de metodologías, tecnologías y estándares que permiten diseñar, construir y operar un edificio o infraestructura de forma colaborativa en un modelo virtual (BIM Dictionary). Este término es desarrollado en la Industria de la construcción y se ha ido adaptando y discutiendo desde hace muchos años.

En principio se tenía la idea de modelos computacionales que den soporte a varios aspectos como el diseño y construcción; así, en 1999, Charles M. Eastman publicó un libro llamado *Building Product Models: Computer Environments Supporting Design and Construction*, en el cual compilaba y discutía extensamente los conceptos, tecnologías, estándares y proyectos que se habían desarrollado definiendo modelos de datos computacionales para soportar diversos aspectos del diseño de edificios, ingeniería y construcción (Eastman, 2011); luego, en el año 2008, el mismo autor publicaría el libro *BIM handbook A guide to building information modeling*, en este describiría ampliamente la metodología BIM y diversos procesos; aunque se considera que Charles Eastman fue quien desarrolló extensamente la metodología BIM en la industria de la construcción, este la incorporó con el término de *Building Product Model*. Jerry Laiserin fue quien acuñó el término BIM y lo popularizó.

A partir de la difusión del término BIM, su adopción en diversos proyectos fue creciendo exponencialmente, McGraw Hill Construction (2013) encontró que la adopción de BIM por profesionales en Norte América se había incrementado desde tener 17% en 2007 hasta alcanzar 71% en 2012; esta realidad no se aleja del ámbito peruano donde, en 2017, se muestra que 1 de cada 4 proyectos ha tenido algún uso de BIM a cargo de la mediana y gran empresa

(Murguía, 2017). La creciente tendencia de adopción del BIM en construcción solo se puede sustentar por el ahorro de tiempo y costo que genera en los contratistas. Además, la creciente tendencia también llama la atención del sector público, en el cual no solo se debe aplicar la metodología, sino, también, estandarizarla a un nivel que facilite la implementación y muestre claridad en las exigencias BIM por parte de distintas instituciones públicas (PlanBIM, 2019). La estandarización es una tendencia que ha ido avanzando en muchos países, de los cuales se puede nombrar a Estados Unidos y su estándar llamado *the National BIM Standard-United States (NBIM-US<sup>TM</sup>)*; Chile y el PlanBIM; y Australia con el *National BIM Guide*; además, se debe destacar al Reino Unido, en el cual se ha desarrollado, en 2011, uno de los proyectos más ambiciosos, el cual consistió en la publicación de un documento llamado “UK Government Construction Strategy” que detallaba la intención del gobierno de lograr una reducción de costos de procura en 20%. En Perú se está desarrollando actualmente un plan estandarizado y proyectos piloto que parten de casos de éxito del uso de BIM (en los que destacan los proyectos de los Juegos Panamericanos y Parapanamericanos Lima 2019).

En resumen, la metodología BIM consiste en el desarrollo de procesos integrados aplicados a la industria de la construcción, los cuales gestionan la información en fases de pre-diseño, construcción, operación y mantenimiento (Huatuco Rodríguez, 2017). Además, se puede decir que los modelos de información BIM combinan de forma inteligente modelos en tres dimensiones para hacer de estos una herramienta que permita tomar decisiones y facilitar el traspaso de información entre diferentes agentes involucrados en un proyecto de manera confiable (Kymmell, 2009). En otras palabras, se podría concluir que el BIM es un sistema que almacena y procesa información de todo tipo (tiempo, costo, recursos) basándose en un único modelo 3D; y que, además, permite que todos los procesos y reportes se generen automáticamente.

### **2.2.2. Dimensiones del BIM.**

En la metodología BIM existen diversos subconjuntos que son comúnmente descritos como dimensiones del BIM, estos subconjuntos son los siguientes: 3D (modelo del proyecto), 4D (tiempo), 5D (costo), 6D (operación), 7D (sostenibilidad), e incluso 8D (Seguridad) (Smith, 2014); Eastman et al (2008) describe esta capacidad multidimensional del BIM como “nD” modeling. Los términos más utilizados son 2D, 3D, 4D y 5D cuya definición se amplía a continuación.

**2D:** modelos cuyos objetos representan altura (Y) y ancho (X).

**3D:** modelos cuyos objetos representan altura (Y), ancho (X) y profundidad (Z).

**4D:** modelos cuyos objetos representan altura (Y), ancho (X), profundidad (Z) y tiempo. El tiempo hace referencia a que el proceso de planificación se vincula con el modelo 3D, esto ayuda a lograr una simulación real de lo que se estima en lo planificado.

**5D:** modelos cuyos objetos representan altura (Y), ancho (X), profundidad (Z), tiempo y costo. La integración de costo implica que el modelo vincula los datos de costos unitarios y partidas al modelo BIM 4D (que tiene vinculado recursos y rendimientos al modelo 3D); además, es capaz de generar automáticamente resultados (vinculados a lo planificado) respecto al valor planificado y valor ganado del proyecto; así, la ventaja principal es que se obtienen automáticamente reportes de costos compatibilizados, con poco porcentaje de error; esto tomaría horas, e incluso días, cuando se utilizan modelos sin vinculación.

### **2.2.3. Sinergia LBMS – BIM.**

En esta sección se describe la relación entre los modelos 3D y 5D; luego, se detalla la sinergia entre los modelos 5D y el LBMS.

Un elemento, como una columna, puede ser modelado como un elemento 3D, este incluye mediciones como área, volumen, altura y otras; a partir de estas mediciones, se puede obtener fácilmente (con sumas y multiplicaciones) las cuantías de acero, concreto, encofrado y acabados que tiene cada elemento. Las cuantías representan el total de trabajo a ejecutar, estas se vinculan a las partidas del proyecto y su cálculo hace posible una estimación de precio (integrando influencia de materiales, equipos y mano de obra) y duración (integrando los cronogramas). Por ende, a partir de un modelo 3D se obtiene cuantías y se vincula toda la información del proyecto respecto a tiempo y costo. Es posible complementar el aspecto del tiempo de un modelo 5D involucrando conceptos de locaciones y líneas de flujo. En un modelo 3D es posible implementar locaciones (Location Breakdown Structure LBS), esto se logra haciendo cortes en los elementos 3D. Si se tiene las locaciones, se puede saber la cantidad de trabajo a ejecutar en cada una (por ejemplo, total de encofrado por locación); luego, se elaboran líneas de flujo que tengan como base los recursos, partidas, mediciones, costos, tareas y locaciones; así, estas líneas de flujo estarán vinculadas a todo el modelo 5D; finalmente, es posible obtener reportes de costos a partir de lo planificado en las líneas de flujo. En resumen, se modela un elemento en 3D que tiene incorporado mediciones como acero, concreto, encofrado y acabados; luego, cada medición debe tener incorporada la cantidad de trabajo que demandará (equipos, mano de obra y materiales); todos estos datos se vinculan al LBS del proyecto, con lo que se tendrá la cantidad de trabajo por locación; así, se elaboran líneas de flujo y, con estas, se obtienen automáticamente reportes de costos. En la Figura 2.4 se resume la sinergia del modelo 3D y 5D con el LBMS.

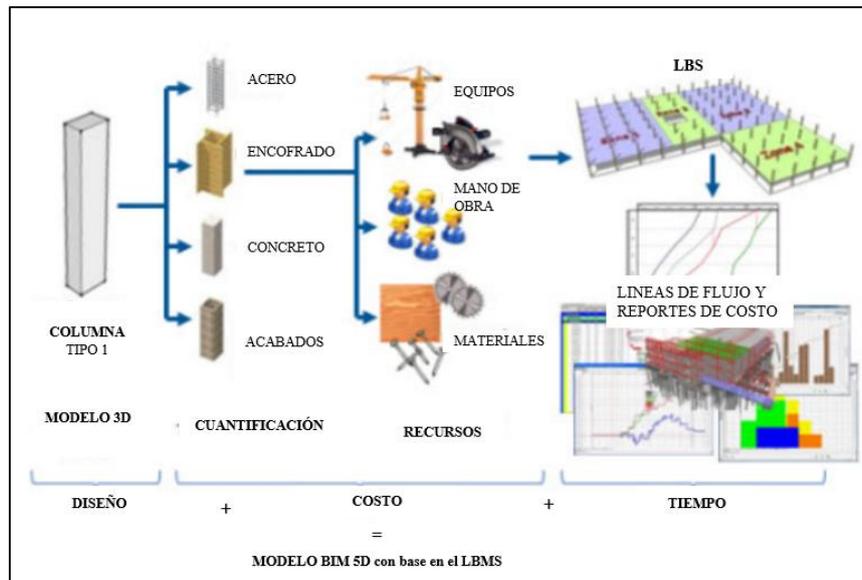


FIGURA 2.4 Integración del modelo BIM 5D con el LBMS (Adaptado de Trimble, 2014)

## 2.3. LAST PLANNER SYSTEM

### 2.3.1. Conceptos.

**Project control:** Se considera como el proceso mediante el cual se establecen costos, fechas y el alcance que tendrá el proyecto; implica, también, el monitoreo del progreso de las tareas para lograr el alcance o los objetivos.

**Production control:** (“Control de Producción”) Se considera como el proceso de “dirigir hacia los objetivos” o hacer lo posible para lograr el camino planificado; es decir, designar responsables, recursos, plazos y otros criterios que sean necesarios para ejecutar un trabajo.

**Pull Planning:** En función a los objetivos del proyecto o estatus del sistema; y, a partir de las tareas que se requieren realizar de acuerdo con la planificación, se procede a planificar desde adelante hacia atrás “jalando desde los objetivos”, con esto se logra enfocar únicamente en tareas necesarias para los obtener el resultado deseado.

**Push Planning:** Sistema que “empuja” la producción asignando el trabajo basándose en la demanda en obra (Guio, 2001).

**Restricciones:** Actividades o condiciones previas necesarias para que una tarea pueda realizarse con la calidad, tiempo y costo óptimo.

**Buffer:** Es una medida para contrarrestar los efectos negativos de la variabilidad, ya sea aumentando el tiempo de ejecución o teniendo tareas disponibles para ejecutar.

**Sectorización:** Consiste en dividir el trabajo total (pisos) en diferentes lotes (sectores) de menor cantidad, donde los recursos tengan la capacidad de ejecutar el trabajo sin contratiempos en un intervalo de tiempo definido (usualmente un día).

**Trenes de trabajo:** Método de visualización de la planificación de tareas que consiste en ordenar las actividades según su secuencia constructiva y teniendo en cuenta los lotes que se realizarán a lo largo del tiempo (Sectores).

**Last Planner System (LPS):**

Se define como un sistema de Control de Producción. Su objetivo es lograr metas que disminuyan pérdidas a través de un proceso social, en el cual planificar sea un esfuerzo colaborativo; además, mejora la fiabilidad de los compromisos de los miembros del equipos (Ballard, Hammond, & Nickerson, 2009). El sistema tiene como función lograr que el “debemos” coincida con lo que “podemos”; y, finalmente, ambos se conviertan en lo que “haremos” (Guio, 2001); esto se debe lograr través de un proceso colaborativo que integre a los “Últimos planificadores” en la toma de decisiones.

El Último Planificador se define como el o los encargados de transmitir y asignar el trabajo directamente a campo (Encargados: Ingenieros de campo, Capataces, Maestros de obra

o Jefes de grupo), se encuentran en el último nivel de planificación por lo que su función principal radica en transmitir la planificación efectivamente a los trabajadores de campo (Guzmán, 2015), entre estos trabajadores se incluye a operarios, oficiales y peones.

Es preciso mencionar que el LPS también tiene como objetivo reducir la variabilidad en proyectos; en el caso de proyectos de construcción, existe una variabilidad en las actividades que se traduce como una incertidumbre sobre el cumplimiento de una tarea a causa de sus predecesoras. Mientras más actividades predecesoras tenga una tarea, el grado de confiabilidad para su cumplimiento va a disminuir; así, este valor de confiabilidad puede ser menor al 10% en caso de tener 50 actividades predecesoras (LCI, 2012).

### **2.3.2. Herramientas.**

En esta sección se describirán dos herramientas con amplio horizonte de planificación del LPS: Cronograma Maestro y Programación por Fases.

#### **Master Schedule (Cronograma maestro):**

El Cronograma maestro se elabora durante la planificación inicial del proyecto, consiste en especificar los principales hitos del proyecto; así como, determinar las duraciones de fases y fechas de inicio y fin de cada una. El cronograma abarca toda la duración del proyecto, se presentan actividades a una escala general de detalle con un horizonte largo de planeamiento (Ballard, Howell, Tommelein, & Zabelle, 2007), esto significa que la planificación debe limitarse a un nivel de detalle por hitos, no se debe especificar procesos o generar mayor detalle debido al gran periodo de tiempo que abarca. Es usual que los hitos estén condicionados a compromisos contractuales del contratista con el cliente.

**Phase Schedule (Programación por fases):**

A partir de los hitos detallados en el Cronograma Maestro, se procede a desarrollar un nivel de detalle mayor en las fases, siendo la programación a un nivel de procesos; en estos se analizan los trabajos que deben realizarse, la lógica entre procesos (relaciones de precedencia o sucesión), las duraciones y los responsables con sus respectivos entregables.

El *Lean Construction Institute* (LCI) establece una metodología para realizar la programación con fases utilizando el pull planning, esta consiste en organizar una reunión colaborativa que involucre responsables y encargados de la toma de decisiones; en dicha reunión se tiene como regla el identificar el trabajo necesario para lograr los objetivos. La metodología propuesta por el LCI consiste en: 1) realizar una secuencia para identificar los procesos necesarios para el hito, estos se anotan en papeles y se indica los responsables de los mismos; 2) luego se debe organizar dichos procesos con una lógica de secuencia, indicando qué tarea es precedente o cuál es sucesora; 3) se determina la duración de las tareas con la experiencia de los responsables de la misma.

La siguiente etapa de la programación por fases consiste en que el equipo deberá examinar el cronograma en términos de lógica y métodos para generar la máxima holgura posible. Luego, el equipo decide cómo utilizar el tiempo de holgura, para esto puede decidir entre: 1) asignarlo a las tareas más inciertas y con mayor potencial de variación, 2) atrasar el inicio para invertir más tiempo en el trabajo más importante o para permitir que se generen las últimas actualizaciones de información, 3) acelerar la fecha de finalización de fase (Ballard et al., 2007). La Programación por Fases se puede visualizar en un Cronograma de Planificación de Fase el cual debe indicar tareas, duraciones, dependencias y recursos.

## CAPÍTULO 3: CASO DE ESTUDIO

En el presente capítulo se discutirán 4 secciones. En la Sección 3.1 se describirá la información general del proyecto, los documentos de planificación utilizados y el flujo de información desarrollado en el proyecto; a partir de la Sección 3.2 en adelante, se detallará el proceso de elaboración de los modelos para la planificación del proyecto, con estos será posible elaborar el flujo de planificación propuesto en el Capítulo 4.

### 3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

#### 3.1.1 Información General del proyecto.

El proyecto a analizar es una edificación de oficinas que está ubicada en el distrito de Cercado de Lima, este proyecto tiene un área de terreno de 4 232 m<sup>2</sup> y un área construida de, aproximadamente, 24 mil m<sup>2</sup>. El área comprende la construcción de 3 sótanos y 4 pisos superiores. Este edificio se licitó con el sistema de contratación de “Suma Alzada” y el expediente técnico fue elaborado previo al concurso y licitación del proyecto; por ende, no hubo interacción entre las etapas de diseño y construcción. Este tipo de contrato se conoce como un sistema Design-Bid-Build.

La investigación abarca la ejecución de tres principales etapas: estructuras de sostenimiento (excavación), subestructura (sótanos) y superestructura (pisos superiores); a continuación, se lista los grupos de partidas principales a planificar según las etapas mencionadas: en **Estructuras de sostenimiento**, el alcance es Excavación, Ejecución de Calzaduras, Acarreo y Eliminación; en **Subestructura**, el alcance es la construcción de Cimentación Superficial (zapatas aisladas, corridas, combinadas y conectadas), Vigas de Cimentación, Columnas, Placas, Muros Perimetrales, Vigas, Losas macizas, Escaleras y

Rampas; y en **Superestructura**, el alcance es la construcción de Columnas, Escaleras, Placas, Vigas y Losas de tipo: Aligeradas, Macizas, Nervadas y Colaborantes.

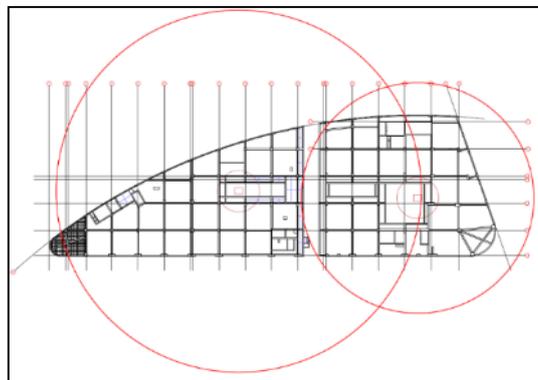
### 3.1.2. Consideraciones de Construcción y Planificación.

#### Calzaduras:

Las calzaduras se elaboran por anillos según una numeración (tipo 1,2 y 3), su proceso constructivo implica la excavación masiva, excavación de banquetas, excavación puntual, perfilado, acero, encofrado, vaciado y desencofrado. Además, se tiene una rampa de acceso en un lado de la edificación que no permitía ejecutar algunas calzaduras. Al terminar todas las actividades de calzaduras, hasta el anillo 8, se procede a retirar la rampa desde el anillo 1 completando las calzaduras que no se podían ejecutar.

#### Estructura:

Debido al área del proyecto (más de 4,000 m<sup>2</sup>) se utilizarán 2 grúas torres, las cuales, en conjunto, abarcan el terreno en su totalidad. El área de influencia de cada grúa se muestra en la Figura 3.1.



**FIGURA 3.1** Área de influencia de las Torres grúas en el proyecto

El abastecimiento del concreto será mediante un proveedor de concreto premezclado; además, el vaciado de elementos se llevará a cabo a partir de las 11 p.m. en turno noche, este tendrá una duración de 5.5 horas. La condición descrita se tiene a causa de la restricción de paso de camiones en vías durante la mañana y tarde.

### **3.1.3. Documentos de planificación del plazo y costo del proyecto.**

En esta sección se presentarán 6 documentos y reportes principales de planificación (del plazo y costo) utilizados en el proyecto.

#### ***a. Análisis de Precios Unitarios.***

Este documento contractual contiene todos los recursos que son necesarios para realizar cierta partida. Los recursos se clasifican en 4 tipos: Mano de Obra, Materiales, Equipos y Subcontratos. Cada recurso tiene una descripción completa que se complementa con la unidad de medida, rendimiento, cuadrilla, costo unitario, cantidad y costo parcial. Además, el documento tiene como concepto implícito el procedimiento constructivo a utilizar en cada partida e incluso el procedimiento en diferentes fases del proyecto; así, cuando un equipo de licitación elabora este documento se entiende que ya ha formulado la mayoría de procesos constructivos.

#### ***b. Presupuesto.***

El Presupuesto se organiza en especialidades, cada una contiene una cantidad de grupos de partidas que engloban todas las partidas del proyecto. En este documento se muestra, también, el metrado, las unidades de medida, el costo unitario y el costo parcial de cada partida; en resumen, sintetiza todas las partidas y muestra la influencia de costo de cada una en el total del proyecto. Los datos del costo unitario provienen del Análisis de Precios Unitarios.

El proyecto se ha agrupado en 4 especialidades: Estructuras, Arquitectura, Instalaciones Sanitarias, e Instalaciones Eléctricas y Mecánicas. La especialidad en análisis es Estructuras, esta representa el 36% del Costo directo del total del presupuesto donde los costos de mano de obra y materiales son de alta influencia; además, son susceptibles a ser excedidos por la cantidad de trabajo que representa cada partida (considerando que gran parte de trabajos no serán subcontratados); finalmente, se tienen 173 partidas en esta especialidad.

*c. Cronograma de Obra.*

El Cronograma de Obra es un documento contractual que muestra cómo se realizará la secuencia constructiva del proyecto a través de dependencias entre partidas, duraciones, fechas de inicio-fin e hitos. El cronograma se elabora a base de la metodología de la ruta crítica y se visualiza mediante barras Gantt. En la Figura 3.2 se muestra un extracto del cronograma, donde se identifica rápidamente la ruta crítica (barras y flechas de color rojo); sin embargo, tiene diversas desventajas; la primera es que se confunde las dependencias entre cada partida, sobre todo si estas provienen de otros grupos de partidas; además, este cronograma solo se controla por duraciones, cuando la variable principal de control debería ser los rendimientos y cuadrillas. Finalmente, no es distinguible la ubicación (piso, bloque, torre, etc.), pero si es necesario que se indique se tendría que adicionar más tareas y dependencias, lo que complicaría aún más dicho cronograma. Para representar la secuencia de las tareas del Cronograma de Obra (Figura 3.2) se han usado 212 dependencias, sólo en la etapa de estructuras y 338 en todo el proyecto.

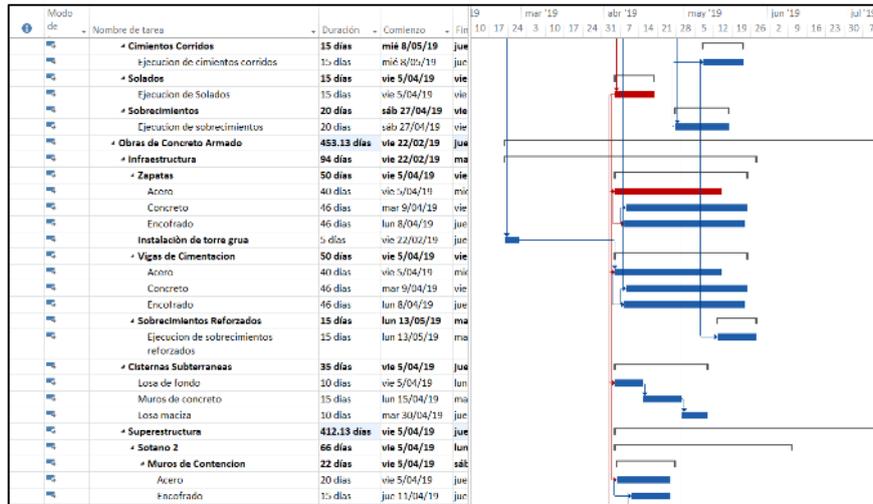


FIGURA 3.2 Extracto del Cronograma de Obra

#### d. Cronograma Valorizado de Obra.

El documento detalla, por cada partida del presupuesto, el costo por periodo de valorización (en este caso mensual); así, se obtiene un detalle mensual del Valor Planeado. Este documento se obtiene al vincular el Análisis de Precios Unitarios con el Cronograma de Obra; además, se resume en una Gráfica denominada Curva S donde el contratista muestra un acumulado de los montos ejecutables por mes en todas las especialidades. La Curva S del proyecto se muestra en la Figura 3.3.

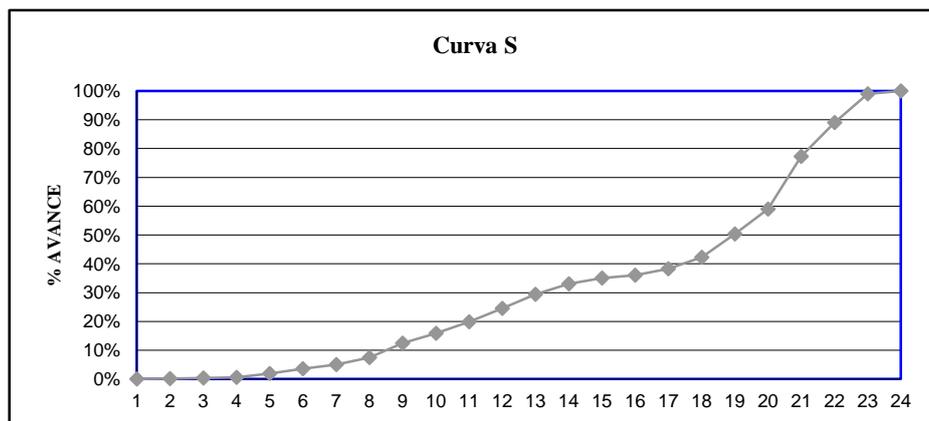


FIGURA 3.3 Curva S del Cronograma Valorizado del proyecto

***e. Cronograma de Avance de Obra (CAO).***

Es un reporte interno del contratista que muestra el costo por partida organizado por periodo de valorización (mensual), similar al Cronograma Valorizado de Obra, pero en este documento se muestra el Valor Ganado (*Earn Value*) que se actualiza mensualmente. Además, según el valor ganado actual se proyecta el saldo del Valor Planeado.

En el proyecto es usual actualizar las proyecciones del CAO con poca precisión en el mes siguiente (a corto plazo) porque no se tiene las herramientas suficientes para determinar cómo avanzará el proyecto basándose en cifras de producción actual; además, a largo plazo la poca precisión es aún más significativa cuando la planificación del proyecto solo se basa en fechas de inicio-fin e hitos.

***f. Resultados Operativos.***

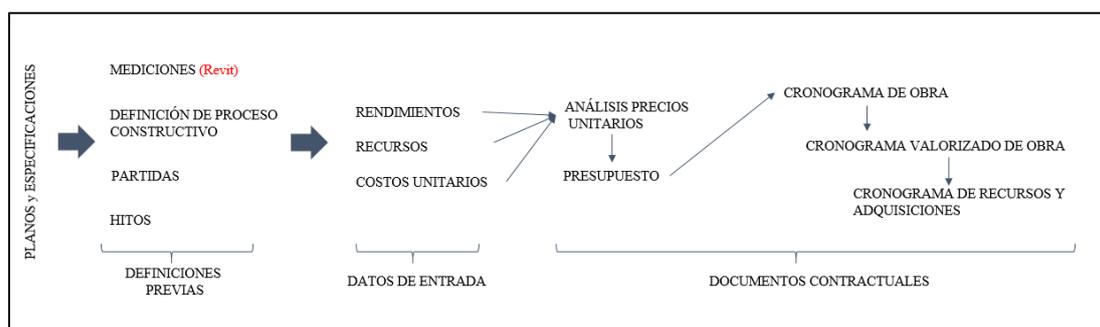
Es un reporte en el que se contrasta los valores de venta y costo. La venta hace referencia al valor ganado acumulado hasta el mes del reporte y a las proyecciones del saldo del Valor Planeado para los siguientes meses. El costo hace referencia a los costos reales incurridos en ejecutar la obra hasta la fecha y las proyecciones de los mismos.

**3.1.4. Flujo de la información de la planificación.**

A continuación se describe cómo se relacionan los documentos descritos en la sección 3.1.3 en el proyecto de análisis.

### *Etapa de pre-construcción (post-diseño).*

El proceso inicia en la licitación cuando se obtiene la información del proyecto (planos por especialidad y especificaciones técnicas), a partir de estas se formulan las *definiciones previas* como las partidas necesarias (que parten de un EDT), procesos constructivos del proyecto, hitos contractuales y mediciones de cada especialidad. Luego, se especifican *los Datos de entrada*: recursos, rendimientos (teniendo en cuenta el proceso constructivo definido) y costos unitarios. A partir de anterior, se obtienen los *Documentos contractuales*, estos engloban el Análisis de Precios Unitarios que se obtiene utilizando los recursos, rendimientos y costos unitarios; luego, a este documento, se le incorporan las mediciones y se desarrolla el Presupuesto. Se elabora, también, un Cronograma de Obra teniendo en cuenta cuadrillas, rendimientos e hitos. Finalmente, se complementa la fase de Planificación del proyecto con el Cronograma Valorizado de Obra y Cronogramas de recursos y adquisiciones, los cuales son el resultado de vincular el Cronograma de obra con el Presupuesto. El flujo de información descrito se resume en la Figura 3.4.

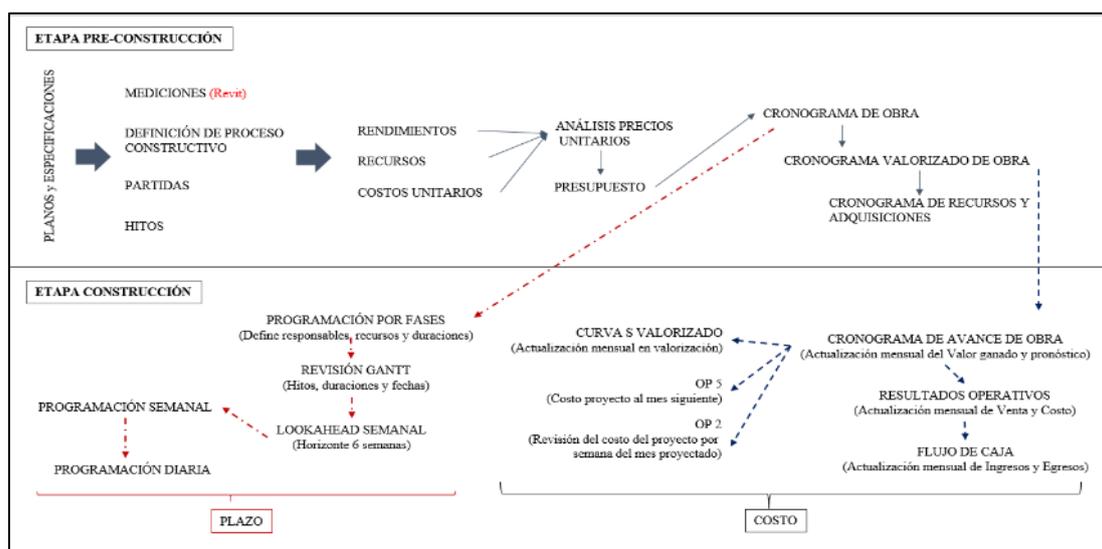


**FIGURA 3.4** Flujo de la información en la etapa de pre-construcción utilizado en el proyecto

### *Etapa de construcción.*

Durante esta etapa se incorporarán diversos reportes y herramientas de planificación, programación y control del plazo y costo del proyecto. Respecto al plazo, en primer lugar, se

realizan revisiones semanales del Cronograma Gantt, en las cuales se verifica posibles atrasos frente a los hitos y se ajusta la producción; luego, se elabora el Lookahead semanal, en el cual será necesario actualizar la ejecución semanal, comparar con lo planificado, y proyectar; sin embargo, esta proyección no tiene base técnica y sólo se hace visualmente en una hoja de cálculo; finalmente, a partir del Lookahead se determina la Programación Semanal y Diaria. Respecto al costo, se tiene como variable el Valor Planeado del Cronograma Valorizado; luego, se actualiza el Valor Ganado y se proyecta el saldo del Valor Planeado en el Cronograma de Avance de Obra (CAO), esta proyección se basa en el criterio del planificador. La información del CAO es de utilidad para diversos reportes; en primer lugar, es un dato de entrada en el Resultado Operativo (en lo datos sobre Venta); luego, con el valor ganado del mes, se actualiza la Curva S Valorizada y, por ende, el metrado ejecutado en el mes; finalmente, se actualizan los reportes donde se analiza lo proyectado en el mes siguiente (OP5) y lo proyectado por semana de ese mes (OP2). En la Figura 3.5 se muestra un flujo que resume todo lo descrito.



**FIGURA 3.5** Flujo de la información en la Etapa de Pre-Construcción y Construcción utilizado en el proyecto

## 3.2. DEFINICIONES PREVIAS

En esta sección se mencionarán todas las Definiciones Previas que fueron necesarias para elaborar el modelo 5D.

### 3.2.1. Definiciones Previas en Plazo.

#### *a. Location Breakdown Structure.*

El primer paso para planificar, según el sistema de Locaciones, es elaborar el *Location Breakdown Structure* (LBS). Para elaborar el LBS se debe dividir de manera jerárquica las locaciones del proyecto, cada una englobará datos como: cuantías, mediciones, tipos de elementos, características de elementos, recursos, costos y rendimientos. A continuación, se describe el LBS elaborado para el casco estructural y estructuras de sostenimiento.

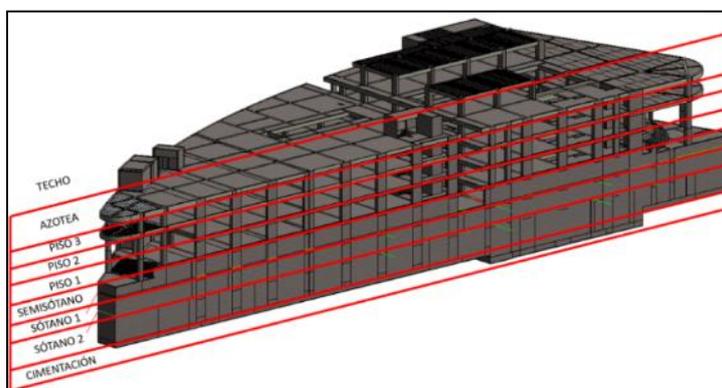
#### *Casco Estructural.*

El LBS se distribuirá en 3 niveles de localizaciones que consisten en pisos (Nivel 1), bloques (Nivel 2) y sectores (Nivel 3); estos tienen un orden jerárquico en el cual los pisos engloban todas las cuantías y componentes de los bloques, estos bloques, a su vez, engloban a los sectores. Los pisos se consideran un nivel de localización alto según el LBMS debido a las restricciones físicas de ejecución en las que trabajar en un piso depende de la culminación y desarrollo de resistencia mínima del piso inmediato inferior; y los bloques y sectores se consideran niveles de localización inferior según el LBMS porque facilitan la planificación con detalle semanal; además, se considera que los Niveles 1 y 2 serán aplicables a todas las fases siguientes del proyecto. A continuación se describen las locaciones que pertenecen a cada nivel.

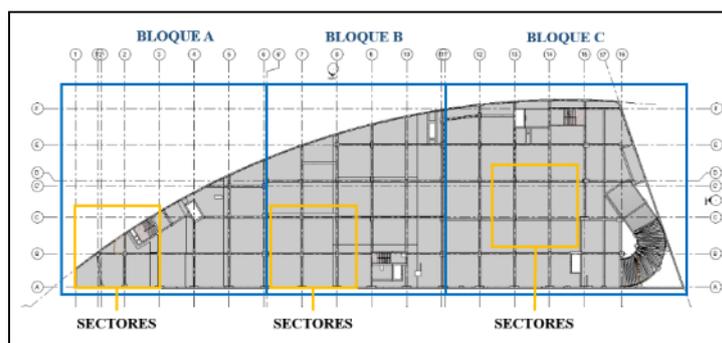
Los Pisos (Nivel 1 de localización) contienen las locaciones: Techo, Azotea, Piso 3, Piso 2, Piso 1, Semi sótano, Sótano 2, Sótano 1 y Cimentación, esto se muestra en la Figura 3.6.

Los Bloques (Nivel 2 de localización) son los siguientes: Bloque A, B y C; esta división se ha planificado a partir de que el proyecto está dividido en tres zonas delimitadas por 2 juntas.

Los Sectores (Nivel 3 de localización) son variados según cada piso ya que dependen del volumen total de los mismos, de la velocidad de producción demandada por los hitos contractuales y de la capacidad máxima del cuello de botella. Los Niveles 2 y 3 se ilustran en la Figura 3.7.



**FIGURA 3.6** Nivel 1 de desglose por locaciones



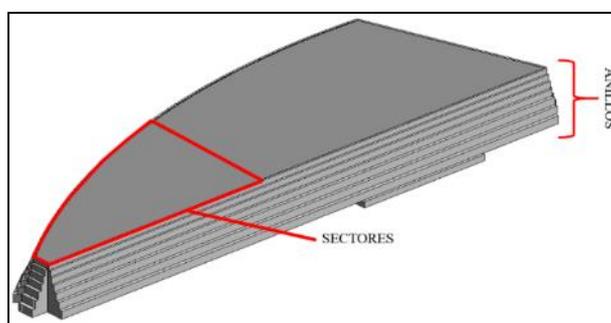
**FIGURA 3.7** Desglose por locaciones

### *Estructuras de sostenimiento.*

Las localizaciones del proyecto (Nivel 1 y 2) no son compatibles con el proceso constructivo de las Calzaduras a causa de que las partidas: excavación, eliminación, concreto,

encofrado y acero dependen de la altura de cada anillo de calzaduras, y la altura de estos no coincide con los sótanos; por esta razón, se utilizará un LBS distinto en esta fase.

Se definen dos niveles: el Nivel 1 son los Anillos, son 8 en total y se definen por la restricción física de ejecución, donde cada anillo solo puede iniciar al culminar el vaciado del anillo inmediatamente superior; el Nivel 2 son los **Sectores**, estos dictan la capacidad de ejecución diaria de cada partida en el proyecto. La ubicación de los Anillos y Sectores se muestra en la **Figura 3.8**.



**FIGURA 3.8** Desglose por locaciones en muros de sostenimiento.

### ***b. Consideraciones de Producción.***

#### *Definiciones previas.*

En el plazo se debe acotar definiciones previas como hitos y mediciones. Respecto a los hitos, la planificación se basará en tres principales: Inicio de Casco Estructural, Fin de Subestructura, Fin de Casco Estructural; estos tienen como fecha establecida el 05 de abril del 2019, 09 de septiembre del 2019 y 03 de febrero del 2020 respectivamente. Respecto a las mediciones, se deben determinar para el Nivel 1 y 2 de localizaciones, ya que de estas cantidades dependerá la velocidad diaria de ejecución del cuello de botella del proyecto y se podrá analizar, en modo general, si la velocidad de producción destinada no implica restricciones (o formación de otras

partidas cuello de botella) en la producción diaria destinada para partidas como encofrado y acero; finalmente, con estas mediciones se puede obtener el número de sectores.

Las principales partidas en la fase de análisis son Concreto, Encofrado y Acero; estas serán suficientes para determinar cantidades y definir el número de sectores. En total en el casco estructural se tienen (aproximadamente) 1.87 mil toneladas de acero, 51.5 mil metros cuadrados de encofrado y 12.2 mil metros cúbicos de concreto; además, se tiene en promedio por piso: 1 380 metros cúbicos de concreto, 6 560 metros cuadrados de encofrado y 233 toneladas de acero. Respecto a los muros de sostenimiento, se tiene un total, en los 8 anillos, de 9.5 mil metros cúbicos de concreto, 3.6 mil metros cuadrados de encofrado y 26.8 toneladas de acero. Las mediciones son obtenidas, automáticamente, a partir del modelo 3D mediante el software Vico Office.

Es preciso acotar que el acero de refuerzo no se ha modelado, por lo que no se determinó automáticamente las cantidades a partir del modelo 3D; sin embargo, para determinar estas mediciones se usaron ratios que relacionaban la cantidad de metros cúbicos de concreto con los kilogramos de acero, estos se basaban en los kilogramos medrados en los planos 2D. Al utilizar ratios la precisión de la medición se reduce pero se simplifica el modelamiento porque el software Vico Office no detecta elementos de refuerzo modelados en Revit; en caso se modele el acero debería usarse Tekla Structures.

#### *Velocidad de producción.*

La velocidad de ejecución planificada en el proyecto depende, principalmente, de los hitos y capacidad de ejecución del “cuello de botella”. Se considera como partidas “cuello de botella” al vaciado de concreto en elementos, ya que estas tenían una restricción de horario que consistía en sólo permitir el vaciado de mixers en un jornal de 5.5 horas a partir de las 11p.m.

Por ende, toda partida de vaciado de concreto tiene una capacidad máxima de ejecución que depende del jornal, número máximo de mixers, y, principalmente, tiempo de llegada del concreto desde la planta productora hasta el elemento a vaciar; esto implica que, incluso si se aumentan los equipos y cuadrillas, no se podrá aumentar la capacidad máxima porque el condicionante principal es el tiempo que demanda el concreto desde el proveedor hasta el elemento. Del principal condicionante se sabe que solo se puede optimizar la velocidad del vaciado en obra; así, para aumentar la velocidad de descarga de mixers, se planifica el uso de bombas estacionarias y una grúa torre (con capacidad de 1.2 toneladas en punta equivalente a un balde con 0.4 m<sup>3</sup> de concreto); las velocidades de los equipos se muestran en la **Tabla 3.1**.

**TABLA 3.1** Velocidades de ejecución estimadas para Bomba estacionaria y Torre grúa

Equipo	Tipo de elemento a ejecutar	Velocidad estimada
Bomba estacionaria	Zapatas	25 minutos/mixer
	Losas y Vigas	30 minutos/mixer
	Verticales	40 minutos/mixer
Torre Grúa	Verticales	20 minutos/m <sup>3</sup>

A partir de las velocidades estimadas se determina una capacidad máxima de ejecución diaria de **85 m<sup>3</sup>** (restringida por condiciones inalterables en obra) de concreto; se comprobó previamente que esta velocidad es congruente con la demanda de ejecución dictada por los hitos. En la estimación del avance diario, no se ha considerado las velocidades de encofrado ni acero como una cantidad que genere restricción, ya que estas partidas no representan un cuello de botella (por materiales, mano de obra ni equipos) para el ritmo esperado de avance de concreto.

Respecto a las estructuras de sostenimiento, se estima una velocidad de 150 m<sup>3</sup>/día, porque no se tiene una restricción en el horario de vaciado y se usarán dos bombas telescópicas.

### **3.2.2. Definiciones Previas en costo.**

En estas definiciones se debe delimitar, en primer lugar, las partidas que controlarán los costos del proyecto; así, para este caso, se utilizarán las principales partidas de la especialidad de estructuras del expediente técnico; luego, con las partidas definidas, se deben definir los recursos y costos (según los métodos constructivos formulados), estos se obtienen del Análisis de Precios Unitarios del expediente técnico; finalmente, se debe definir el rendimiento y cuadrillas por unidad de medida, esta información también se obtiene del Análisis de Precios Unitarios

#### ***a. Alcance de partidas y Presupuesto.***

La investigación del casco estructural abarca las principales partidas de la fase de estructuras del proyecto, estas se muestra en el **ANEXO 1**. Las partidas elegidas son aquellas referentes a elementos de concreto armado (excepto sobrecimientos, columnetas y vigas de amarre); en suma, son un total de 54 partidas que representan el **60%** del costo directo de la especialidad de estructuras y el **20%** del costo directo del presupuesto total. En la **Tabla 3.2** se indica una descripción breve de cada grupo de partidas y el Nivel de Localización donde se ubican las mediciones.

Respecto a la planificación de estructuras de sostenimiento, se ha tomado en cuenta las siguientes partidas: Excavación Masiva, Eliminación, Excavación Puntual en Calzadura, Acero en Calzadura, Encofrado en Calzadura y Concreto en Calzadura

**TABLA 3.2** Descripción de partidas y locación a la que corresponden en casco estructural.

<b>PARTIDA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>LOCACIÓN</b>
SOLADOS	Piso de concreto simple de 10 cm de espesor con resistencia $f'c=100$ k/c2	Cimentación
ZAPATAS	Zapatas aisladas y combinadas con resistencia $f'c=280$ k/c2	Cimentación
VIGAS DE CIMENTACIÓN	Elementos horizontales que conectan zapatas aisladas, resistencia $f'c=280$ k/c2	Cimentación
RELLENO	Relleno compactado con material propio de excavación en capas de 20 cm	Cimentación
FALSO PISO	Piso de concreto simple de 15 cm de espesor con resistencia $f'c=140$ k/c2	Sótano 2
PAVIMENTO	Losa pavimento de concreto con resistencia $f'c=210$ k/c2	Sótano 2
COLUMNAS	Elementos verticales de concreto armado con resistencia $f'c=280$ k/c2	Cimentación hasta Azotea
MUROS Y PLACAS	Elementos verticales de concreto armado con resistencia $f'c=280$ k/c2	Cimentación hasta Azotea
MUROS DE CONTENCIÓN	Elementos perimetrales verticales de concreto armado con resistencia $f'c=280$ k/c2 encofrados a una sola cara	Cimentación hasta Semi sótano
VIGAS	Elementos horizontales de concreto armado con resistencia $f'c=280$ k/c2	Sótano 1 hasta Azotea
LOSA MACIZA	Losas de superficies planas de concreto armado con resistencia $f'c$ 280 k/c2	Sótano 1 hasta Azotea
LOSA NERVADA	Losas con nervios de concreto en 2 direcciones y relleno liviano (casetones) con resistencia $f'c=280$ k/c2	Piso 3 y Azotea
LOSA COLABORANTE	Estructura horizontal que combina losa de concreto con planchas de acero, con resistencia de concreto $f'c=280$ k/c2	Piso 1 hasta Azotea
ESCALERAS	Estructuras para comunicación vertical entre niveles, con resistencia $f'c=280$ k/c2	Sótano2 hasta Azotea
CISTERNA	Estructura para almacenamiento de agua, tiene una cuadrilla dedicada exclusivamente a esta partida, abarca: zapas, losas de fondo, placas y muros de contención de la cisterna	Cimentación hasta Sótano 2
RAMPA	Estructura para el acceso de vehículos, comprende: losa y vigas de rampa	Sótano 2 hasta Semisótano

***b. Rendimientos y Cuadrillas.***

El cálculo de la duración de tareas se basa en la velocidad indicada en el Análisis de Precios Unitarios, esta se traza como un rendimiento de control que puede ser actualizado conforme se avance en el proyecto y se utilicen materiales, cuadrillas o equipos que faciliten

una velocidad mayor. En resumen, en la Tabla 3.3 se lista las velocidades utilizadas para las partidas mostradas en la Sección 3.2.2 inciso a.

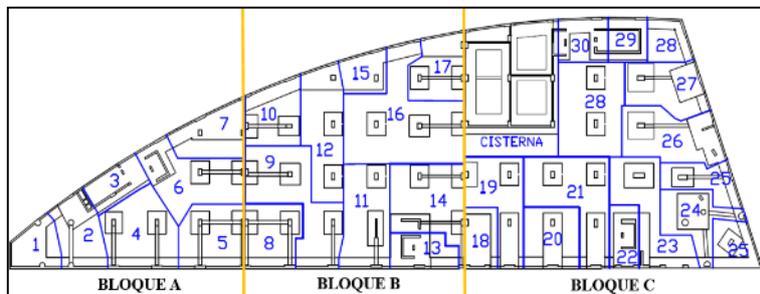
**TABLA 3.3** Velocidad según elementos.

<b>PARTIDA</b>	<b>ELEMENTOS</b>	<b>VELOCIDAD</b>	
ACERO	Todos los elementos	270	kg/día
CONCRETO	Pavimento	60	m3/día
	Zapatas	90	m3/día
	Horizontales (Losas/vigas/Rampa/Cisterna)	60	m3/día
	Muros Perimetrales / Columnas	30	m3/día
	Placas	25	m3/día
	Escaleras	30	m3/día
	Cisterna: Losa de Fondo	65	m3/día
	Cisterna: Muro de contención	30	m3/día
	Calzadura	150	M3/día
ENCOFRADO	Zapatas	8	m2/día
	Horizontales (Losas/vigas/Rampa/Cisterna)	15	m2/día
	Muros Perimetrales	20	m2/día
	Placas / Columnas /Calzadura	16	m2/día
	Escaleras	14	m2/día
	Pavimento	16	m2/día
	Cisterna: Muro de contención	12	m2/día
OTROS	Plancha Colaborante	12	m2/día
	Relleno	26	m3/día
	Acarreo	6	m3/día
	Solado	200	m2/día
	Falso Piso	300	m2/día
	Excavación Masiva	450	m3/día
	Excavación Puntual	72	m3/día

### 3.3. SECTORIZACIÓN

Los sectores se adoptan según la base teórica del Lean construction, donde el criterio principal es adoptar similares cantidades de trabajo diario; así, será posible asignar igual número de cuadrillas, cantidad de materiales y número de horas máquina de equipos. A partir de la velocidad de avance de vaciado de concreto (cuello de botella) definida en la sección 3.2.2.b, se distribuye los sectores con cantidades similares. En la fase de casco estructural el proyecto tiene tres etapas con distintas configuraciones de pisos; por lo cual, será necesario elaborar una sectorización para Cimentaciones, Sótanos y Pisos superiores.

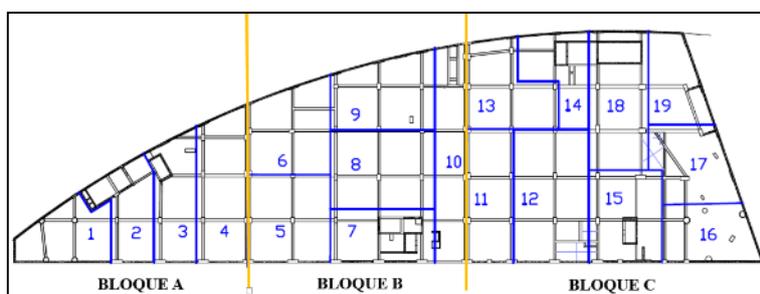
*Cimentaciones:* Se tiene una cantidad de 7, 10 y 14 sectores para los Bloques A, B y C respectivamente. La distribución se muestra en la **Figura 3.9** mediante una vista en planta.



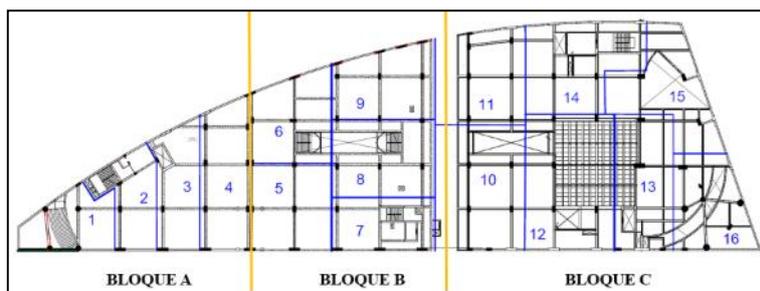
**FIGURA 3.9** Distribución de Sectores por Bloques en cimentación.

*Sótanos:* Corresponde al Sótano 1 y Semisótano. Se obtienen 4, 6 y 9 sectores en los Bloques A, B y C respectivamente. Los sectores se muestran en la **Figura 3.10**.

*Pisos superiores:* Se obtienen 4, 5 y 7 sectores en los bloques A, B y C respectivamente. La distribución de los sectores se muestra en la **Figura 3.19**. Además, en el Bloque B del Piso 3 se tienen sólo 4 sectores y en Azotea sólo se consideran bloques.

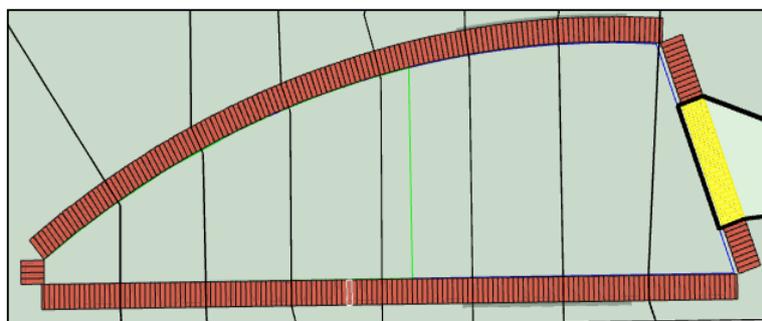


**FIGURA 3.10** Distribución de Sectores por Bloques en Sótano.



**FIGURA 3. 11** Distribución de Sectores por Bloques en Piso Superior.

El LBS del casco estructural y de las estructuras de sostenimiento se resume en la Tabla 3.4; además, en la Figura 3.12 se muestra la división por sectores del anillo 7 de calzaduras.



**FIGURA 3.12** División por sectores del Anillo 7.

**TABLA 3.4** Location Breakdown Structure del proyecto y fase de Estructuras.

<b>LBS Todo el Proyecto</b>			
<b>LBS de la Fase</b>			
<b>Nivel 1 Pisos</b>	<b>Nivel 2 Bloques</b>	<b>Nivel 3 Sectores</b>	
Cimentación	Bloque A	7 Sectores	S1 - S7
	Bloque B	10 Sectores	S8 - S17
	Bloque C	14 Sectores	S18 - S31
Sótano 2	Bloque A	7 Sectores	S1 - S7
	Bloque B	10 Sectores	S8 - S17
	Bloque C	14 Sectores	S18 - S31
Sótano 1	Bloque A	4 Sectores	S1-S4
	Bloque B	6 Sectores	S5-S10
	Bloque C	9 Sectores	S11-S19
Semisótano	Bloque A	4 Sectores	S1-S4
	Bloque B	6 Sectores	S5-S10
	Bloque C	9 Sectores	S11-S19
Piso 1	Bloque A	4 Sectores	S1-S4
	Bloque B	5 Sectores	S5-S9
	Bloque C	7 Sectores	S10-S16
Piso 2	Bloque A	3 Sectores	S1-S3
	Bloque B	5 Sectores	S4-S9
	Bloque C	7 Sectores	S10-S17
Piso 3	Bloque A	4 Sectores	S1-S4
	Bloque B	4 Sectores	S5-S8
	Bloque C	7 Sectores	S9-S15
Azotea	Bloque A	4 Sectores	S1-S4
	Bloque B	4 Sectores	S5-S8
	Bloque C	7 Sectores	S9-S15
Techo	Bloque A		
	Bloque B		
	Bloque C		

<b>LBS de estructuras de sostenimiento</b>	
<b>Nivel 1 Anillos</b>	<b>Nivel 2 Sectores</b>
Anillo 1	2 Sectores + Rampa
Anillo 2	2 Sectores + Rampa
Anillo 3	2 Sectores + Rampa
Anillo 4	3 Sectores + Rampa
Anillo 5	5 Sectores + Rampa
Anillo 6	6 Sectores + Rampa
Anillo 7	8 Sectores + Rampa
Anillo 8	2 Sectores

### 3.4. ELABORACIÓN DE MODELO 5D

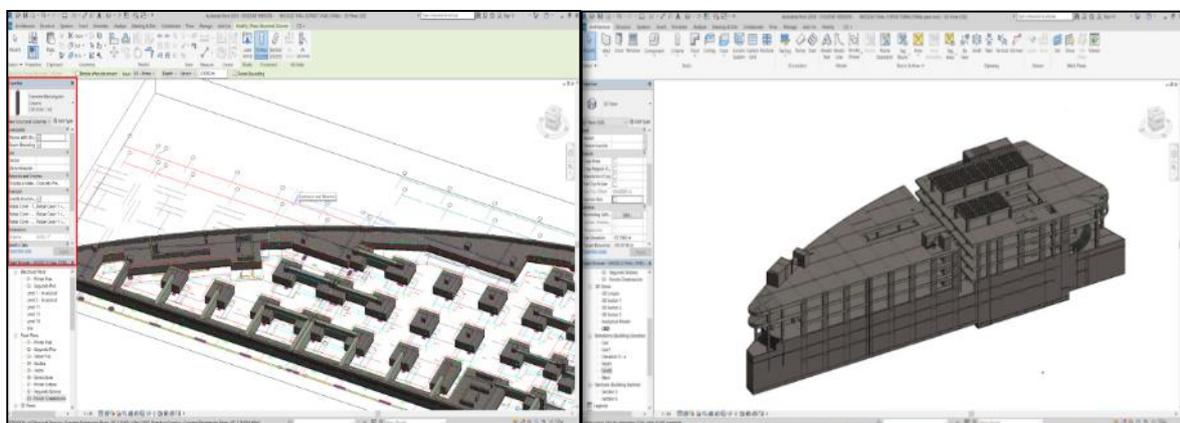
Se utilizarán dos software para elaborar los modelos 3D y 5D: Revit 2018 y Vico Office R6.7 respectivamente; además, para la planificación se utilizará el software Schedule Planner, el cual está incorporado a Vico Office. En esta sección se describirán las consideraciones de modelamiento de la estructura en Revit 2018; luego, se desarrollará el modelo 5D en Vico Office donde se describirán los pasos y criterios para obtener el modelo con el fin de integrar el costo, plazo y cuantías del proyecto.

#### 3.4.1. Modelo 3D: Revit 2018.

En esta sección se procede a describir las principales consideraciones tomadas en la elaboración del modelo 3D con el fin de facilitar la exportación de datos y generación del modelo 5D. El principal criterio de modelado es el procedimiento constructivo en obra.

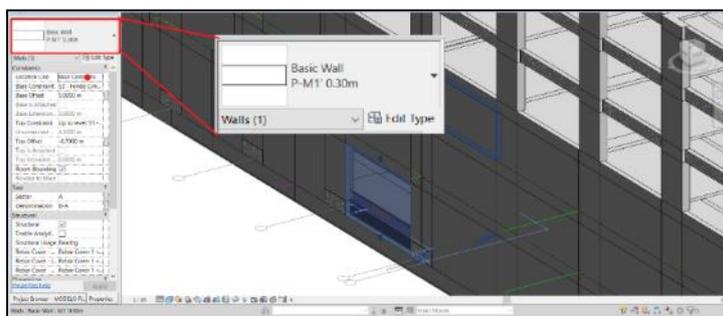
##### *Casco Estructural.*

Se elaboró el modelo de cimentaciones, subestructura y superestructura siguiendo las dimensiones y ubicaciones especificadas en los planos exportados a Revit. Estos modelos se muestran en la Figuras 3.13.



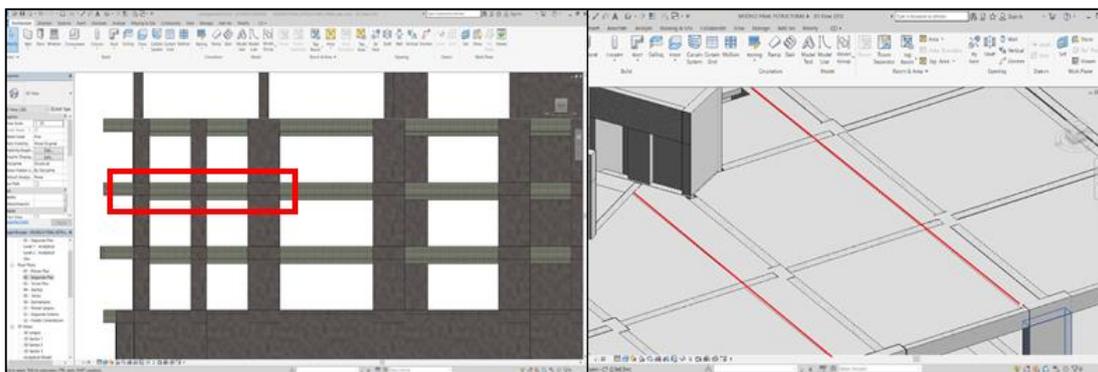
**FIGURA 3.13:** Modelado de cimentación, subestructuras y superestructura en Revit 2018.

Al asignar nombre a los elementos creados, se recomienda detallar las características importantes del elemento para su posterior clasificación en el modelo 5D; así, mientras más detalle tenga el nombre del elemento, será más fácil clasificarlo en un grupo de mediciones; estos grupos se asignarán posteriormente a una partida. Por ejemplo, los muros perimetrales se encofran a 1 cara y tienen como nombre “P-M1 0.30m”, donde “P-M” hace referencia a Muro Perimetral y facilita distinguirlo de muros convencionales, esto se muestra en la Figura 3.14.



**FIGURA 3.14** Nombre detallado de Muro Perimetral en Revit.

Se debe incluir el LBS desde el modelo 3D, pues se considera que la división de mediciones es más exacta respecto al software del modelo BIM 5D. En la Figura 3.15 se muestra la incorporación del LBS al modelo 3D mediante cortes en elementos verticales, hasta fondo de viga o losa; y cortes en elementos horizontales, según sectorización



**FIGURA 3.15** Consideraciones de corte de elementos verticales y horizontales.

Respecto al relleno, es necesario modelarlo según la situación que se prevé según condiciones del terreno, ya que es una partida crítica para el avance que representa muchas cuantías; además, es recomendable actualizar el modelo si lo ejecutado es distinto. En la **Figura 3.16** se muestran los elementos de relleno modelados y se identifican por el color marrón.



**FIGURA 3.16** Modelado de relleno según situación estimada en obra.

### *Calzaduras.*

En la elaboración del modelo 3D se tiene en cuenta el proceso constructivo, el cual implica modelar volúmenes de excavación por anillo, banquetas en cada paño de calzada (diferenciadas por tipo de calzada), volumen de tierra en rampas y volúmenes de tierra que no se excavarán (debido al nivel de fondo de excavación). En la Figura 3.17 se muestran los modelos de tierra (izquierda) y concreto (derecha).



**FIGURA 3.17** Modelo de tierra y concreto en estructuras de sostenimiento.

### 3.4.2. Modelo 5D: Vico Office.

#### a. Elaboración del modelo 5D.

Importar modelos y especificar LBS. El software Vico Office cuantificará automáticamente las mediciones de elementos importados desde un modelo 3D (en un formato IFC) según la familia del elemento. Las mediciones dependen del tipo de elemento y se muestran en la Figura 3.18. Después de la cuantificación se debe especificar las locaciones del LBS en el modelo BIM 5D, la incorporación de locaciones se muestra en la Figura 3.19.

4-LOSA MACIZA			Si	No	
Nombre	Unidad	Enlazado	Tareas	Proyecto	
Cantidad	EA	No	No	860.00	
Perímetro del Borde	M	No	No	15,148.99	
Cantidad de Agujeros	EA	No	No	17.00	
Perímetro de Agujero	M	No	No	67.55	
Área de Superficie Inferior Neta	M2	Si	No	16,483.84	
Área de Superficie Superior Neta	M2	No	No	16,483.84	
Área de Superficie de Borde	M2	No	No	3,401.47	
Área de Superficie de Agujero	M2	No	No	13.91	
Volumen Neto	M3	No	No	3,703.92	
Volumen Bruto	M3	Si	No	3,707.05	
Área de Superficie Horizontal de Juntas	M2	No	No	0.00	
Área de Superficie Vertical de Junta	M2	No	No	712.63	
Cantidad de Piezas	EA	No	No	1,249.00	
Longitud del Borde	M	No	No	15,148.99	
Longitud de Junta	M	No	No	3,167.25	
Longitud de Borde de Agujero	M	No	No	67.55	
Longitud de Juntas de Agujero	M	No	No	0.00	
CAD_Cantidad	EA	No	No	860.00	
CAD_Volumen	M3	No	No	0.00	
Acero		No	No	595,220.58	

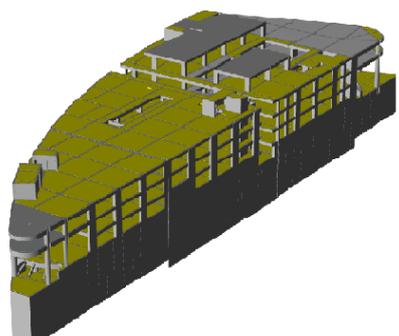


FIGURA 3.18 Mediciones según Losas modeladas en todo el proyecto.

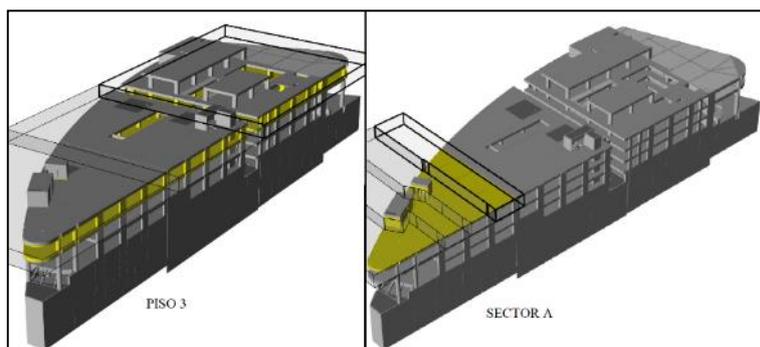
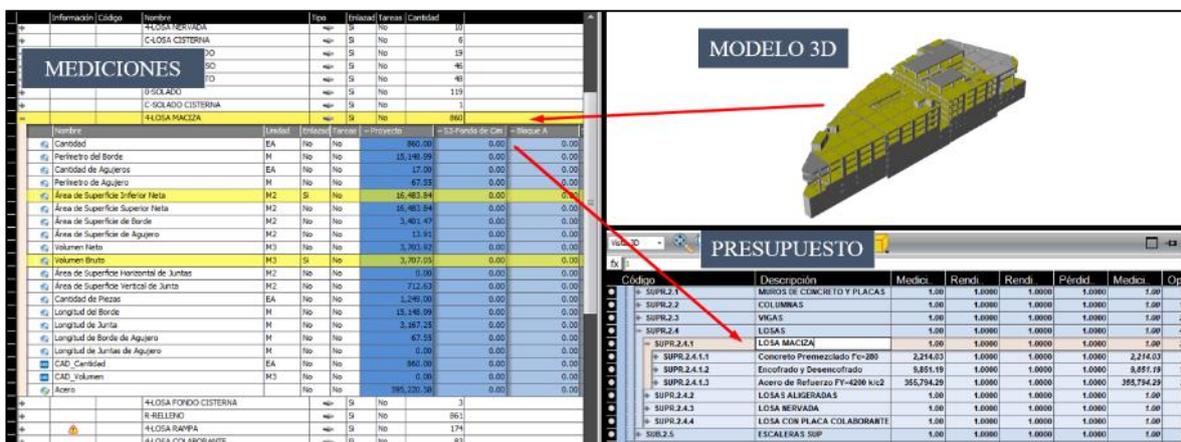


FIGURA 3.19 Desglose de locaciones por piso en Vico Office.

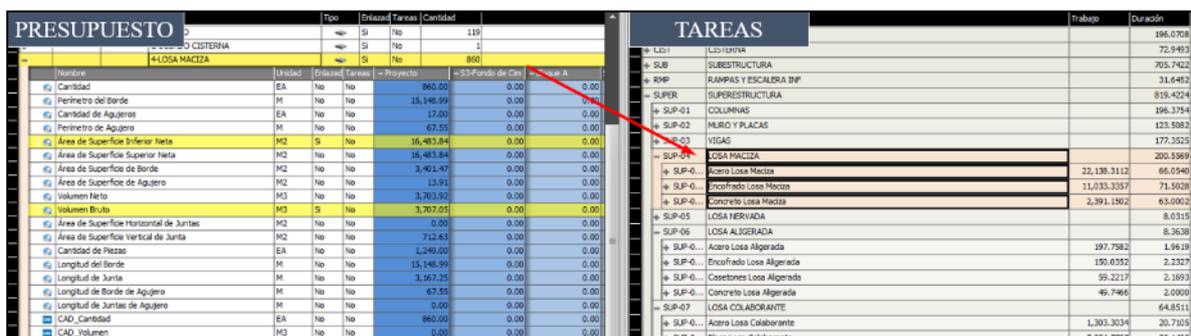
*Mediciones del modelo BIM 5D.* Las mediciones necesarias para el presupuesto se obtienen de cuantías determinadas automáticamente por el software; sin embargo, la medición de acero se debe obtener de manera indirecta vinculando el volumen de concreto mediante ratios de  $\text{kg/m}^3$ , esto se debe a que los elementos de acero no han sido modelados.

*Agrupación de cuantías y Presupuesto.* A partir del alcance definido en la Sección 3.2.3, se deben agrupar los elementos cuantificados según las partidas y semejanza en mediciones, esta agrupación es necesaria porque las mediciones deben vincularse a las partidas del presupuesto, el cual se debe exportar desde una hoja de cálculo al software Vico Office. En la Figura 3.20 se muestra el vínculo de cuantificación con las partidas establecidas en el software.



**FIGURA 3.20** Proceso de vincular las mediciones del modelo 3D al presupuesto.

*Vincular tareas con el presupuesto.* Con el costo y mediciones vinculados se procede a relacionar las partidas del presupuesto con las tareas (partidas en la planificación) del Plan de Obra; además, se asigna el rendimiento indicado en la Tabla 3.4. En la Figura 3.21 se muestra la relación del presupuesto con las tareas de obra. Posterior a este procedimiento se elaborarán las líneas de flujo.



**FIGURA 3.21** Proceso de vincular el presupuesto (con mediciones relacionadas) a los grupos de Tareas.

### ***b. Elaboración de Líneas de Flujo.***

Las líneas de flujo se elaboran con tareas que tienen vinculadas las partidas del presupuesto y las mediciones cuantificadas del modelo 3D.

*Entorno de las líneas de Flujo.* En las líneas de flujo se tienen 2 ejes: el eje Y, que representa las locaciones jerarquizadas del proyecto definidas en la Tabla 3.4; y el eje X, que representa los días del calendario del proyecto, para este eje se considera como inicio la fecha contractual del hito descrito en la sección 3.2.1.b; además, el detalle de este eje es semanal.

*Balance de las Tareas.* En un principio las líneas resultarán con distintas pendientes, superpuestas y confusas, lo cual se muestra en la Figura 3.22; esta situación se presenta porque no existen relaciones de precedencia ni un número de cuadrillas establecidas. Así, para balancear las tareas, primero se deben identificar los cuellos de botella (tareas relacionadas al concreto) y ajustar las pendientes de estas tareas según la velocidad planificada; a estas líneas se las llamará la “columna vertebral” o *backbone* de la planificación. A partir del *backbone* del proyecto, se ajustará la pendiente del resto de partidas asegurando que todas estén paralelas entre sí. Para ajustar la pendiente se pueden hacer cambios en el Factor de Producción, Número de Cuadrillas o Rendimientos, a continuación se explica el procedimiento de cada cambio.

- Factor de Producción: Se interpreta este término como un factor que disminuye la producción diaria de una tarea. Se afecta cuando la cuadrilla no puede ejecutar una tarea al 100% de su capacidad, o cuando una cuadrilla se encarga de varios elementos en un mismo jornal; por ejemplo, las cuadrillas de concreto.
- Aumentar o Disminuir Cuadrillas: Aumentar cuadrillas disminuirá el tiempo que demora en ejecutarse una tarea, y disminuir cuadrillas aumentará ese tiempo. Esta

variación se utiliza, principalmente, en partidas de acero y encofrado, donde una sola cuadrilla no puede realizar el trabajo a la velocidad que demanda el *backbone*.

- Variar el Rendimiento: Esta variación solo se debe aplicar en la planificación si se modifica el procedimiento constructivo de la partida, se utilizan materiales más eficientes o se tienen cuadrillas más especializadas.

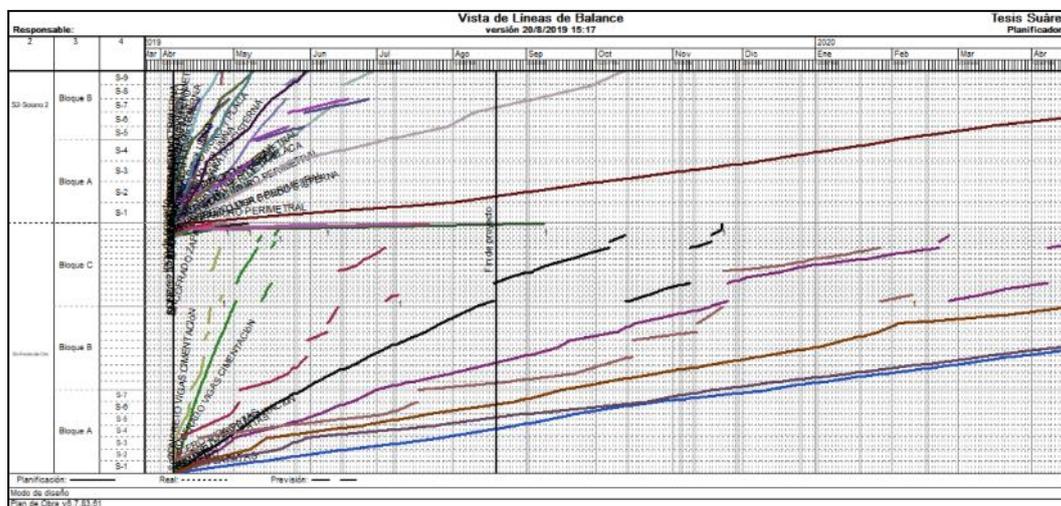
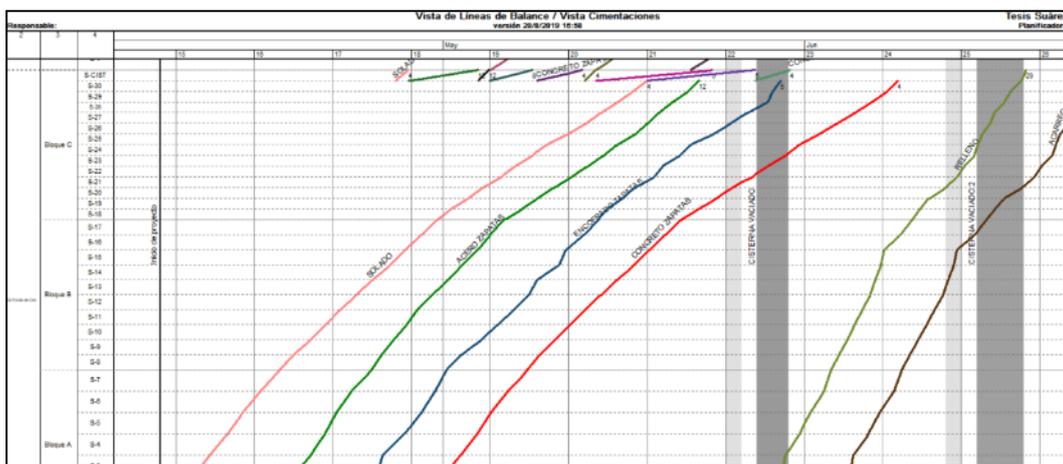


FIGURA 3.22 Líneas de flujo sin dependencias ni ajuste de pendientes.

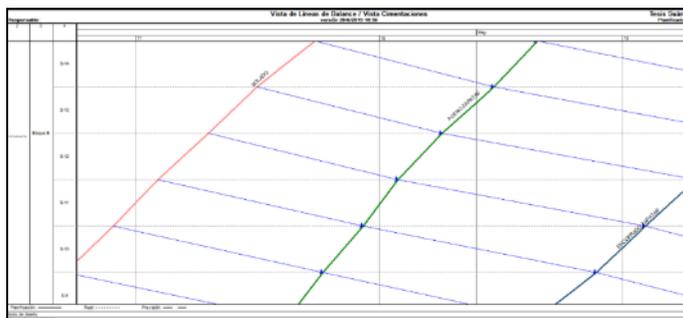
*Relaciones lógicas entre partidas.* Luego de balancear las líneas de flujo se procede a definir las relaciones lógicas entre cuadrillas a partir del procedimiento constructivo que se ha planificado en obra; para definir estas relaciones se necesita tener un panorama claro del orden de ejecución de partidas. Por ejemplo, en la Figura 3.23 se muestra las partidas de Solado, Acero de Zapatas, Encofrado de Zapata, Concreto de Zapata, Relleno y Acarreo; estas se encuentran balanceadas según el *backbone*: “Concreto en Zapatas” (línea de color rojo); además, sus dependencias están establecidas según el proceso constructivo.



**FIGURA 3.23** Tareas de cimentaciones con líneas balanceadas a partir del backbone.

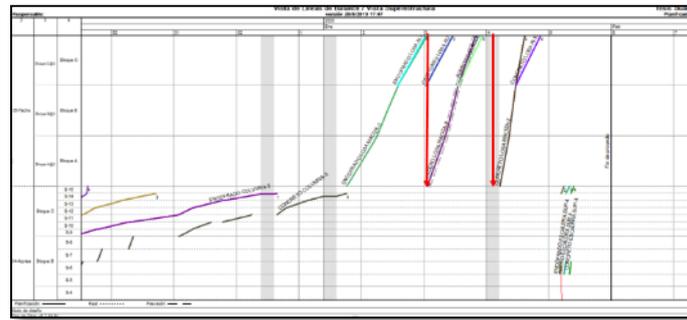
*Dependencias:* Para incorporar las dependencias se utilizaron 4 de los 5 tipos de relaciones lógicas de la teoría del Sistema de Locaciones, estas se indican a continuación.

Dependencia Tipo 1: Se da en un mismo nivel jerárquico de locación. En la Figura 3.24 se muestran las dependencias Tipo 1 entre Solado, Acero de zapatas y Encofrado de Zapatas; estas se muestran con flechas azules.



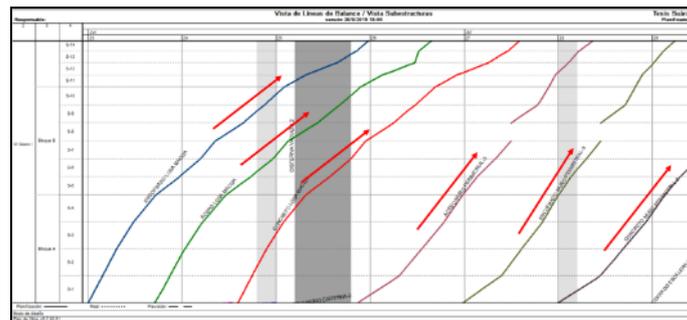
**FIGURA 3. 24** Dependencias Tipo 1 en la planificación de cimentaciones del proyecto.

Dependencia Tipo 2: Relaciona distintos niveles jerárquicos de inicio-fin. En la Figura 3.25 se muestra el uso de esta relación en las partidas de Encofrado, Acero y Concreto de losa maciza en el techo, estas dependencias relacionan el fin del Bloque C de Encofrado con el inicio del Bloque A de Acero; además, esta relación se repite entre Encofrado y Concreto (las dependencias se muestran con líneas rojas).



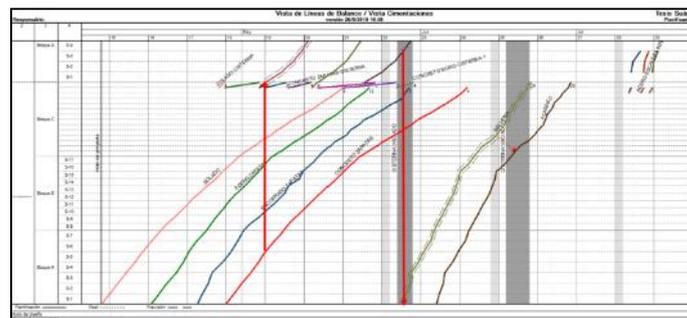
**FIGURA 3.25** Dependencias Tipo 2 en la planificación de la locación de Techo del proyecto.

Dependencia Tipo 3: Muestra la relación continua entre tareas. En la Figura 3.26 se muestra las partidas de Losa Maciza y Muro Perimetral, estas partidas son continuas y se ejecutan según la secuencia que va desde el Sector 1 hasta el Sector 19.



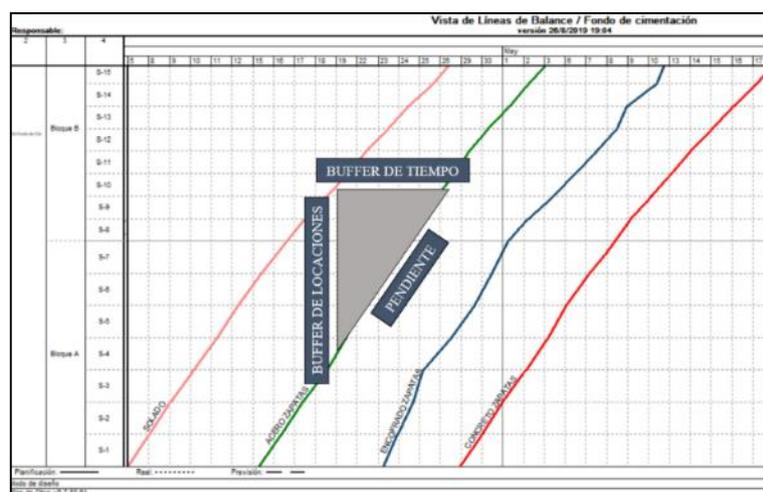
**FIGURA 3.26** Dependencias Tipo 3 en la planificación de la locación de Sótano 1.

Dependencia Tipo 4: Se utilizará cuando la precedencia se da en base a locaciones. Por ejemplo, en la Figura 3.27, el Relleno se ejecuta al culminar el Sector 3 del Concreto de Muro perimetral; y el Acero de este muro inicia al culminar el Sector 5 del Concreto de Zapatas



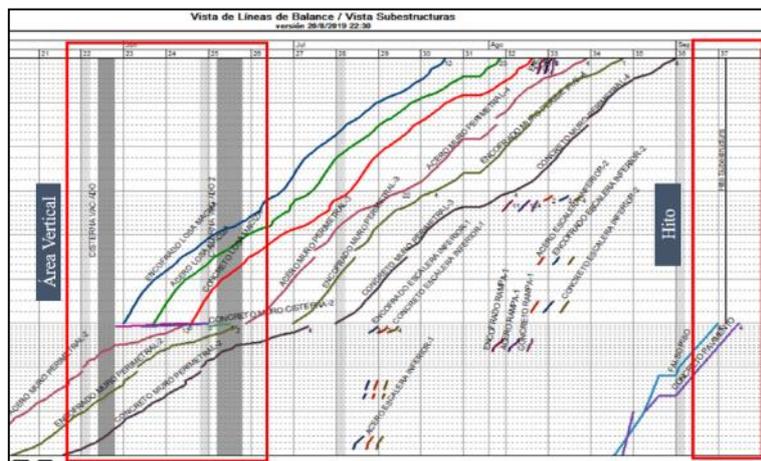
**FIGURA 3.27** Dependencias Tipo 4 en la planificación del Relleno.

*Incorporación de Buffers.* Luego de Balancear las líneas e incluir las dependencias entre estas, se debe incorporar los buffers; estos tienen como finalidad considerar posibles riesgos y atrasos debido al gran horizonte que abarca planificar una fase. Para incluir buffers de tiempo en las líneas de flujo se delimitó la cantidad mínima de días o locaciones necesarios para absorber riesgos entre tareas; luego, se traza un triángulo rectángulo que tiene como lado, el número mínimo de días o locaciones; y como hipotenusa, la pendiente de la línea de la tarea sucesiva; por ende, si este triángulo tiene contacto con la tarea predecesora se infiere que no se asegura el buffer y se debe aumentar el espacio entre las líneas de las tareas. Principalmente se utilizaron buffers de tiempo y locaciones, se denominan buffers de tiempo a los que adicionan días entre las relaciones de precedencia de partidas, en estos el triángulo tendrá como dimensiones a la pendiente (hipotenusa) y días de buffer (base); y los buffers de locación se consideran cuando una partida depende de haber finalizado las tareas en alguna localización adicional de sus partidas predecesoras, en estos el triángulo tendrá como dimensiones a la pendiente (hipotenusa) y locaciones (altura). Además, un buffer de tiempo se puede expresar en términos de locaciones y viceversa. Lo descrito se muestra en la Figura 3.28.



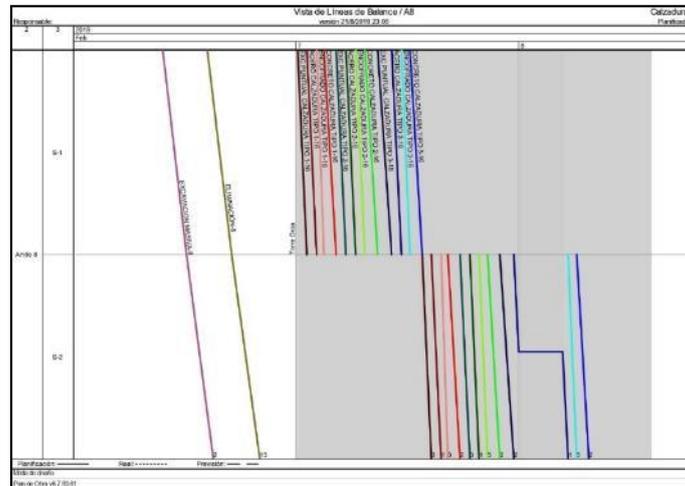
**FIGURA 3.28** Buffers de tiempo y Locación.

*Incorporación de Hitos y Áreas Verticales:* Los hitos en líneas de flujo se visualizan como líneas verticales en la fecha correspondiente y permiten identificar las tareas y locaciones que se deben acabar antes del hito. Las Áreas Verticales son áreas sombreadas que resaltan un conjunto de días importantes; en el proyecto se utilizaron estas para distinguir los días en que se planifica realizar el Vaciado de Cisterna (en Casco Estructural) e Instalación de Grúa Torre (en Estructuras de sostenimiento). En la Figura 3.29 se muestra las Áreas verticales y el hito de subestructura en las líneas de flujo de Casco estructural.



**FIGURA 3.29** Áreas Verticales e Hito en Líneas de Flujo de subestructura.

*Discontinuidad de partidas en Estructuras de Sostenimiento:* Durante la elaboración de Líneas de flujo en las Estructuras de sostenimiento se incorporó un criterio adicional, las tareas fueron planificadas de manera discontinua. Esto significa que en un día se ejecutan las tareas de Excavación puntual, Acero, Encofrado y Concreto del tipo 1 de calzada; el día siguiente se ejecutan las mismas tareas pero del tipo 2; y, finalmente, las del tipo 3. La razón de usar tareas discontinuas es que son de utilidad para mostrar una planificación en la que se pueda visualizar el flujo real de producción (el cómo se realizará en obra); esta distribución se muestra en la Figura 3.30.



**FIGURA 3.30** Tareas Discontinuas por día en calzaduras.

### *c. Consideraciones en el modelo 5D*

Durante la elaboración del modelo 5D se desarrollaron algunas consideraciones, respecto al modelado y cuantificación de elementos que facilitaron la elaboración del modelo; estas se enumeran a continuación:

1) Al importar los formatos IFC se generaron dos tipos de errores que no permitían que el Software identifique automáticamente las mediciones. El primero es el caso de errores de modelado, en estos se debe revisar que los elementos tengan una forma continua en toda su extensión; así, cualquier variación en la continuidad hace que el software no identifique correctamente las mediciones de área y longitud. El segundo es el caso de errores de importación de datos, estos se generan cuando se exporta el archivo de Revit a IFC y no se reconoce a los elementos según su familia original.

2) Los elementos en Vico Office se deben agrupar según la similitud de mediciones que tienen; por ejemplo, en el caso de elementos verticales se debe diferenciar los muros perimetrales (encofrados a una cara) de los muros interiores (encofrado en toda el área lateral). Otro ejemplo es el caso del grupo de medición de Zapatas, en este se debe diferenciar las

Zapatas corridas de las Aisladas; ya que, tienen un ratio acero de kg/m<sup>3</sup> que se diferencia entre sí en un 60%; además, el encofrado en Zapatas corridas abarca la mitad del Área perimetral del elemento, y las Zapatas aisladas abarcan toda el área.

3) Para facilitar la elaboración de costo se debe elaborar una hoja de Excel que tenga las partidas y recursos (del análisis de Precios unitarios); además, esta hoja debe de cumplir con el formato que exige el software Vico Office para la exportación de datos. Adicionalmente, es recomendable exportar un presupuesto con las mediciones contractuales, ya que el contrato es a suma alzada y se podrá modificar las mediciones vinculándolas al modelo 3D; así, es posible comparar dos versiones del presupuesto: una contractual y otra que considere mediciones directas del modelo 3D. Finalmente, durante la elaboración del presupuesto del casco estructural se creó una tercera versión, en esta se diferencia elementos en la Subestructura y Superestructura; la consideración expuesta se toma en cuenta debido a que facilita la planificación y evita errores en la simulación 4D.

## CAPITULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente capítulo se divide en 2 secciones, en la primera se mostrarán los resultados obtenidos a partir de la elaboración de los modelos descritos en el Capítulo 3, y en la segunda sección se discutirán los resultados obtenidos.

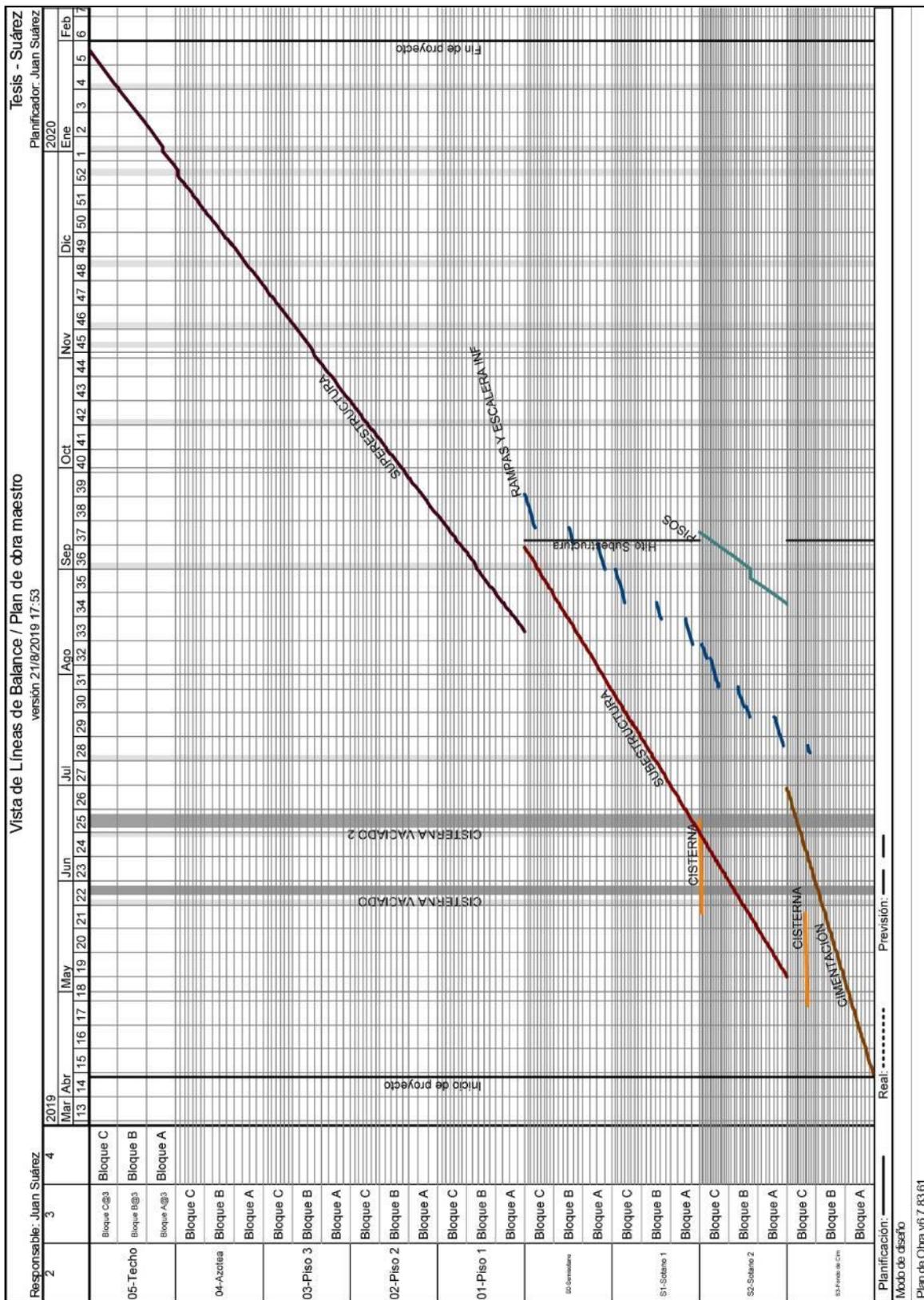
### 4.1. RESULTADOS

En el modelo BIM 5D se han vinculado mediciones del modelo 3D, presupuesto y planificación. A partir del modelo 5D, se han obtenido cronogramas y reportes para planificar el plazo y costo.

En el caso del plazo, se elaboró un extracto del Cronograma Maestro, usando líneas de flujo, para la fase de casco estructural (**Figura 4.1**) y una Planificación por Fase con líneas de flujo para la etapa de cimentaciones (**Figura 4.2 y 4.3**), subestructura o pórtico inferior (**Figura 4.4**) y superestructura o pórtico superior (**Figura 4.5**); estos cronogramas tienen un detalle por semanas y por partidas, excepto en la Figura 4.2, donde se detalla por grupos de partidas; lo descrito se complementa con la Planificación en base a Barras Gantt (**Figura 4.8**). Adicionalmente, se elaboró una Planificación con detalle semanal a base de líneas de Flujo discontinuas (**Figura 4.6**) para las Estructuras de Sostenimiento (Calzaduras), con el fin de comparar esta planificación con la que fue elaborada a partir de tareas continuas (en la planificación del casco estructural); en este cronograma se muestra una aproximación de las líneas en el Anillo 7 y 8, con detalle diario, para visualizar la distribución de tareas (**Figura 4.7**); además los nombres de cada línea se visualizan claramente en la Figura 3.30. Finalmente, se muestra una imagen de la simulación 4D del casco estructural (**Figura 4.9**), la cual resume visualmente la planificación con líneas de flujo.

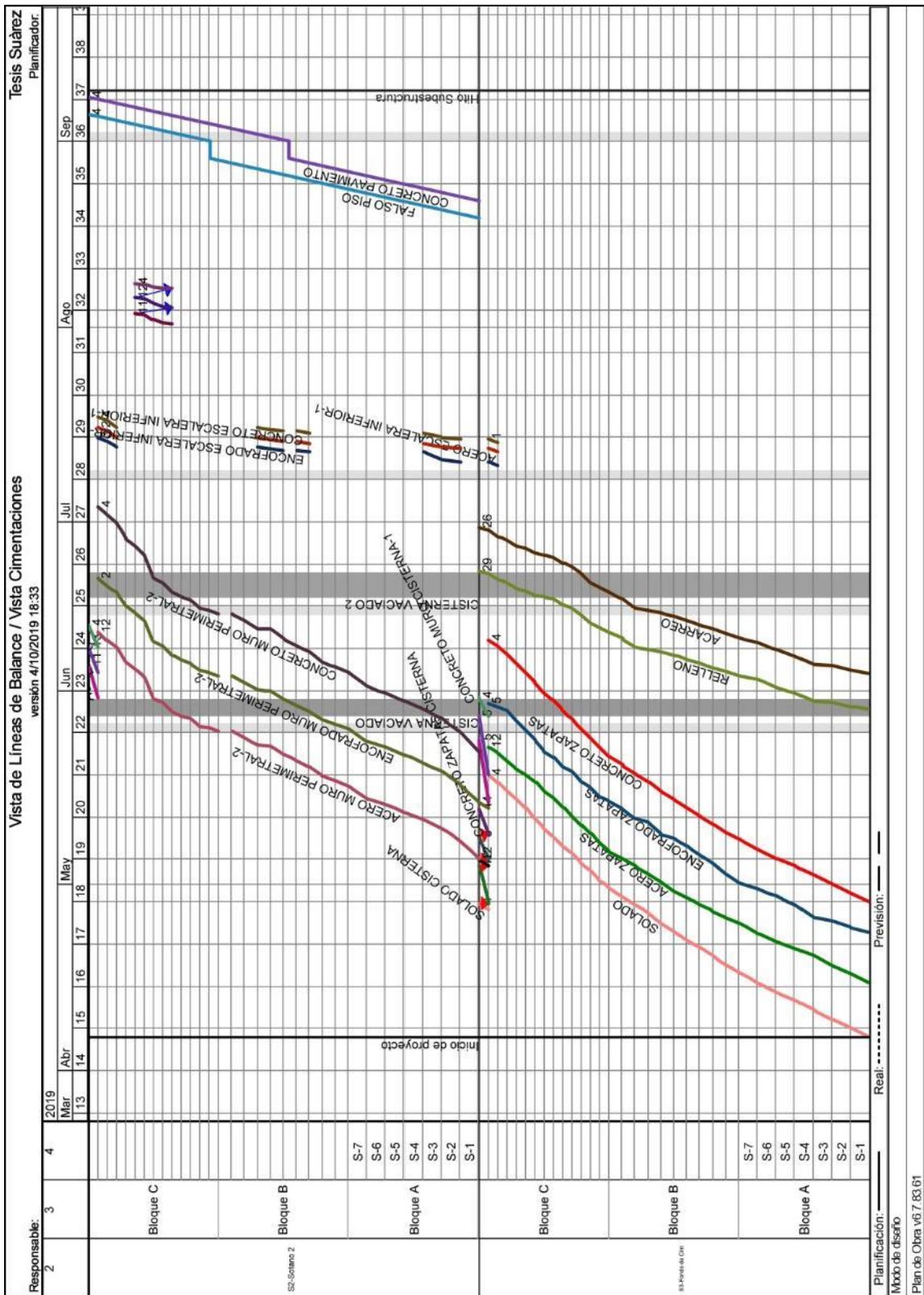
En el caso del costo, a partir de lo planificado en el casco estructural, se elaboraron reportes de demanda de recursos y comparaciones con el presupuesto. Primero se obtuvo un Gráfico de Recursos (**Figura 4.10**), este muestra un detalle de cuántos Operarios, Oficiales y Peones se utilizarán por semana en el casco estructural. Además, se obtienen Histogramas acumulados para todos los recursos incorporados al modelo 5D; en esta investigación se mostrará los Histogramas acumulados de Acero de refuerzo en toneladas y costo en soles (**Figura 4.11**), Encofrado en  $m^2$  y costo en soles (**Figura 4.12**), Concreto en  $m^3$  y costo en soles (**Figura 4.13**), y Horas Hombre de Operario (**Figura 4.14**); se debe adicionar que todos los histograma se muestran con un detalle mensual, se debe adicionar que este detalle podría ser semanal o, incluso, horario; además, los histogramas abarcan todas las partidas y todo el plazo de la fase del casco estructural. Se hace énfasis, también, en la facilidad de adquirir información del plazo para generar reportes de costo en el modelo 5D; así, se pueden obtener Histogramas acumulados según una etapa específica y enfocar la información en alguna de estas; para ejemplificar esto, se mostrará el Histograma de Concreto en  $m^3$  según la etapa de Cimentaciones (**Figura 4.15**), Pórtico Inferior (**Figura 4.16**) y Pórtico Superior (**Figura 4.17**) con detalle semanal; estos histogramas solo abarcan las partidas correspondientes a cada etapa.

A partir de la planificación de todo el proyecto, es posible obtener el Cronograma de Avance de Obra (CAO) según lo planificado en las líneas balance, este se muestra resumido en un histograma acumulado (**Figura 4.18**). Finalmente, se obtiene una comparación automática del presupuesto del modelo 5D (vinculado a mediciones del modelo 3d) con el presupuesto contractual (**Figura 4.19**), en esta comparación se puede evidenciar rápidamente en qué partidas se realizó un metrado conservador en la licitación, y en cuáles se sobrepasa lo estimado.



**FIGURA 4.1** Extracto del Cronograma Maestro de la fase de casco estructural del proyecto utilizando Líneas de Flujo.





**FIGURA 4.3** Planificación por Fases de la etapa de Cimentaciones del proyecto con detalle por partidas utilizando Líneas de Flujo.

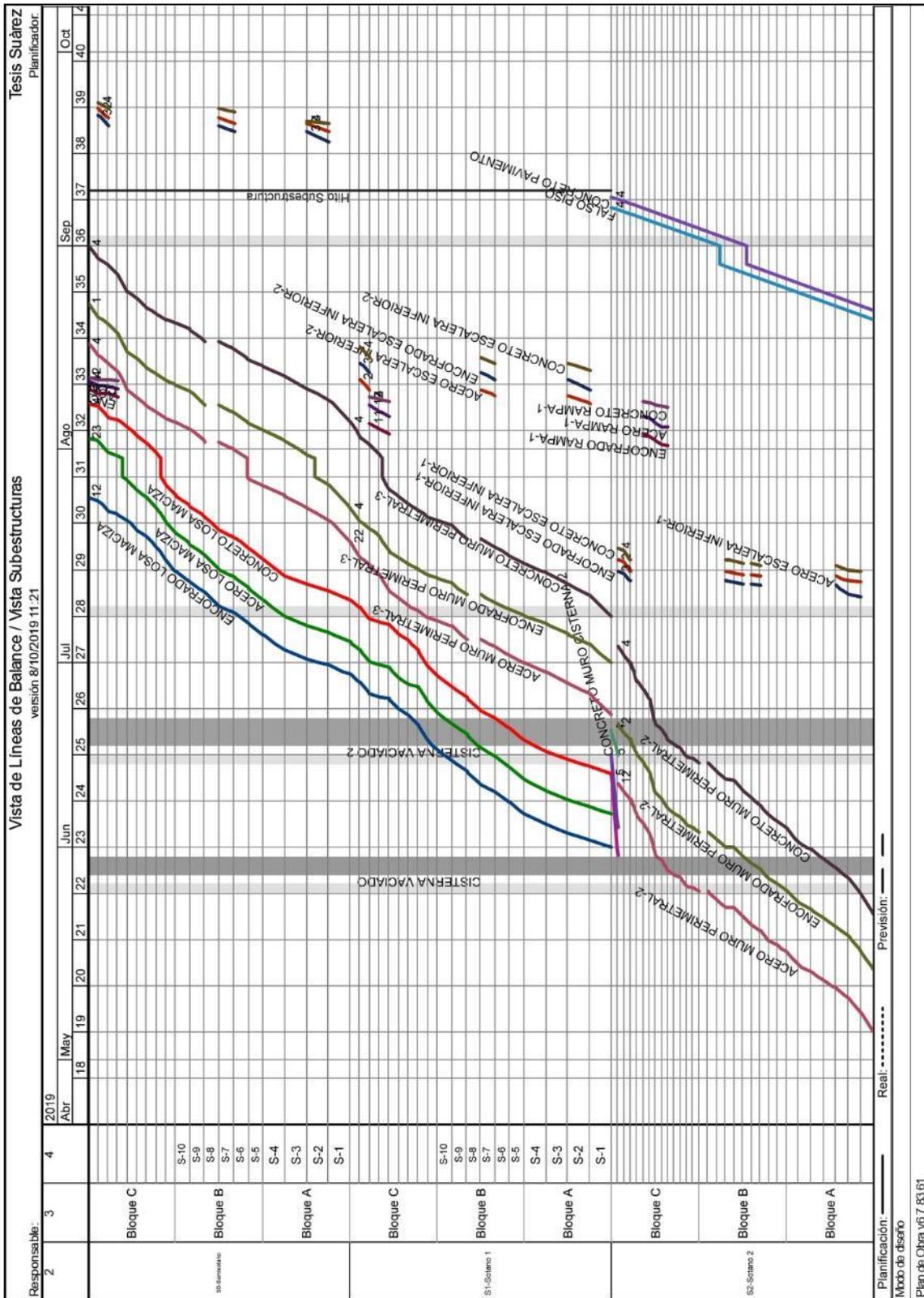
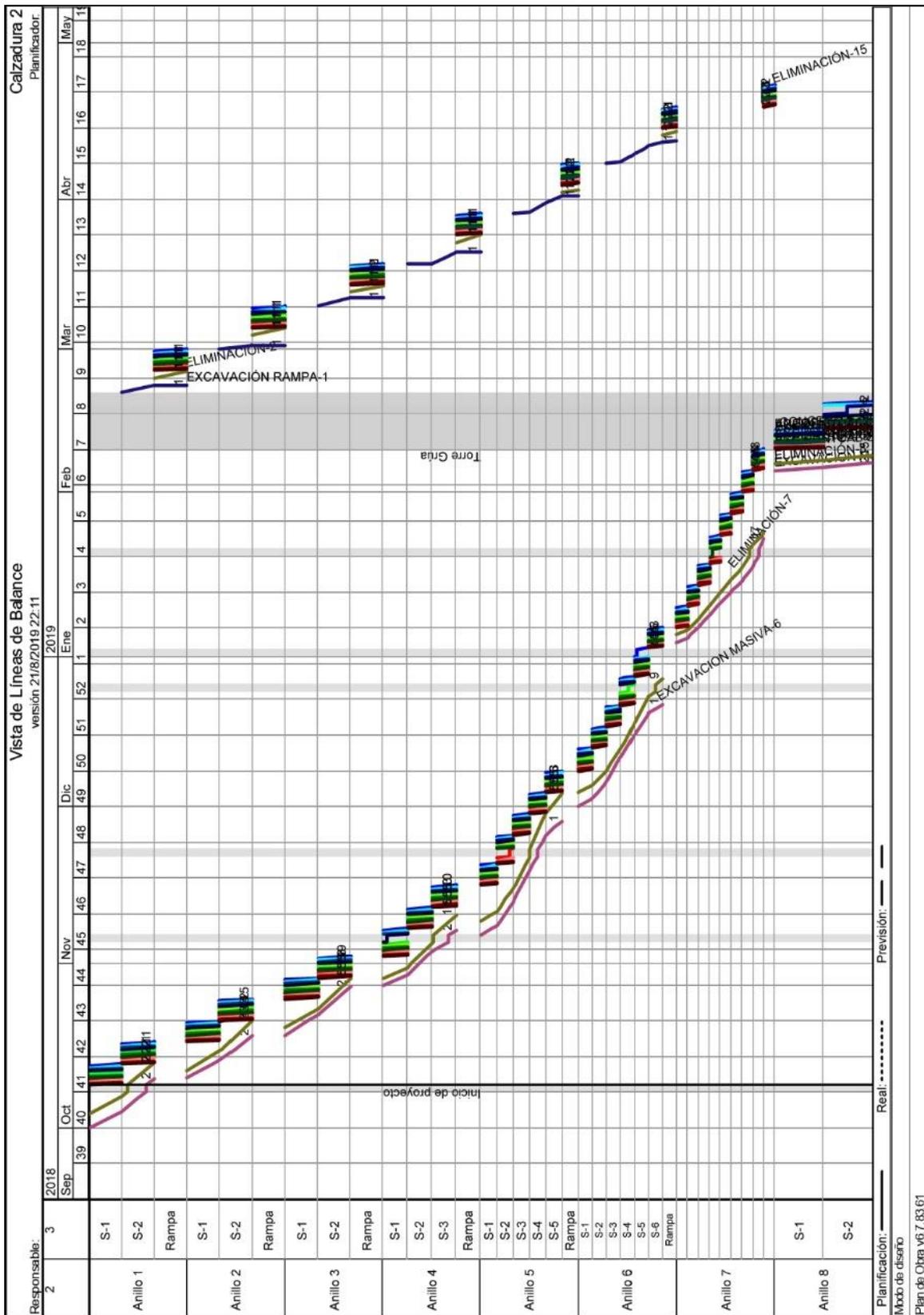


FIGURA 4.4 Planificación por Fases de la etapa de Pórtico Inferior del proyecto con detalle por partidas utilizando Líneas de Flujo.





**FIGURA 4.6** Planificación de la etapa de Calzaduras del proyecto utilizando Líneas de Flujo.

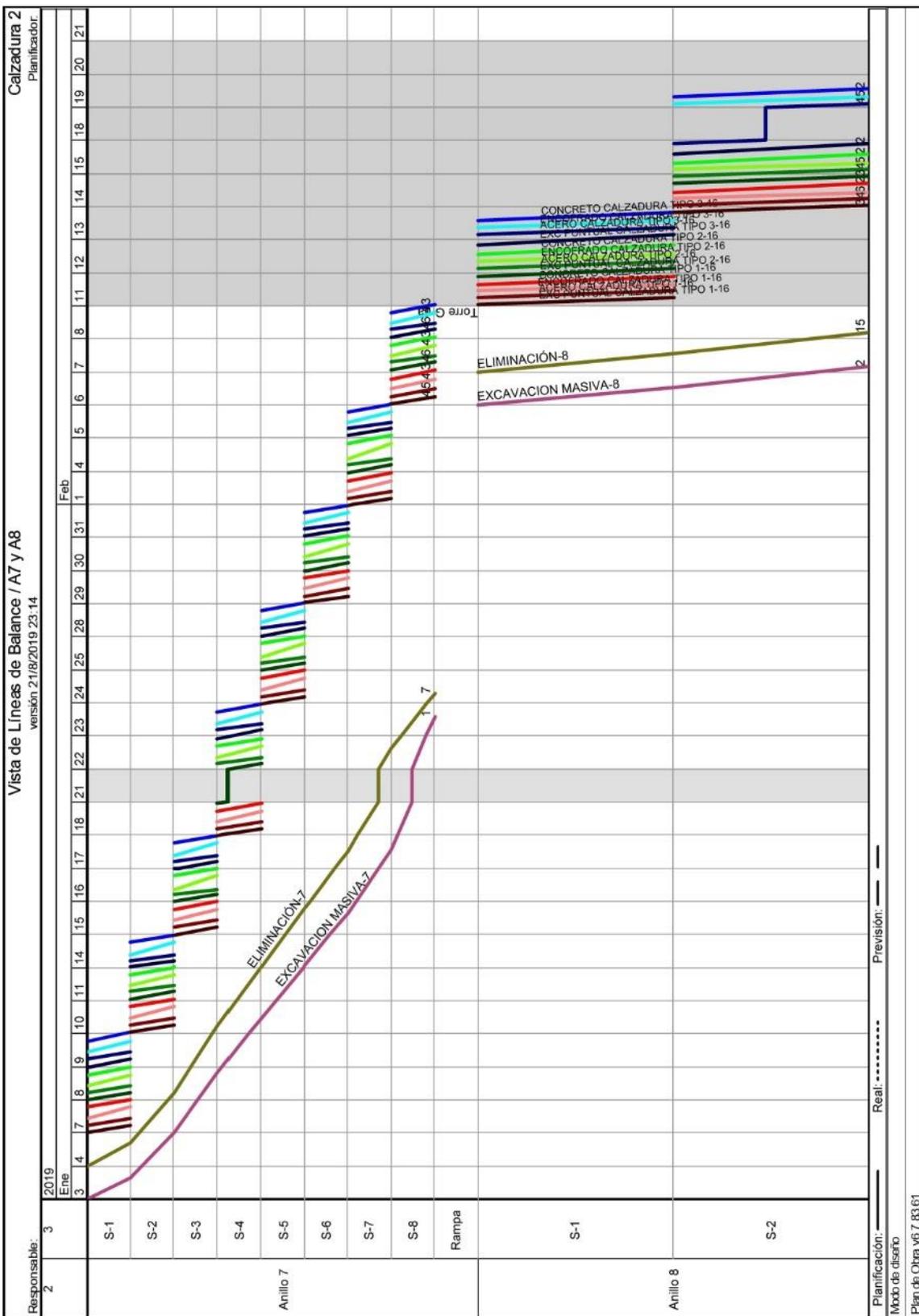


FIGURA 4.7 Anillo 7 y 8 de la Planificación en la etapa de Calzaduras del proyecto utilizando Líneas de Flujo.

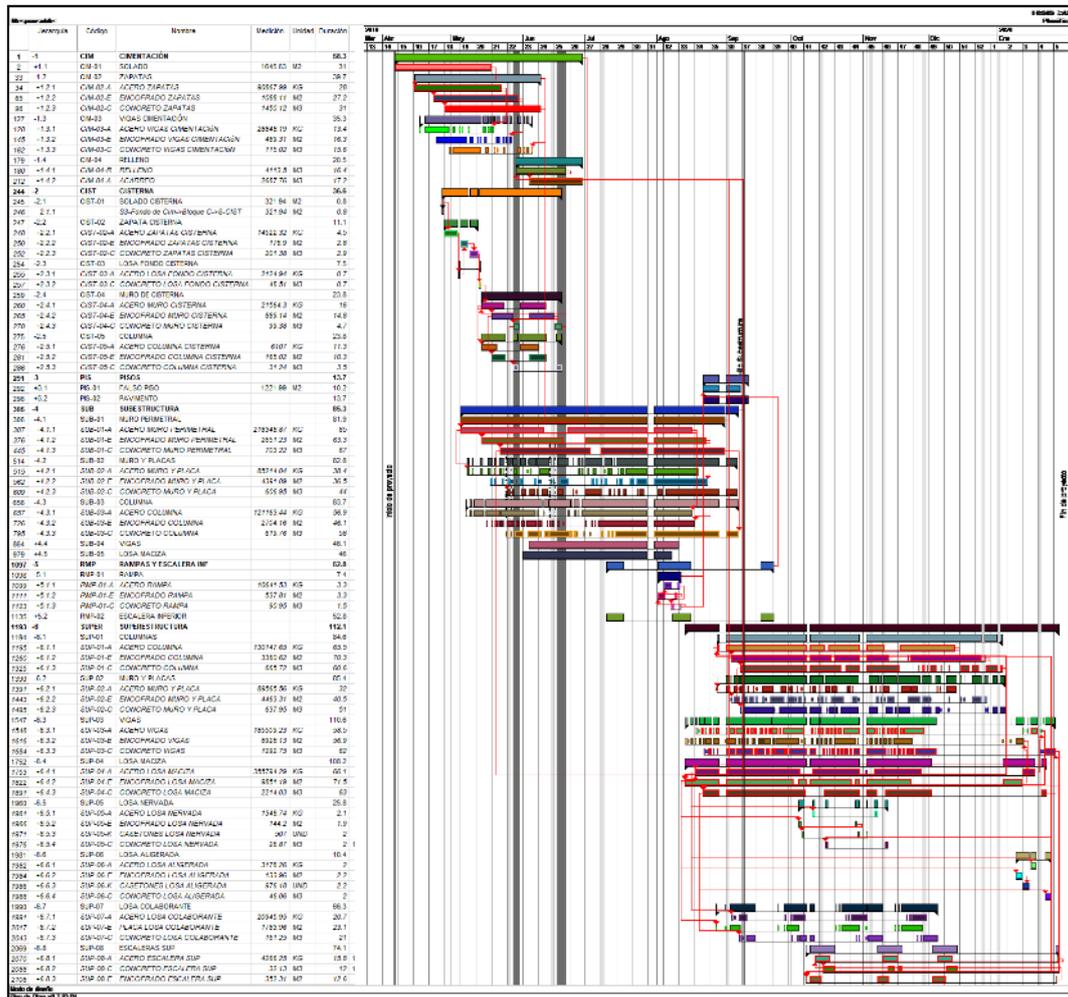


FIGURA 4.8 Planificación del proyecto con barras Gantt.

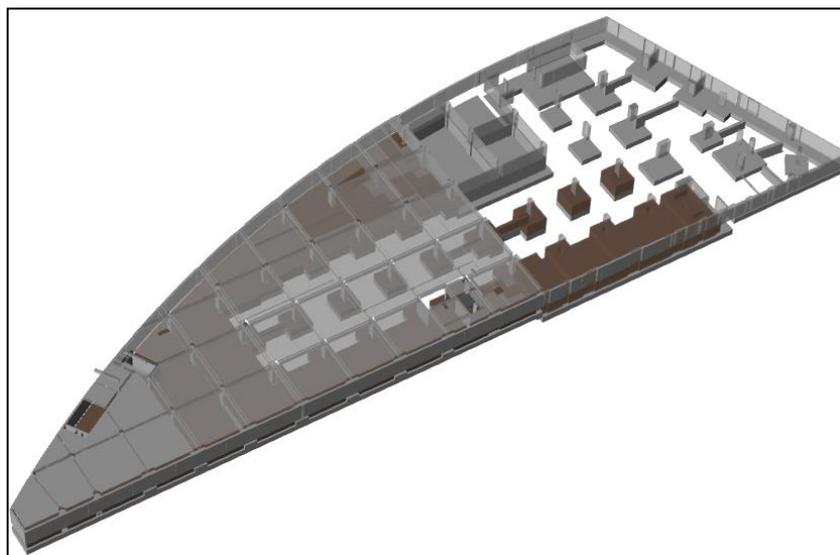


FIGURA 4.9 Captura de la Simulación 4D de la planificación del proyecto.

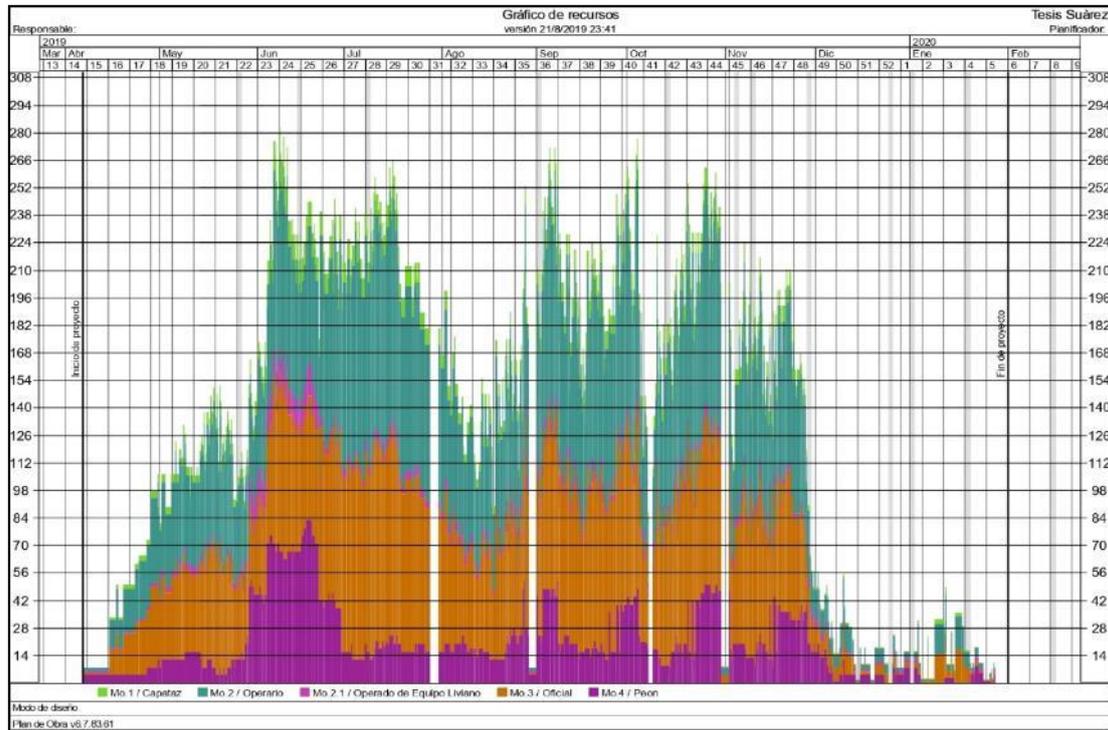


FIGURA 4.10 Gráfica de recursos de Mano de Obra de todo el proyecto con detalle Semanal-

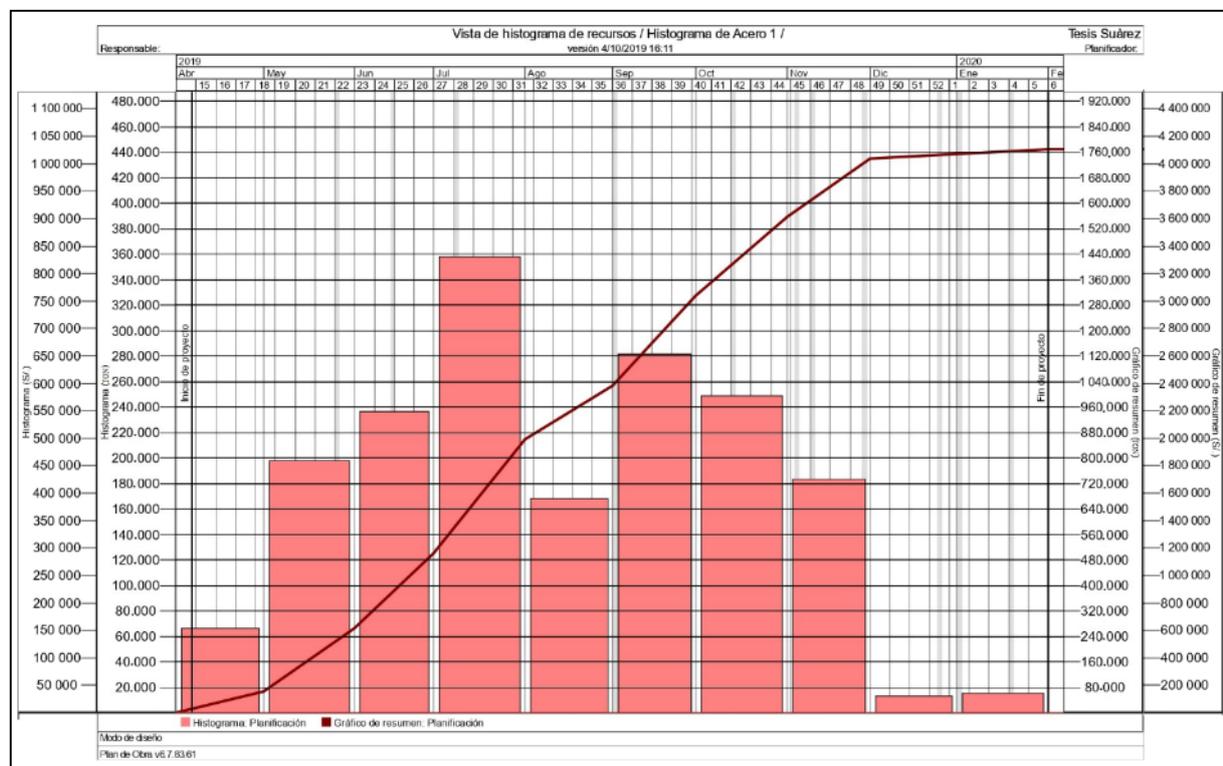
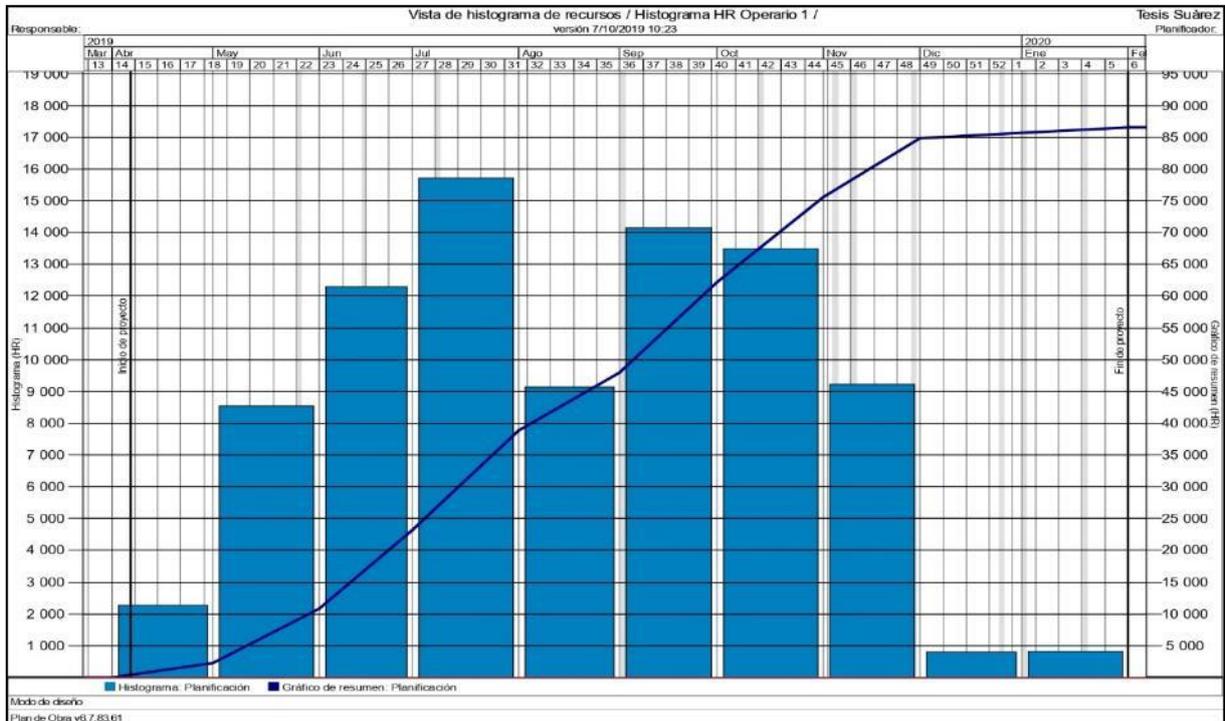
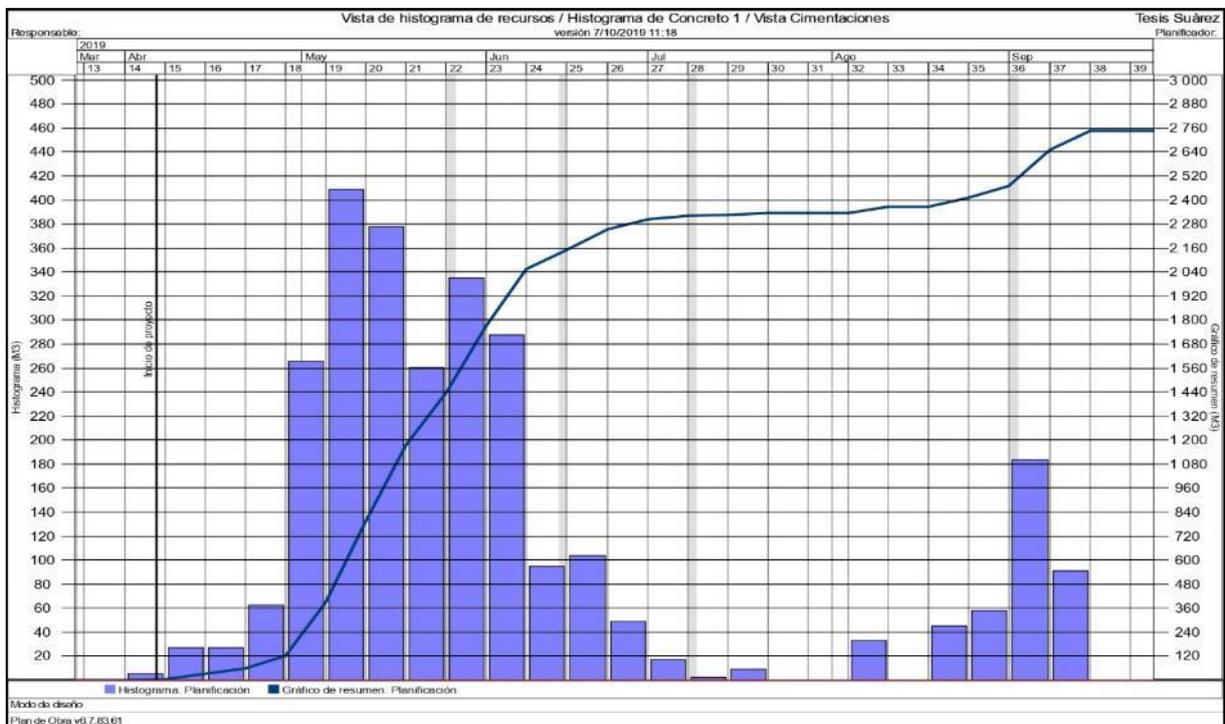


FIGURA 4.11 Histograma acumulado planificado de Acero de refuerzo por ejecución (toneladas) y costo (soles) con detalle mensual para todo el proyecto.

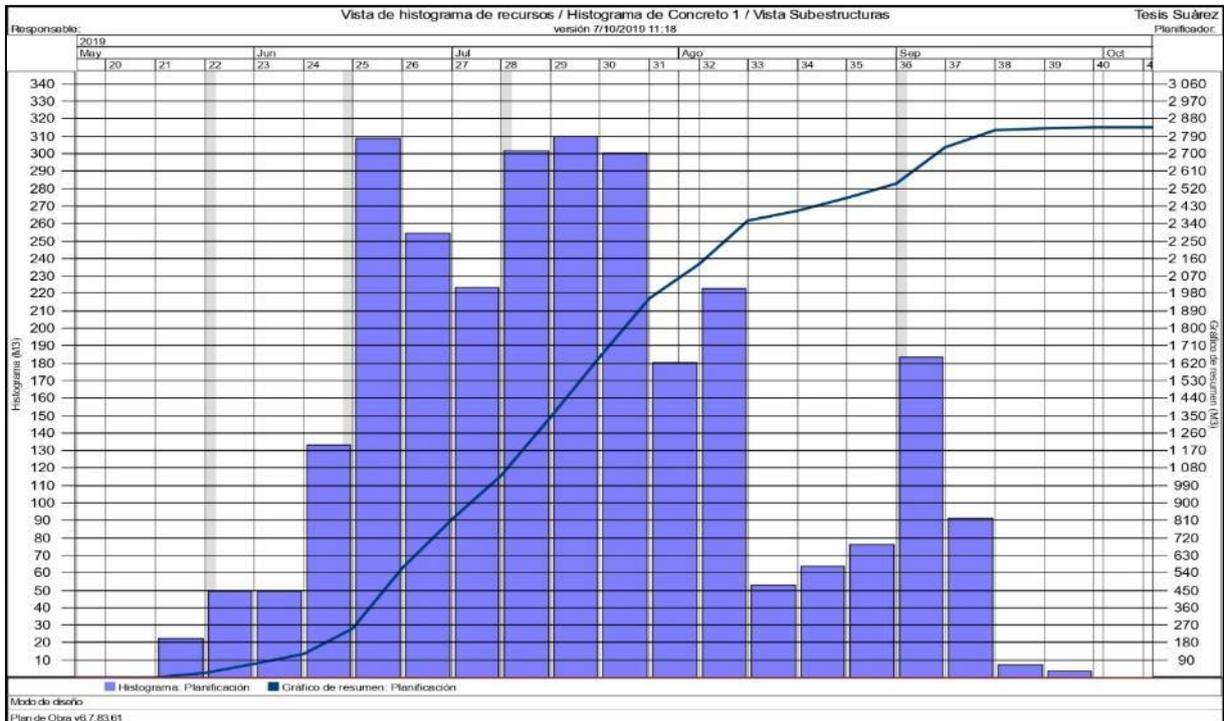




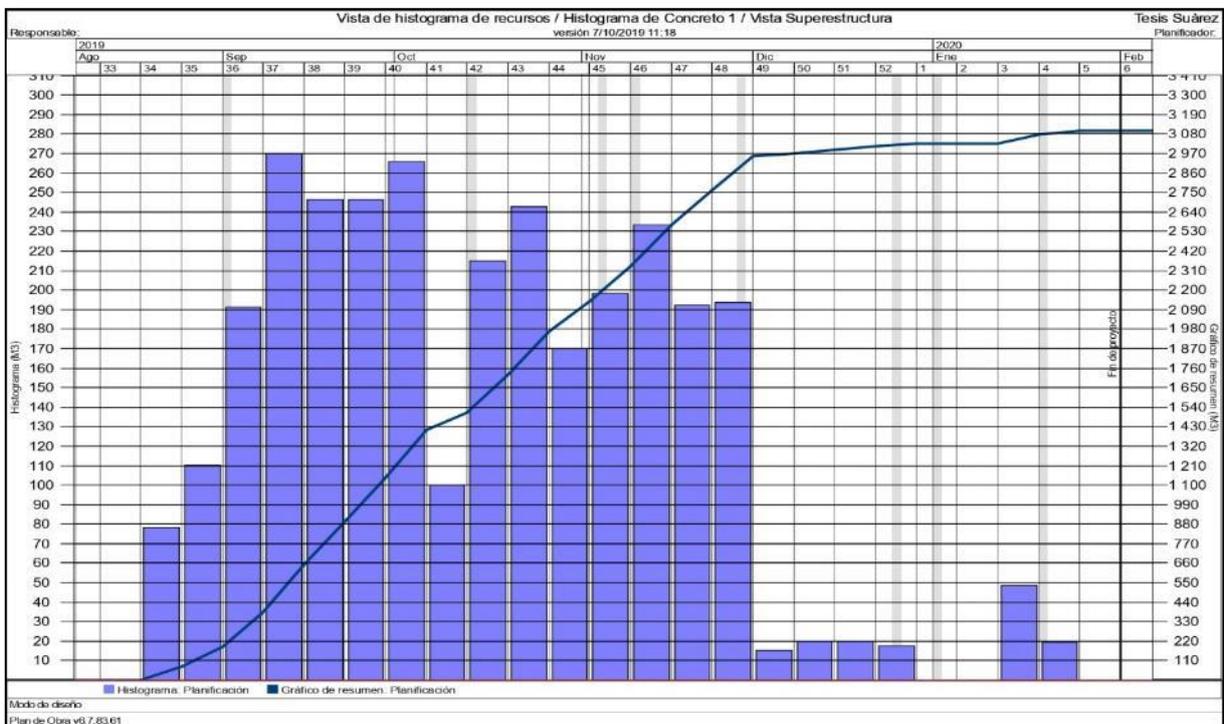
**FIGURA 4.14** Histograma acumulado planificado de Horas Hombre de Operarios (HH) con detalle mensual para todo el proyecto.



**FIGURA 4.15** Histograma acumulado planificado de Concreto por ejecución (metros cúbicos) con detalle semanal para las partidas de Cimentaciones.



**FIGURA 4.16** Histograma acumulado planificado de Concreto por ejecución (metros cúbicos) con detalle semanal para las partidas de Pórtico Inferior.



**FIGURA 4.17** Histograma acumulado planificado de Concreto por ejecución (metros cúbicos) con detalle semanal para las partidas de Pórtico Superior.

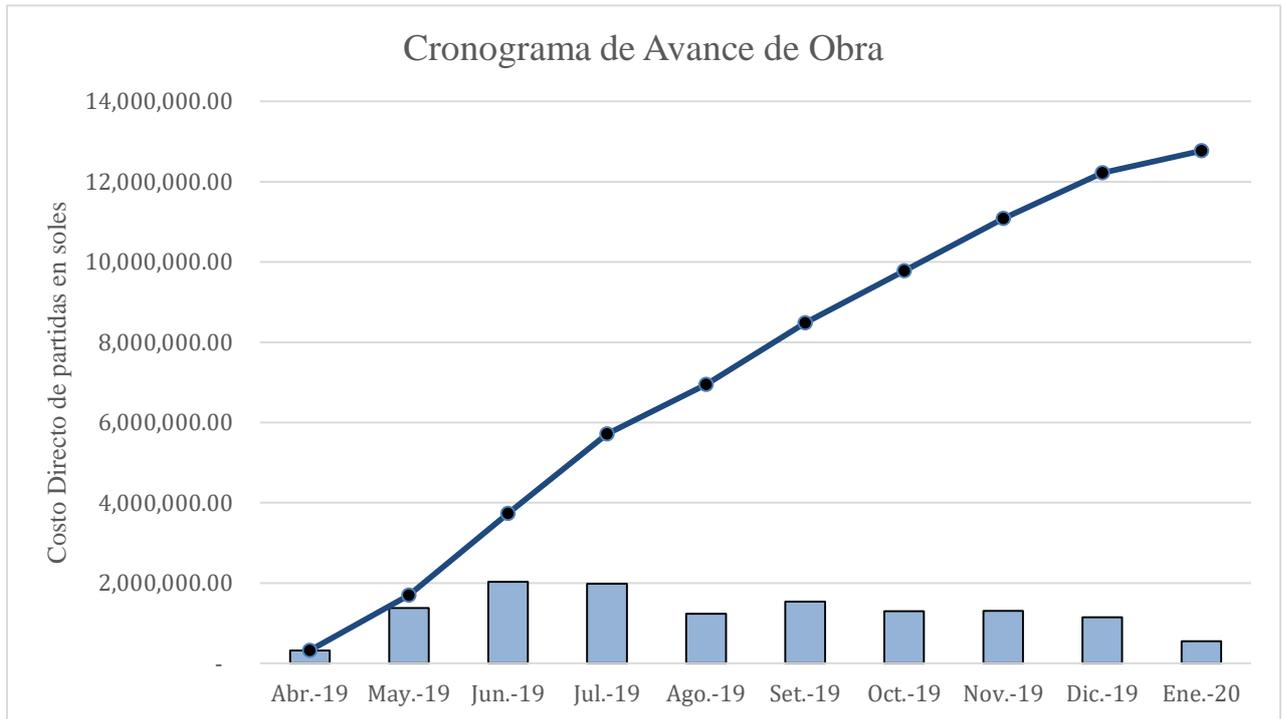


FIGURA 4.18 Histograma acumulado del Cronograma de Avance de Obra elaborado a partir del Modelo BIM 5D.

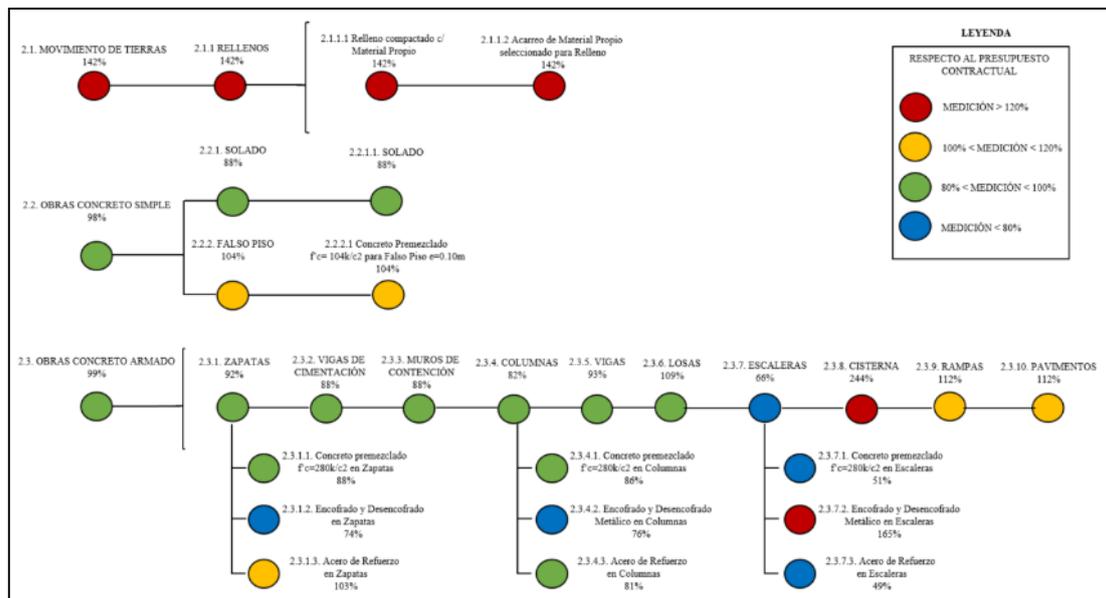


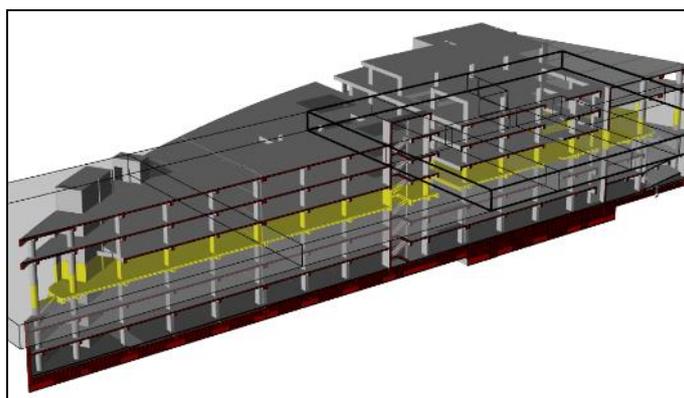
FIGURA 4.19 Diagrama comparativo de Costo Directo obtenido a partir del modelo 5D respecto al Presupuesto contractual.

## 4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 4.2.1. Modelo 5D

El modelo 3D elaborado en Revit es fácilmente exportado al software Vico Office mediante el formato IFC; además, el software Vico determina mediciones automáticamente según la familia del elemento, con estas se puede determinar cuantías de partidas de manera directa, como el concreto (volumen del elemento); o de manera indirecta, como el encofrado (sumatoria de diversas áreas) y el acero (si depende del volumen de concreto). Después se vinculan las cuantías definidas con las partidas del presupuesto importado de Excel; y estas partidas, a su vez, se pueden vincular fácilmente al plan de obra.

Cuando se define el LBS en el modelo 5D se han hecho cortes que abarcan los elementos verticales de un nivel y la losa inferior del mismo; por esta razón, en los cronogramas de líneas de flujo se visualizarán las tareas de horizontales precediendo a los verticales en una misma locación de Nivel 1. En la Figura 4.20 se muestra resaltado (de color amarillo) el Piso 1, este abarca los verticales del piso (hasta el fondo de viga) y la losa inferior (incluyendo vigas).



**FIGURA 4.20** Locación Piso 1 delimitada en el modelo 5D.

#### 4.2.2. Plazo y Líneas de Flujo

*Location Breakdown Estructure (Tabla 3.4).*

Las locaciones de Pisos y Bloques (Nivel 1 y 2) definidas para el modelo 5D son aplicables para todas las fases siguientes del proyecto (arquitectura e instalaciones); sin embargo, los Sectores (Nivel 3) cumplen con consideraciones constructivas aplicables solo a la etapa de casco estructural; así, estas locaciones solo son útiles para cronogramas de producción, además serán distintas según la fase del proyecto. Respecto a la etapa de estructuras de sostenimiento, se comprobó que los Niveles 1 y 2 del LBS no son compatibles con esta etapa, por lo cual se plantea otro LBS mostrado en la Tabla 3.4.

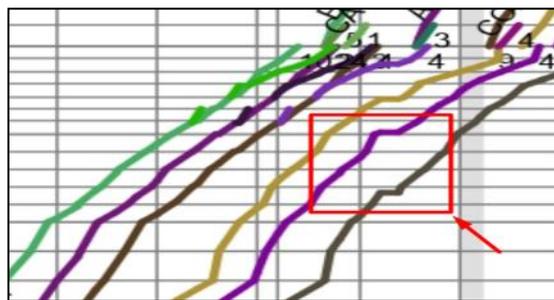
*Cronograma Maestro usando Líneas de Flujo (Figura 4.1).*

El Cronograma Maestro (de la teoría del *Last Planner System*) elaborado con líneas de flujo permite indicar los hitos, duraciones y grupos de partidas; además, el eje X representa semanas (eje de tiempo) y el eje Y representa Niveles y Bloques (eje de locación). El detalle es suficiente ya que solo se muestran los grupos de partidas como Pórtico Superior, Pórtico Inferior y Cimentaciones; la pendiente de estos grupos deberá ser alineada con la pendiente de las líneas de otras fases referentes a Acabados, Instalaciones y Excavaciones. Sin embargo, la planificación en un principio se deberá hacer con ratios (un área de 800 m<sup>2</sup> por semana en pórtico, por ejemplo), ya que la confiabilidad de las tareas, conforme estas dependen de varias predecesoras, disminuye notablemente (menos de 10% con 50 predecesoras); además, cuanto más largo sea el periodo de este pronóstico y cuanto más detallado sea, mayor será el error (Orihuela, 2013).

*Planificación por Fases utilizando Líneas de Flujo (Figuras 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5).*

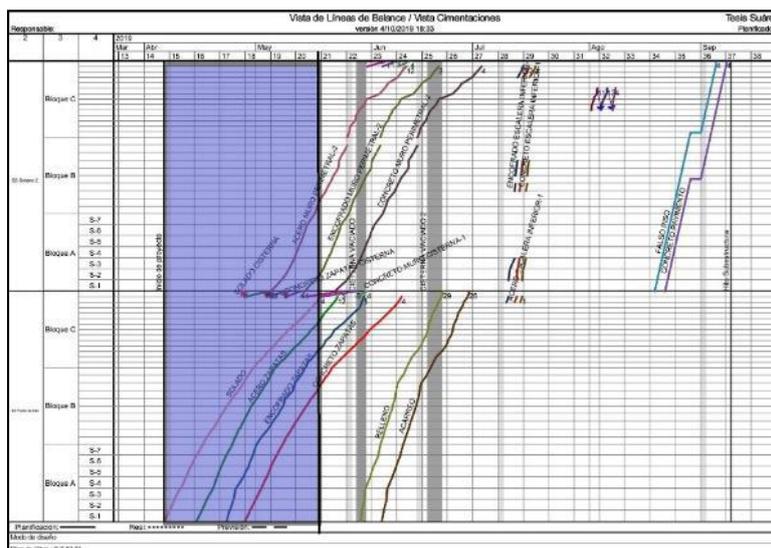
La programación por fases, de la Teoría del *Last Planner System*, es compatible con las líneas de flujo porque las tareas se han planificado a partir de un hito contractual (línea vertical) y se han balanceado según la velocidad de producción del *backbone* (línea ajustada de la tarea considerada cuello de botella) correspondiente a cada grupo de tareas; esto ayuda a ajustar una tasa de producción meta que evite pérdidas por sobreproducción o esperas entre tareas. Así, al planificar usando líneas de flujo se tiene como base las tasas: metrado/día y no la duración; además, el control se basa en dichas tasas.

El detalle de este cronograma es por semanas en el eje de tiempo, y por Niveles, Bloques y Sectores en el eje de locación; además, las líneas inclinadas representan las partidas o grupos de partidas. El detalle semanal es suficiente debido al horizonte largo de planificación, que en promedio es de 6 meses por cada fase (cimentación, subestructura y superestructura). El detalle máximo de locaciones son los Sectores, estos son necesarios porque están diseñados para mostrar el flujo continuo del trabajo en el casco estructural; sin embargo, las líneas deberán ser uniformes y no se deben mostrar variaciones debido a pequeñas diferencias en los metrados de los sectores, como se muestra en la Figura 4.21; las variaciones mostradas en la pendiente son un detalle excesivo, ya que complican el cronograma adicionando un nivel de especificación que no será de utilidad al tener un horizonte de planificación confiable de sólo 6 semanas.



**FIGURA 4. 21** Falta de Uniformidad en líneas de flujo por diferencia de metrado entre sectores.

Los cronogramas de planificación mencionados no protegen la producción directa de variaciones en sus precedentes ni de la incertidumbre inherente; así, para reducir costos y duraciones, la producción debe asegurarse con la introducción de compromisos en la planificación a corto plazo (Ballard & Howell, 1994). Lo descrito implica que estos cronogramas no aseguran el cumplimiento en obra de lo planificado debido al amplio horizonte de planificación que abarcan; la teoría del Last Planner System indica que se puede asegurar la producción en un horizonte máximo de 6 semanas, a partir de compromisos asumidos por responsables designados. Por ende, debe evaluarse si el detalle y tiempo invertido en la elaboración son admitidos en los cronogramas del proyecto, teniendo en cuenta que sólo se pueden hacer compromisos confiables para las 6 semanas inmediatas. En la Figura 4.22 se ha sombreado el horizonte de 6 semanas respecto a todas las semanas planificadas en la etapa de Cimentaciones (de la Figura 4.3), esta Imagen enfatiza que, teniendo en cuenta que se han designado responsables y estos han asumido compromisos para el inicio de labores en esta etapa, solo se tiene una estimación concreta de menos del 30% del horizonte del cronograma.

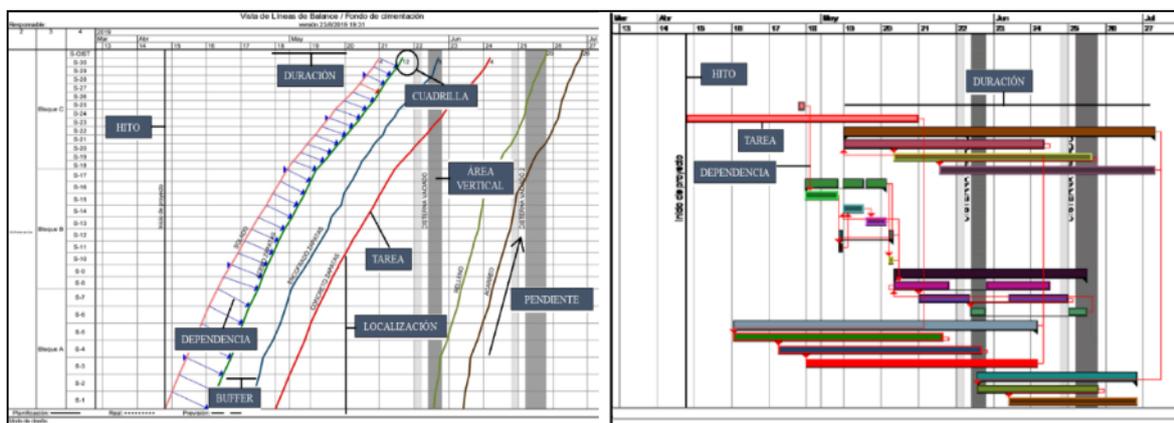


**FIGURA 4. 22** Horizonte de 6 semanas resaltado en el cronograma planificado para la etapa de Cimentaciones.

Finalmente, en la planificación con líneas de flujo también es posible implementar una fase de control y pronóstico; así, en el mismo cronograma se hace un seguimiento a lo ejecutado realmente (líneas punteadas) y se proyecta según la ejecución actual (líneas con rayas intercaladas). Sin embargo, se recomienda hacer este control sobre cronogramas con un horizonte de planificación de 6 semanas.

*Ventajas sobre el Cronograma elaborado a base de Barras Gantt.*

En los cronogramas a base de líneas de flujo (Figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5) se pueden visualizar fácilmente tareas, ubicación, duración, dependencias de todo nivel, buffers, hitos, áreas verticales, pendiente (velocidad de producción) y cuadrillas (Figura 4.23 A).



(A)

(B)

**FIGURA 4. 23** (A) Detalle de visualización en líneas de Flujo (B) Detalle de visualización en Barras Gantt.

Los detalles descritos superan la capacidad del Cronograma a base de barras Gantt (Figura 4.8), en el cual solo es posible visualizar hitos, duración y dependencias (Figura 4.23 B).

Respecto a **las dependencias** se obtiene que son más fáciles de visualizar y organizar (según los tipos mencionados en la sección 2.1.2) en líneas de flujo; por ejemplo, para mostrar el detalle de locaciones de las líneas de flujo dentro del diagrama Gantt se necesita crear una

tarea y una dependencia adicional por cada bloque, piso y sector; esto complica la visualización y entendimiento del cronograma al punto que se debe evitar este detalle. Lo descrito se evidencia en la Figura 4.24 donde se muestran las dependencias y tareas adicionales que se crean para visualizar las locaciones del Solado.

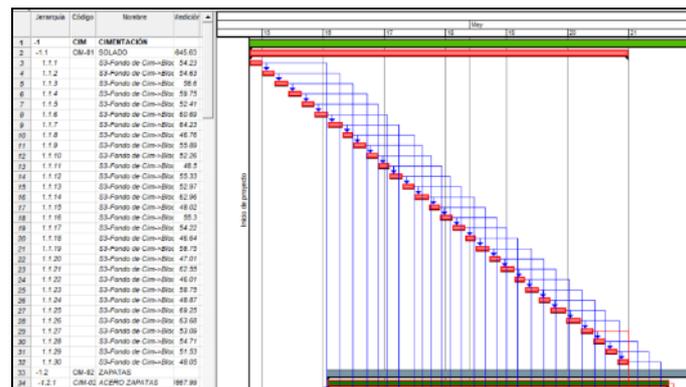


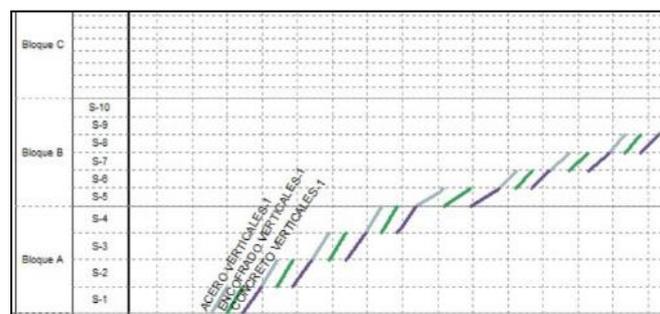
FIGURA 4.24 Tareas y dependencias adicionales requeridas para el detalle por localización en Diagrama Gantt.

Las **áreas verticales** elaboradas en los cronogramas con líneas de flujo de casco estructural y estructura de sostenimiento (Figura 4.1, 4.2, 4.3 y 4.6) resaltan fechas en las que existirá menor producción en el desarrollo de partidas, mayores horas de trabajo en un día o traslado especial de máquinas o equipos. Debido al uso de líneas de flujo, se puede visualizar en qué locaciones y tareas, específicamente, se vería afectado el proyecto por las condiciones previamente mencionadas. En un Cronograma Gantt, las áreas verticales permitirían resaltar las fechas e indicar las tareas, pero no se conocerá la locación afectada.

La ventaja principal de utilizar líneas de flujo es que la planificación, control y pronóstico se elabora a base de una tasas de producción teóricas, reales y proyectadas, respectivamente; en cambio, los cronogramas a base de barras Gantt no permiten controlar según la ejecución actual, sino por duraciones planificadas inicialmente; además, no es posible insertar, en los cronogramas Gantt, el metrado ejecutado a la fecha ni proyectarlo para comparar con lo planificado.

*Planificación de tareas continuas y discontinuas.*

En la planificación del proyecto utilizando líneas de flujo se distinguen dos tipos: utilizando tareas continuas (Figura 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5) o discontinuas (Figura 4.6 y 4.7). Las líneas de flujo con tareas continuas no reflejan el proceso de ejecución real en obra, como se ha visto en los cronogramas elaborados. En la Figura 4.25 se muestra una planificación que indica el flujo real en obra mediante tareas discontinuas, donde el acero del sector 2 comienza al finalizar el concreto del sector 1, y el concreto de un sector inicia al finalizar el encofrado.



**Figura 4.25** Planificación con líneas de flujo discontinuas teniendo en cuenta la secuencia real en obra.

Cuando se planificó con líneas discontinuas se evidencian tres desventajas respecto a un cronograma con tareas continuas. En primer lugar, se pierde la visualización de la pendiente de las tareas, lo que significa que se pierde la capacidad de control en el cronograma a partir de lo ejecutado en obra; en segundo lugar, no es posible considerar buffers en la planificación a largo plazo; en tercer lugar, se asume, con líneas discontinuas, que algunas tareas iniciarán a la mitad del día o al tercio del día, lo que se traduce como una especificación horaria del tiempo de inicio y fin de la tarea, esto es un detalle innecesario debido a que es poco razonable comprometerse con cronogramas con nivel de detalle en un horizonte de programación mayor a 1 día; este detalle horario se puede visualizar en la Figura 4.26, que es un extracto de la planificación del Anillo 7 de calzaduras. Así, en la planificación de una fase es necesario mostrar las pendientes de las tareas, los buffers y sólo detallar semanalmente, por lo cual es

preferible planificar con líneas continuas y, por ende, perder la visualización del flujo real de las tareas en obra.

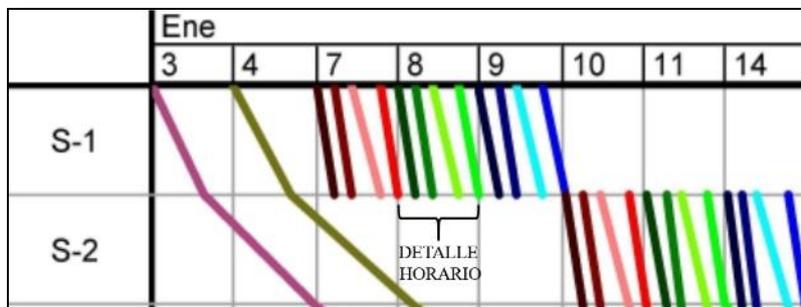


FIGURA 4.26 Detalle Horario en líneas discontinuas

#### *Simulación 4D.*

La visualización de la simulación 4D se obtiene automáticamente con el software Vico Office, ya que el software de planificación con líneas de flujo, Schedule Planner, está vinculado directamente a Vico Office. El resultado de la simulación 4D es un video de la ejecución planificada en las líneas de flujo, donde se puede analizar potenciales errores en los métodos constructivos utilizados. En la Figura 4.9 se muestra una captura de esta simulación. Sin embargo, se considera que esta simulación debe elaborarse para cronogramas donde se haya programado 1 semana de trabajo, teniendo en cuenta restricciones y responsables.

#### **4.2.3. Costos.**

A partir del modelo 5D se obtienen automáticamente resultados de costos que estarán vinculados con la planificación de líneas de flujo; además, como los recursos de todas las partidas están considerados dentro del presupuesto importado al modelo 5D, se tendrá como resultado una planificación que está vinculada a los recursos como mano de obra, materiales y equipos; esto permite obtener gráficas e histogramas relacionados a recursos consumidos y sus costos en el tiempo (Figura 4.10 a 4.17).

*Gráfica de recursos (Figura 4.10).*

A partir del modelo 5D, elaborado por Vico Office, se obtiene una gráfica de recursos que muestra el número semanal de trabajadores que se necesitan para ejecutar el proyecto según las líneas de flujo planificadas; además, se puede especificar la categoría del trabajador. Así, a partir de la gráfica, se verifica que se necesitará un pico de 120 operarios en el proyecto; la demanda de estos será significativa entre los meses de junio hasta noviembre. Además, respecto a los peones se tiene un pico excesivo a partir de abril que se reduce a partir del mes de diciembre, donde el pico es de 10 peones. La cantidad de personas descrita solo considera los trabajadores de las partidas analizadas en la investigación. En contraste, según la experiencia de ingenieros del proyecto se estima un máximo de 130 personas en el mismo, lo cual contradice lo calculado en el modelo 5D; una explicación coherente de este hecho es que se utilizaron velocidades y cuadrillas del Análisis de Precios Unitarios, el cual considera datos muy lejanos al promedio actual.

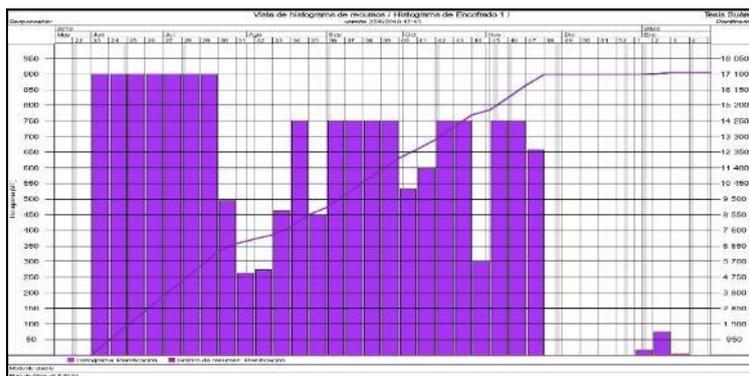
*Histogramas acumulados (Figura 4.11 a 4.17).*

Los histogramas representan la demanda semanal y acumulada de materiales principales (acero, concreto y encofrado) según lo planificado en las líneas de flujo. Las cantidades se han obtenido según los recursos indicados en el presupuesto vinculado al Modelo 5D; por ende, las cantidades mostradas en los resultados tienen incluido el desperdicio.

Respecto al acero de refuerzo (Figura 4.11), se tiene un pico de demanda mensual de 360 toneladas, y una demanda promedio de 240 toneladas en los meses de mayor incidencia (mayo a noviembre); así, en total se tiene una demanda de 1 805 toneladas. Respecto al costo de acero de refuerzo, se estima un costo total de 4 180 000 soles; de este, el mes con mayor demanda de

costo es julio, con 830 000 soles, y en promedio, respecto a los meses de mayor incidencia, se tiene un costo de 570 000 soles.

Respecto al encofrado (Figura 4.12), este material será alquilado y se deben evaluar los picos de demanda mensual. Es usual que se necesite disgregar este histograma, ya que algunos encofrados rotan más rápido por varios elementos respecto a otros; y, además, la consideración para el alquiler es distinta según elemento. La información descrita se genera automáticamente en el modelo 5D; por ejemplo, si se requiere especificar la cantidad de m<sup>2</sup> para alquilar al mes en losa maciza se obtiene el histograma mostrado en la Figura 4.27, donde se evidencia una cantidad demanda de 900 m<sup>2</sup> por semana durante los meses de junio y julio.



**Figura 4.27** Histograma de m<sup>2</sup> de Encofrado por partidas de Losa Maciza.

Respecto al concreto (Figura 4.13), se mostró, en los histogramas, un pico de demanda mensual de 1 980 m<sup>3</sup> según lo planificado, esta considera los desperdicios indicados en el Análisis de Precios Unitarios. Adicionalmente, cuando se inicia una etapa de la fase de casco estructural se debe tener un detalle semanal del concreto; por esto, se obtiene la cantidad de concreto planificada considerando las partidas que están involucradas en cada etapa (Figura 4.15 al 4.17): en Cimentaciones, se tiene un pico de 410 m<sup>3</sup> en la semana 19; en Pórtico Inferior, se tiene un pico de 310 m<sup>3</sup> en la semana 25 y 29; y en Pórtico Superior, se tiene un pico de 270 m<sup>3</sup> en la semana 37. Respecto al costo de concreto (Figura 4.13), se obtiene un

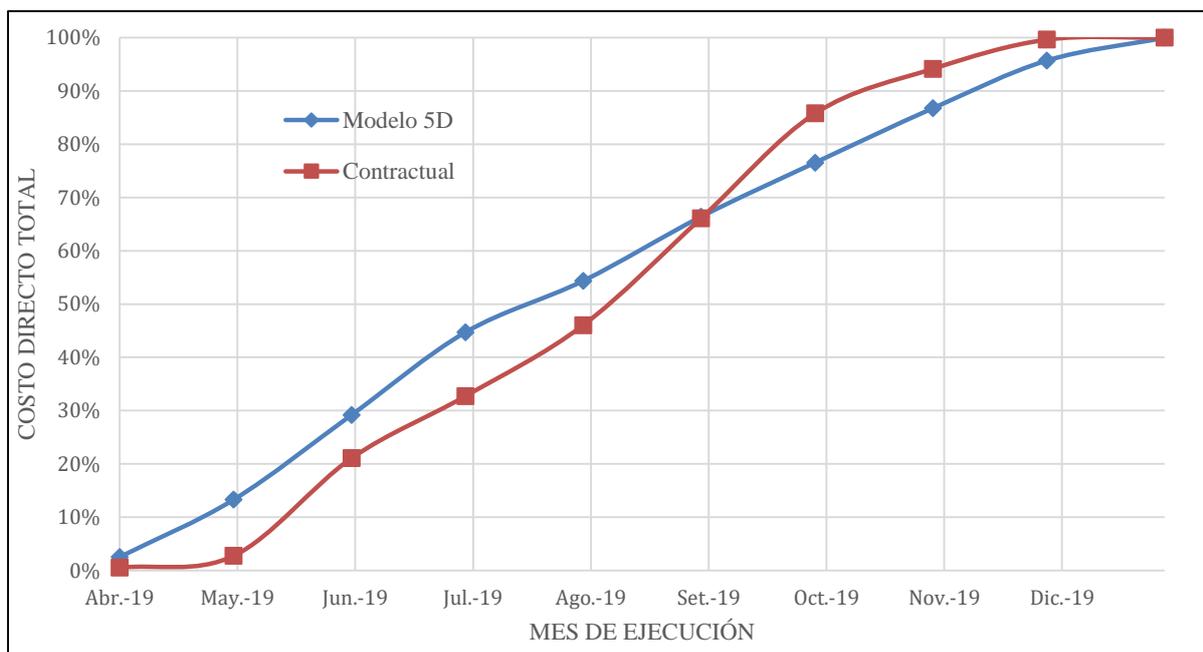
detalle por mes, donde el pico de costo demandado es de 611 884 soles en el mes de Septiembre; además, el monto total será de 3 655 000 soles.

Los histogramas se pueden obtener para todos los tipos de recursos del Análisis de Precios Unitarios insertados en el modelo 5D; así, se elaboró un histograma para las horas hombre demandadas según la categoría de Operarios, donde la máxima demanda mensual será de 15 720 HH en el mes de julio.

Todos los histogramas mostrados se puede actualizar y, con ayuda del software, se puede obtener un seguimiento según el control de avance en obra; así, se puede comparar el estatus real de consumo de recursos en obra con el estatus planificado; además, es importante mencionar que las proyecciones en las líneas de flujo son automáticamente incorporadas a los histogramas acumulados de recursos en el modelo BIM 5D.

*Histograma del Cronograma de Avance de Obra (CAO) elaborado a partir del modelo 5D (Figura 4.18).*

La Figura 4.18 muestra el valor planificado de las partidas según el mes en que se ejecutarán; esto se traduce como una distribución del costo directo en el tiempo. A partir de la gráfica, se obtiene que junio es el mes con mayor valor planificado, 2 millones aproximadamente; además, el valor planificado promedio por mes es de 1.2 millones (para las partidas del alcance de la investigación). El CAO inicial del modelo 5D se puede comparar con la Curva S del Cronograma Valorizado del proyecto (documento contractual), esto se muestra en la Figura 4.28, donde se superponen ambas curvas y se evidencia una tendencia de desplazar la curva contractual a la derecha en la etapa inicial del proyecto y luego compensar el desfase.



**Figura 4.28** Comparación de la Curva S del modelo BIM 5d y cronograma valorizado.

En el proyecto, el CAO se pronostica según el criterio del planificador; sin embargo, esto no es un método apropiado porque implica muchos errores en posibles consideraciones futuras. Utilizando el modelo BIM 5D se puede actualizar automáticamente el Cronograma de Avance de Obra según los pronósticos de avance en las Líneas de flujo, los cuales se basan en la proyección de lo ejecutado en obra hasta la fecha.

*Comparación de costo entre: modelo BIM y presupuesto contractual (Figura 4.19).*

El diagrama presentado en la Figura 4.19 resume la diferencia del costo directo entre los montos obtenidos por el modelo BIM y el presupuesto contractual a suma alzada. De estos resultados se evidencia un costo mayor al 50%, en las partidas de cisternas y relleno del presupuesto, y otros costos mayores al 10%; sin embargo, estas diferencias se compensan entre pérdida y ganancia en todas las partidas haciendo que la diferencia del costo total del presupuesto respecto al modelo BIM sea menor a 1%.

#### **4.2.4. Flujo de la información.**

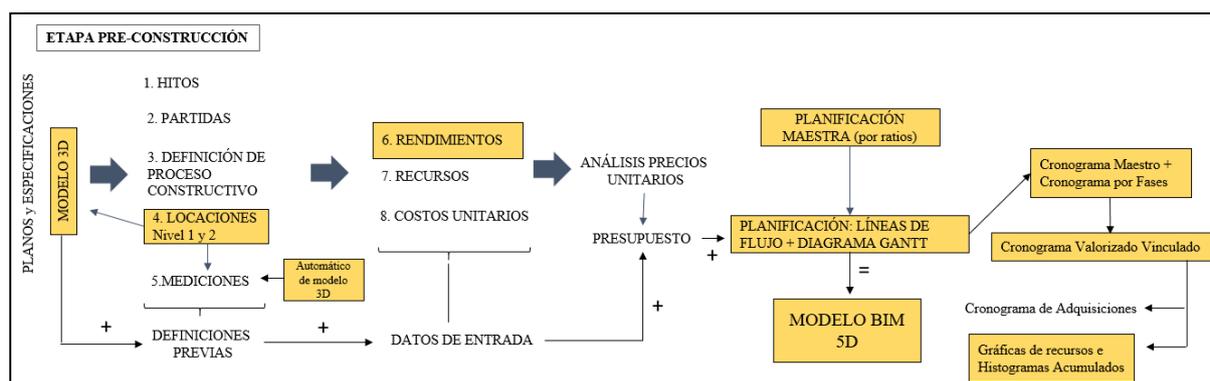
El Flujo de la información que se desarrolla en el proyecto (descrito en la sección 3.1.4) se complementará con las consideraciones y resultados obtenidos a partir del desarrollo del modelo BIM 5D; así, se tendrá una propuesta que consiste en planificar con base en la teoría del LBMS y modelos BIM 5D.

*Durante la etapa de Pre-Construcción.* Respecto a las Definiciones Previas, se deben complementar las definiciones actuales con la especificación de las locaciones y la elaboración del LBS, dichas locaciones serán la base de la planificación del costo y plazo de todo el proyecto; además, el modelo 3D debe incorporar el LBS definido mediante cortes en los elementos con el fin de obtener un modelo con cuantificaciones basadas en las locaciones. Respecto a los Datos de Entrada, se debe revisar los datos de rendimientos y cuadrillas, los cuales deben ser actualizados y se deben basar en la información de empresas especializadas u obras ejecutadas recientemente; si es que no se analizan los rendimientos se presentarán problemas de sobre-estimación de recursos en el modelo BIM 5D. Respecto a los documentos de costos, el Análisis de Precios Unitarios y Presupuesto se deben elaborar en una misma hoja de cálculo donde ambos documentos se complementen y tengan el formato solicitado para importarse al modelo BIM 5D (en el software Vico Office).

Respecto a los resultados de plazo, se debe elaborar, en primer lugar, una planificación a base de ratios generales, luego esto se debe representar en un Cronograma Maestro a base de líneas de flujo, en el cual se deba alinear las pendientes de pórticos con los principales grupos de partidas de otras fases. Se elaborará, también, una planificación por Fase en la que se pueda ajustar los ratios de producción (unidad/tiempo) y cuadrillas para las partidas principales del caco estructural; los cronogramas con líneas de flujo se deben complementar con un

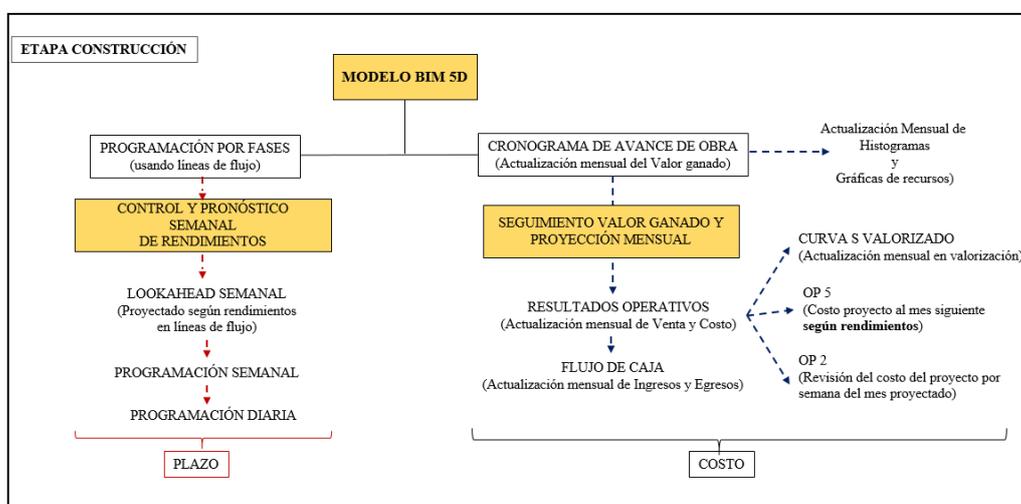
cronograma Gantt. Así, la nueva planificación está vinculada a los datos del presupuesto y a las mediciones. Además, para planificar una fase con líneas de flujo se debe seguir el procedimiento descrito en la sección 3.4.2: definir tareas (o partidas) y grupos de tareas (o grupos de partidas), vincular al presupuesto, especificar locaciones, definir hitos y *backbones*, balancear líneas según hitos y *backbones*, especificar dependencias, y, finalmente, agregar buffers. A partir del proceso descrito, se debe obtener una Planificación por fases (con detalle por tareas y Niveles de locación 1,2 y 3) y el Cronograma con barras Gantt.

Los documentos de costos se pueden complementar con Cronogramas de Adquisiciones, Cronograma Valorizado, Histogramas acumulados y Gráficas de recursos, todos estos documentos estarán vinculados a la planificación y al modelo 3D. Finalmente, el modelo BIM 5D base se obtiene al vincular el Modelo 3D, Definiciones Previas, Datos de entrada, Presupuesto y Cronograma con líneas de flujo. El resumen del Flujo de información descrito se muestra en la Figura 4.29.



**FIGURA 4.29** Flujo de información durante la etapa de Pre-Construcción para Modelo BIM 5D.

*Durante la etapa de Construcción* (Figura 4.30). Se tiene que la planificación, la programación y el control del proyecto se deben basar en el modelo BIM 5D y teoría del LBMS. Respecto al plazo, se plantea programar la fase según lo planificado en el modelo, esto implica que se deben especificar restricciones, responsables y revisar los recursos asignados por locación del proyecto (las locaciones brindan mejor organización); luego, el modelo BIM 5D tiene como información entrante el control diario de las mediciones ejecutadas por locación y el control semanal de los rendimientos; esto se elabora con el fin de comparar lo ejecutado contra lo planificado y, principalmente, realizar proyecciones del estatus actual. En el Lookahead se tendrá los metrados calculados en obra y se dispone de una base técnica para realizar proyecciones de ratios de productividad en un horizonte de 6 semanas (teoría del LBMS); se debe precisar que el pronóstico es un proceso automatizado por el software Vico Office. Respecto al costo, las proyecciones de las líneas de flujo se utilizan para proyectar el saldo del Valor Planificado a los meses siguientes, según la ejecución actual y rendimientos reales del proyecto; así, se tiene una base técnica más confiable en el cálculo del Valor Projectado. El modelo BIM 5D permite, también, el seguimiento y control de los histogramas y gráficas de recursos planificados, lo que facilita la proyección de desembolsos de dinero.



**FIGURA 4. 30** Flujo de información durante la etapa de Construcción para Modelo BIM 5D.

## CAPITULO 5: RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

### 5.1. RECOMENDACIONES

#### **Respecto al modelo BIM 3D.**

Para que el modelo 5D pueda procesar los datos exportados del modelo 3D se recomienda utilizar un software que reconozca los tipos de familias de cada elemento modelado, esto permite que las mediciones sean automatizadas y dependan de cada familia de elementos. Es necesario, también, realizar cortes verticales y horizontales en los elementos según el *Location Breakdown Structure* definido para el proyecto, lo descrito facilitará el reconocimiento e integración de locaciones al software BIM 5D. Finalmente, se recomienda colocar nombres detallados a cada elemento en el modelo 3D con el fin de facilitar la agrupación de mediciones en las partidas correspondientes del presupuesto.

#### **Respecto a limitaciones del alcance.**

La investigación desarrollada sólo toma en cuenta la fase de estructuras del proyecto; por lo cual, se recomienda desarrollar una planificación con un modelo BIM 5D y teoría del Sistema de Locaciones para, al menos, 3 fases de un proyecto; así, se podría analizar la influencia de los niveles de locaciones en distintas fases, y se debe poner en práctica la definición de sectores que abarquen todos los requerimientos de planificación en fases de arquitectura e instalaciones.

Se recomienda, también, poner en práctica los cronogramas con líneas de flujo detallados por partidas para una Planificación por Fases, con el objetivo de determinar la utilidad de estos en el control y pronóstico; además, se debe integrar y actualizar continuamente un cronograma

(a base de líneas de flujo) con horizonte de planificación de 6 semanas, que es el horizonte de confiabilidad indicado en el Last Planner System.

### **Respecto a la estimación de la producción diaria.**

En la estimación de la tasa de producción diaria (condición de la que depende toda la planificación en la etapa de estructuras) se asume como principal condicionante (cuello de botella) al volumen de concreto a ejecutar por día, según condiciones del proyecto; dicha tasa de producción depende de varios factores adicionales que son usualmente menospreciados (tuberías de instalaciones eléctricas o sanitarias) o que se relacionan directamente con el avance del concreto (acero y encofrado); sin embargo, bajo las condiciones del proyecto, la restricción principal de avance es el abastecimiento de concreto desde la planta proveedora hasta el punto de vaciado, esto incluye el tiempo de armado de andamios y tuberías de bombeo, los cuales son factores que condicionan la producción diaria con similar importancia que el tiempo de vaciado de un mixer de concreto; y, por tanto, estos tiempos no se deberían menospreciar en el cálculo del avance del cuello de botella. Así, se sugiere realizar mediciones en obra que logren determinar la incidencia del armado de andamios y tuberías de concreto durante el vaciado del mismo, y determinar si es conveniente despreciar su tiempo.

### **Respecto a la estimación de recursos.**

Se adoptó como base las velocidades del Análisis de Precios Unitarios, las cuales se consideran desactualizados para los procesos constructivos usados en obra; por ende, se recomienda llevar un control de rendimientos y generar una base de datos a partir de experiencia de ingenieros, subcontractistas y proveedores contratados, con esto se sugiere actualizar las velocidades y rendimientos metas del proyecto para utilizarlos en el modelo BIM, con el objetivo evitar sobre-estimación de recursos.

## 5.2. CONCLUSIONES

### **¿Planificar utilizando líneas de flujo mejora la visualización de los Cronogramas utilizados en el proyecto?**

En los cronogramas con líneas de flujo elaborados en la investigación se pudo incorporar y visualizar la siguiente información: Tareas, Locaciones, Hitos, Áreas Verticales, Duraciones, Dependencias, Buffers y Pendientes.

Además, se incorporó el *Location Breakdown Structure*, el cual almacena la información del proyecto (cuantías, recursos y partidas) en base a locaciones jerarquizadas en tres niveles: Pisos (Nivel 1), Bloques (Nivel 2) y Sectores (Nivel 3); así, los Niveles 1 y 2 permitieron organizar y visualizar la información de todas las fases del proyecto, y el Nivel 3 permitió visualizar la distribución uniforme de cuantías, este varía según consideraciones constructivas de cada fase. Las dependencias en líneas de flujo permitieron simplificar todas las relaciones de precedencia y sucesión de las tareas del proyecto a partir de los 4 tipos de lógica según el *Location-Based Management System*; además, permitió visualizar un detalle por locación que no complica el cronograma, a diferencia del Cronograma Gantt que exige una tarea y dependencia adicional por locación para mostrar dicho detalle. Finalmente, las pendientes de las líneas de flujo representaron la tasa de producción (locación/día) de una tarea; así, la inclinación de las líneas facilitó la comparación y el ajuste del ratio planificado entre distintas partidas; esto permitió, a su vez, ajustar rápidamente las líneas de distintas partidas para una Planificación de Fase.

Así, mientras las líneas de flujo pueden detallar y mostrar todas las herramientas descritas anteriormente, los Cronogramas Gantt del proyecto solo pueden detallar Hitos, Tareas, Dependencias y Duraciones; esto se traduce como una amplia ventaja en la capacidad de detalle y visualización de los cronogramas cuando se planifica con líneas de flujo.

En suma, se concluye que los planificar a base de líneas de flujo mejora la visualización y organización de la información de los cronogramas elaborados en obra, porque amplían el detalle permitido por el Cronograma Gantt sin elevar la complejidad; además, se puede visualizar lo planificado en base a tasas de producción, dejando de lado el control visual por duraciones y cercanía a hitos.

Sin embargo, se deduce que las líneas de flujo no reemplazan totalmente a los cronogramas Gantt; al contrario, se consideran como un complemento indispensable, ya que estos permiten planificar y controlar en base a la ruta crítica (condición contractual) y las líneas de flujo detallan lo planificado en base a tasas de producción y locaciones.

### **¿Planificar utilizando un modelo BIM 5D y líneas de flujo mejora la automatización de reportes de plazo y costo del proyecto?**

La planificación, elaborada con el software Vico Office, agilizó el siguiente proceso: vincular las líneas de flujo al costo y a las mediciones, balancear las líneas de flujo, relacionar partidas según sus dependencias, obtener estimaciones de cuadrillas según el cuello de botella y controlar el desarrollo del proyecto según metrados ejecutados y rendimientos reales. Además, se puede obtener automáticamente diversos reportes que muestran la demanda de recursos detallados en el Análisis de Precios Unitarios según lo planificado en las líneas de flujo.

En suma, se concluye que un modelo BIM 5D, que engloba todo lo descrito, automatiza el desarrollo de documentos referentes a la planificación del plazo y costo del proyecto porque:

- 1) Reduce el tiempo invertido por ingenieros de staff en la elaboración de documentos de planificación al generar reportes de plazo, costos y cuantías de manera automática.

- 2) Anula el proceso manual de compatibilización de documentos, correspondientes a distintas etapas, al generar todos los reportes de manera automática en base a un conjunto de datos referentes a modelos 3D, costos y plazo.
- 3) Amplía la capacidad de detalle de todos los entregables de plazo y costo del proyecto sin aumentar el tiempo invertido en su elaboración.

### **¿Utilizar un modelo BIM 5D y líneas de flujo mejora la confiabilidad en la planificación de proyectos de construcción?**

Las líneas de flujo influyen en la mejora de la confiabilidad de la planificación y control; los modelos BIM 5D influyen en la confiabilidad de los reportes de cuantías, plazo y costo.

En la planificación con líneas de flujo, se ajustó la velocidad de ejecución (pendiente de la línea) de todas las tareas del alcance de forma que se ejecute un flujo continuo (pendientes paralelas), este ajuste se basó en la pendiente de las líneas de tareas denominadas “cuellos de botella”, cuya inclinación se ajustó según su capacidad máxima (líneas denominadas *backbone*) y según la demanda de los hitos contractuales. El control con líneas de flujo, permite realizar un seguimiento en base a tasas reales de producción por semana y metrados diarios ejecutados por locación; y, a partir de estos datos, es posible realizar pronósticos que facilitan el ajuste preventivo de producción, para evitar atrasos o colisiones. En cambio, el control en los cronogramas Gantt del proyecto sólo se basa en duraciones e hitos, lo cual sólo permite ejecutar acciones correctivas en la producción; por otro lado, el cronograma Gantt no permite proyectar ni controlar según la ejecución real en obra.

Los modelos BIM 5D generan, automáticamente, documentos respecto a cuantías, plazos y costos a partir de una misma base de datos, donde se ha incorporado el modelo 3D, información

técnica del proyecto, análisis de precios unitarios, presupuesto, rendimientos, cuadrillas y planificación con líneas de flujo. Con la base de datos descrita, se disminuye la probabilidad de error en cuantificaciones o generación de reportes por la elaboración manual a cargo de ingenieros de staff. Además, se anula el proceso de compatibilización de información entre documentos de plazo y costo.

En suma, las líneas de flujo permiten planificar el plazo y costo del proyecto con un flujo continuo entre tareas, este flujo asegura un rendimiento meta que disminuye el riesgo de pérdidas por sobreasignación de recursos o retrasos por recursos insuficientes; además, las líneas permiten realizar ajustes preventivos en la producción según las proyecciones de la ejecución actual. Los modelos BIM 5D permiten minimizar la posibilidad de error en la elaboración y compatibilización de documentos, ya que estos se generan automáticamente de una base de datos que contiene información de cuantías, plazo y costo. Con todo lo anterior se concluye que el modelo BIM 5D y las líneas de flujo mejoran la confiabilidad en la planificación del proyecto y en la elaboración de documentación referente a cuantías, plazo y costos.

**¿El Cronograma Maestro y la Programación por Fases, planificados mediante líneas de flujo, tienen el detalle demandado por la Teoría del Último Planificador del Lean Construction?**

El Cronograma Maestro elaborado con líneas de flujo incorporó los hitos principales del proyecto, permitió resumir las partidas en grupos más importantes, simplificó la visualización del flujo entre fases principales, facilitó el balance por ratios y permite incorporar todas las fases del proyecto; por esto, se concluye que el Cronograma Maestro elaborado mediante líneas

de flujo muestra el detalle exigido por la teoría del *Last Planner System* y amplía la capacidad de la herramienta, incorporando locaciones y ratios de producción.

Sin embargo, el Cronograma Maestro elaborado a base del modelo BIM 5D (con el software Vico Office) tiene un nivel de detalle excesivo en el proceso de elaboración, este implica una inversión de tiempo innecesaria para el horizonte de planificación que abarca (más de un año); por ende, este cronograma debería elaborarse con líneas de flujo de una manera ágil y rápida que no vincule información de costo o plan; además, solo debe involucrar grupos de partidas, mediciones generales de fases, locaciones de nivel 1, y ratios de ejecución, para balancear rápidamente las etapas del proyecto; por lo mencionado, se deduce que en este proceso solo debe invertirse algunos minutos de discusión y no debe involucrar información respecto a cuadrillas, rendimientos, partidas ni áreas verticales.

El Cronograma por Fases, elaborado con líneas de flujo, permite planificar cualquier fase según las exigencias de la teoría del *Last Planner System*, ya que aseguró una ejecución continua del trabajo balanceando la producción de todas las tareas en base a hitos contractuales y capacidades máximas de los “cuellos de botella”; brinda, también, el detalle necesario de visualización al mostrar elementos como: tareas, flujos, hitos, dependencias, cuadrillas, buffers y duraciones; y los complementa mostrando locaciones, áreas verticales y pendientes. A partir de lo planificado, será posible detectar restricciones y asignar responsables según los recursos calculados automáticamente (en el software). Finalmente, amplía la capacidad de la herramienta al incorporar el control y las proyecciones en el cronograma.

Sin embargo, este cronograma no muestra el flujo real de producción ni asegura el cumplimiento de lo planificado; para lo último será necesario incorporar herramientas de detección de restricciones e implementar reuniones *Lookahead*, donde se asuman compromisos

en la planificación, con el fin de hacerla más confiable en un horizonte corto de tiempo (6 semanas). Por ende, la planificación por Fases elaborada con líneas de flujo sólo es una estimación que permitirá asignar las cuadrillas, rendimientos meta iniciales y duraciones por locación en cada partida crítica, pero se debe complementar con el Lookahead semanal para asegurar un mayor nivel de confiabilidad en un horizonte de 6 semanas e ir comparando con lo estimado inicialmente en el Cronograma por Fases. Finalmente, se deduce que las proyecciones de lo ejecutado, realmente en obra, deben realizarse en base al Lookahead elaborado con líneas de flujo, ya que pronosticar con un horizonte mayor a 6 semanas implica involucrar mucho más errores en la planificación.

**¿Cuáles son las ventajas y limitaciones de planificar con tareas discontinuas en las líneas de flujo?**

Utilizando cronogramas con tareas discontinuas en las líneas de flujo es posible visualizar el detalle de secuenciamiento diario de las tareas según el flujo real de obra; sin embargo, a partir del análisis de los cronogramas de estructuras de sostenimiento, se concluye que estos pierden la capacidad de exponer visualmente la tasa de producción de las tareas (la pendiente), no permiten incorporar el control con ejecución real ni proyectada, incorporan un detalle horario innecesario que complicará la planificación al asumir compromisos de ejecución que no se cumplirán (por el amplio horizonte de planificación), y, finalmente, no permiten incorporar buffers.

Así, se deduce que las líneas discontinuas sólo deben utilizarse cuando se elaboran cronogramas para visualizar el flujo de tareas programadas, con un detalle horario y un horizonte máximo de planificación de 1 día.

**Respecto al modelado 3D y la relación con las cuantías del presupuesto.**

Se concluye que un modelo 3D no tiene la capacidad de almacenar toda la información del presupuesto del proyecto, ya que solo puede representar partidas cuyas cuantías se basen, directa o indirectamente, en un elemento 3D. En el caso del proyecto analizado, el modelo 3D sólo pudo representar la información del 60% del presupuesto en la Fase de Estructuras, dejando un 40% de partidas cuyo cálculo y modificación debe realizarse manualmente. Además, la cuantificación automática del modelo 3D, respecto a un cálculo manual en el proyecto, no implicó una ayuda indispensable en la exactitud de cálculos (pero sí en la rapidez), ya que, en contraste, el monto del costo directo resultante de ambos metrados se diferencian en una cantidad menor al 1%.

**Respecto a la sinergia entre las líneas de flujo, con base en el Sistema de Locaciones; y los reportes de costos, con base en la teoría del Valor Ganado.**

Las líneas de flujo, con base en el sistema de locaciones, permiten incorporar herramientas de control dentro de un cronograma planificado, este control consiste en actualizar los metrados ejecutados en obra por locación; así, con estos dos datos se incorporan, en el mismo cronograma planificado, herramientas de pronóstico que consisten en proyectar la ejecución de la obra según el ritmo actual. Análogamente, los reportes de valor ganado incorporan el control diario del Valor Ganado y la proyección mensual del saldo del Valor Planificado. Por ende, se concluye que las líneas de flujo brindan una base técnica para la proyección del Valor Ganado en los reportes de costos; además, si se utiliza un modelo BIM 5D (elaborado a partir del software Vico Office) que incorpore los datos discutidos en la presente investigación, es posible obtener las proyecciones de costos de manera automática, a partir del control de metrados ejecutados por locación.

**Respecto a la sinergia entre los modelos BIM 5D y las líneas de flujo basadas en el Sistema de Locaciones.**

Se concluye que el modelo BIM 5D permite generar una base de datos que agrupa toda la información correspondiente a las cuantías, costo y plazo dentro de las locaciones definidas en el LBS; además, el software Vico Office facilita el balance de las líneas de flujo y automatiza la elaboración de todos los reportes de cuantías, costos y plazos basados en locaciones

Se concluye también que, en la elaboración de un modelo BIM 5D, es indispensable la incorporación de la teoría del Sistema de Locaciones (*Location Based Management System*), ya que este sistema proporciona una unidad de almacenamiento (las locaciones) que permite que el modelo BIM 5D englobe toda la información del proyecto y genere todos los resultados automatizados; además, le proporciona una base técnica al modelo para planificar, controlar y proyectar los costos y plazos del proyecto; así, un modelo BIM 5D sin la teoría de Locaciones sería un modelo que agruparía mediciones según el EDT, lo cual exigiría muchos grupos redundantes según el número de sectores; y que sólo se limitaría a planificar y controlar el proyecto en base a duraciones y cercanía a hitos contractuales.

**Respecto a la sinergia entre el modelo BIM 5D, con base en el sistema de Locaciones, y el Lookahead.**

A partir del análisis del flujo de la información en el proyecto se concluye que, durante la Etapa de construcción, el Lookahead dispone de una base técnica (teoría del LBMS) para realizar proyecciones en un horizonte de 6 semanas, según lo proyectado en las líneas de flujo; así, las proyecciones de las líneas de flujo serán la base para los pronósticos de lo ejecutado en el Lookahead y para el saldo del Valor Planificado, vinculando el pronóstico de costo y plazo.

**Respecto a la influencia de las líneas de flujo en el marco legal del control contractual.**

Respecto al control contractual del Cronograma Gantt, se establece por ley que un atraso en la ruta crítica, que tenga como causal una acción externa al control del contratista, genera una ampliación de plazo. Sin embargo, es posible que se genere un atraso por la pérdida de productividad en la ejecución del proyecto, esto se conoce como interrupción; así, se considera que esta causal de atraso, si es que es atribuible directamente a alguna acción del cliente o supervisión, debe figurar como un argumento sólido en el marco legal del control contractual.

Las líneas de flujo tienen como base el control de la producción del proyecto, por lo que cualquier pérdida de la misma se logra evidenciar claramente en el cronograma basándose en la pendiente de las tareas; por ende, se concluye que, así como el Cronograma Gantt es una herramienta contractual para el seguimiento y sustento de la ruta crítica, las líneas de flujo deben considerarse como una herramienta contractual para el seguimiento y sustento de la productividad del proyecto; con esto, se tiene un documento estandarizado para sustentar la existencia de alguna interrupción en el proyecto, si es que estas son establecidas como causales de ampliación de plazo en la Ley de Contrataciones del Estado.

## FUENTES CITADAS

- Ballard, G., & Howell, G. (1994). Implementing Lean Construction: Stabilizing Work Flow. *Lean Construction*, pp.101-110.
- Arteta K. (2015). Plan de Gestión de Calidad – Arquificio S.A.C. Trabajo de diplomatura. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Ballard, G. (1999). Improving work flow reliability. *Proceedings of the 7th Annual Conference of the International Group for the Lean Construction*, 1999, pp. 275–286.
- Ballard, G., & Howell, G. (2003). An update on last planner. *11th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, pp.1–10.
- Ballard, G., & Howell, G. (2003). Lean project management. *Building Research & Information*, pp.119–133.
- Ballard, G., Howell, G. A., Tommelein, I. D., & Zabelle, T. (2007). The Last Planner Production Workbook - Improving Reliability in Planning and Workflow, *Lean Construction Institute*, San Francisco, California, USA, p. 81.
- Ballard, G., Hammond, J., & Nickerson, R. (2009). Production Control Principles. *In: Proc 17th Ann. Conf. of the Int'l. Group for Lean Construction*. Taipei, Taiwan, pp 489-500.
- BIM Dictionary* (s.f.). Disponible el 01 de septiembre de 2019, de <https://bimdictionary.com/en/building-information-modelling/1>
- BIMForum. (2018). Level of Development (LOD) Specification Part I & Commentary: For Building Information Models and Data, September 2018, pp. 253.
- Brioso, X. (2013). Integrando la Gestión de Producción y Seguridad. *XII Congreso Latinoamericano de Patología y XIV Congreso de Calidad de la Construcción - CONPAT 2013*. Cartagena, Colombia, 30 Sep-4 Oct 2013. Cartagena, Colombia: ALCONPAT Internacional.
- Brioso, X., Humero, A. & Calampa, S. (2016). Comparing Point-to-Point Precedence Relations and Location-Based Management System in Last Planner System: A Housing Project of Highly Repetitive Processes Case Study. *Procedia Engineering*, 164 (2016), pp. 12–19.
- Brioso, X. (2017). Synergies between Last Planner System and OHSAS 8001 – A general overview. *Building & Management*, 1 (2), pp. 24-35.

- Brioso, X., Murguía, D. & Urbina, A. (2017 a). Comparing three scheduling methods using BIM models in the Last Planner System. *Organization, Technology and Management in Construction: an International Journal*, 9 (2017 a), Issue 1, pp. 1604–1614.
- Brioso, X., Murguía, D. & Urbina, A. (2017 b). Teaching Takt-Time, Flowline, and Point-to-Point Precedence Relations: A Peruvian Case Study. *Procedia Engineering*, 196, pp. 666-673.
- Calampa, S. (2014). Aplicación de la Línea de Balance en el sistema Last Planner en proyectos de edificaciones. Tesis de titulación en Ciencias e Ingeniería con mención en Ingeniería Civil. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Ghio V. (2001). *Productividad en obras de construcción; Diagnostico, critica y propuesta*. Lima: Fondo editorial PUCP. 2001.
- Guzmán, A. (2015). Aplicación de la Filosofía Lean Construction en la Planificación, Programa, Ejecución y Control de Proyectos. Tesis de titulación en Ciencias e Ingeniería con mención en Ingeniería Civil. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Huatuco Rodríguez, R. G. (2017). Mejorando la visualización y la comunicación en el Last Planner System a través del uso de modelos BIM. Tesis de titulación en Ciencias e Ingeniería con mención en Ingeniería Civil. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- INEI. (2018). Informe Técnico N°11: Producción Nacional Septiembre 2018. Lima, Perú.
- INEI. (2019). Informe Técnico N°8: Avance Coyuntural de la Actividad Económica Junio 2019. Lima.
- Kankainen, J., & Seppänen, O. (2003). A Line-of-Balance Based Schedule Planning and Control System. *11th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, pp.132–143.
- Kenley, R. (2005). Dispelling the complexity myth: Founding lean construction on location-based planning. *13th International Group for Lean Construction Conference Proceedings*, pp.245–251.
- Kenley, R., & Seppänen, O. (2010). *Location-Based Management for Construction*. USA: Spon Press.
- Kymmell, W (2009) *Building Information Modeling: planning and managing construction projects with 4D CAD and simulations*. The McGraw-Hill Companies, Inc.
- LCI, Lean Project Delivery Glossary (available at: [www.leanconstruction.org/glossary.htm](http://www.leanconstruction.org/glossary.htm))

- Mossman, A. (2013). Last Planner: 5 + 1 crucial & collaborative conversations for predictable design & construction delivery. *The Change Business Ltd.* pp. 36.
- Murguía, D., Brioso, X., and Pimentel, A. (2016). Applying Lean Techniques to Improve Performance in the Finishing Phase of a Residential Building. *Proc. 24th Ann. Conf. of the Int'l. Group for Lean Construction*, Boston, MA, USA, pp. 43–52.
- Murguía, D. (2017). Primer Estudio de Adopción BIM en proyectos de edificación en Lima y Callao 2017. Lima, Perú.
- Orihuela, P., & Esteves, D. (2013). Aplicación del método de la línea de balance a la planificación maestra. *Encuentro Latino Americano de Gestión y Economía de La Construcción*.
- Orihuela, P., Canchaya, L., & Rodríguez, E. (2015). Gestión Visual del Sistema Last Planner mediante El Modelado Bim. *Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia Da Construção*, pp.545–553.
- Plan BIM (2019). Estándar BIM para proyectos públicos: Intercambio de información entre solicitantes y proveedores. Santiago, Chile.
- Seppänen, O. (2009). Empirical research on the Success of Production Control in Building Construction Projects. Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology of the Faculty of Engineering and Architecture. Finland: Helsinki University of Technology, Faculty of Engineering and Architecture.
- Seppänen, O., Ballard, G., & Pesonen, S. (2010). The combination of last planner system and location-based management system. *Lean Construction Journal*, pp.43–54.
- Seppänen, O., Evinger, J., & Mouflard, C. (2014). Effects of the location-based management system on production rates and productivity. *Construction Management and Economics*, pp.608–624.
- Seppänen, O. (2017). Location - Based Management System, pp.179–198.
- Smith, P. (2014). BIM & the 5D Project Cost Manager. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, pp.475–484.
- Trimble Buildings. (2014). Vico Office: Introduction to Model Based Scheduling [manual].
- Trimble Buildings (s.f.). Vico Office R5.3 User Guide [manual].

Urbina, A., Dueñas, D. (2018). Programación de fase en proyectos repetitivos y no-repetitivos mediante líneas de flujo y modelos BIM. Tesis de titulación en Ciencias e Ingeniería con mención en Ingeniería Civil. Lima: Pontificia Universidad Católica Del Perú.

Villagarcia, S. (2011). Formalization as a Way of Coordination and Control in a Construction Firm. *19th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. Lima, Peru, 13-15 Jul 2011.

## ANEXOS

### *ANEXO 1: Alcance de partidas en la investigación*

<b>ESTRUCTURA</b>	
<b>02.01</b>	<b>MOVIMIENTO DE TIERRAS</b>
<b>02.01.03</b>	<b>RELLENOS</b>
<a href="#">02.01.03.01</a>	Relleno Compactado C/Material propio seleccionado C/Equipo Liviano
<a href="#">02.01.03.02</a>	Acarreo de Material Propio Seleccionado para Relleno
<b>02.02</b>	<b>OBRAS CONCRETO SIMPLE</b>
<b>02.02.03</b>	<b>SOLADO</b>
<a href="#">02.02.03.01</a>	Concreto Premezclado $f'c=100\text{kg}/\text{c}^2$ Para Solado $e=0.10\text{m}$
<b>02.02.05</b>	<b>FALSO PISO</b>
<a href="#">02.02.05.01</a>	Concreto Premezclado $f'c=140\text{kg}/\text{c}^2$ Para Falso Piso $e=0.10\text{m}$
<b>02.03</b>	<b>OBRAS DE CONCRETO ARMADO</b>
02.03.01	<i>ZAPATAS</i>
<a href="#">02.03.01.01</a>	Concreto Premezclado $f'c=280\text{ k}/\text{c}^2$ en Zapatas
<a href="#">02.03.01.02</a>	Encofrado y Desencofrado en Zapatas
<a href="#">02.03.01.03</a>	Acero de Refuerzo $FY=4200\text{ k}/\text{c}^2$ Zapatas
02.03.02	<i>VIGAS DE CIMENTACIÓN</i>
<a href="#">02.03.02.01</a>	Concreto Premezclado $f'c=280\text{ k}/\text{c}^2$ en Vigas de cimentación
<a href="#">02.03.02.01</a>	Encofrado y Desencofrado Metálico en Vigas de cimentación
<a href="#">02.03.02.01</a>	Acero de Refuerzo $FY=4200\text{ k}/\text{c}^2$ Vigas de cimentación
<b>02.03.04</b>	<b>MUROS REFORZADOS</b>
02.03.04.01	<i>MURO DE CONTENCIÓN</i>
<a href="#">02.03.04.01.01</a>	Concreto Premezclado $f'c=280\text{ k}/\text{c}^2$ en Muro de contención
<a href="#">02.03.04.01.02</a>	Encofrado y Desencofrado Metálico en Muro de contención
<a href="#">02.03.04.01.03</a>	Acero de Refuerzo $FY=4200\text{ k}/\text{c}^2$ Muro de contención
02.03.04.02	<i>MUROS DE CONCRETO Y PLACAS</i>
<a href="#">02.03.04.02.01</a>	Concreto Premezclado $f'c=280\text{ k}/\text{c}^2$ en Muro, Tabiques y Placas
<a href="#">02.03.04.02.02</a>	Encofrado y Desencofrado Metálico en Muro, Tabiques y Placas
<a href="#">02.03.04.02.03</a>	Acero de Refuerzo $FY=4200\text{ k}/\text{c}^2$ Muro, Tabiques y Placas
<b>02.03.05</b>	<b>COLUMNAS</b>
<a href="#">02.03.05.01.02</a>	Concreto Premezclado $f'c=280\text{ k}/\text{c}^2$ en Columnas
<a href="#">02.03.05.02.02</a>	Encofrado y Desencofrado Metálico en Columnas
<a href="#">02.03.05.03.01</a>	Acero de Refuerzo $FY=4200\text{ k}/\text{c}^2$ Columnas
<b>02.03.06</b>	<b>VIGAS</b>
<a href="#">02.03.06.01.02</a>	Concreto Premezclado $f'c=280\text{ k}/\text{c}^2$ en Vigas
<a href="#">02.03.06.02.02</a>	Encofrado y Desencofrado Metálico para Vigas
<a href="#">02.03.06.03.01</a>	Acero de Refuerzo $FY=4200\text{ k}/\text{c}^2$ Vigas
<b>02.03.07</b>	<b>LOSAS</b>
02.03.07.01	<i>LOSA MACIZA</i>
<a href="#">02.03.07.01.01</a>	Concreto Premezclado $f'c=280\text{ k}/\text{c}^2$ en Losa Maciza

<a href="#">02.03.07.01.02</a>	Encofrado y Desencofrado Metálico para Losa Maciza
<a href="#">02.03.07.01.03</a>	Acero de Refuerzo FY=4200 k/c2 Losa Maciza
02.03.07.02	<i>LOSAS ALIGERADAS CONVENCIONALES</i>
<a href="#">02.03.07.02.01</a>	Concreto Premezclado f'c=280 k/c2 en Losa Aligerada
<a href="#">02.03.07.02.02</a>	Encofrado y Desencofrado Metálico para Losa Aligerada
<a href="#">02.03.07.02.03</a>	Acero de Refuerzo FY=4200 k/c2 Losa Aligerada
<a href="#">02.03.07.02.04</a>	Casetón de Poliestireno 1.20x0.30x0.20
02.03.07.03	<i>LOSA NERVADA</i>
<a href="#">02.03.07.03.01</a>	Concreto Premezclado f'c=280 k/c2 en Losas Nervadas
<a href="#">02.03.07.03.02</a>	Encofrado y Desencofrado en Losas Nervadas
<a href="#">02.03.07.03.03</a>	Acero de Refuerzo FY=4200 k/c2 en Losas Nervadas
<a href="#">02.03.07.03.04</a>	Casetón de Poliestireno Expandido de 0.50x0.50x0.35m
02.03.07.04	<i>LOSA CON PLACA COLABORANTE</i>
<a href="#">02.03.07.04.01</a>	Concreto Premezclado f'c=280 k/c2 en Losas con Placa Colaborante
<a href="#">02.03.07.04.02</a>	Placa colaborante AD-600/ Calibre22, A=900mm, PERALTE=60mm
<a href="#">02.03.07.04.03</a>	Acero de Refuerzo FY=4200 k/c2 en Losas con Placa Colaborante
<b>02.03.08</b>	<b>ESCALERAS</b>
<a href="#">02.03.08.01</a>	Concreto Premezclado f'c=280 k/c2 en Escaleras
<a href="#">02.03.08.02</a>	Encofrado y Desencofrado Metálico de Escaleras
<a href="#">02.03.08.03</a>	Acero de Refuerzo FY=4200 k/c2 en Escaleras
<b>02.03.09</b>	<b>CISTERNAS SUBTERRANEAS</b>
02.03.09.01	<i>LOSA DE FONDO</i>
<a href="#">02.03.09.01.01</a>	Concreto Premezclado f'c=280 k/c2 en Losa de Fondo de Cisterna
<a href="#">02.03.09.01.02</a>	Acero de Refuerzo FY=4200 k/c2 en Losas de Fondo
02.03.09.02	<i>MURO DE CONTENCIÓN</i>
<a href="#">02.03.09.02.01</a>	Concreto Premezclado f'c=280 k/c2 en Muro de Contención
<a href="#">02.03.09.02.02</a>	Encofrado y Desencofrado Metálico en Muro de contención
<a href="#">02.03.09.02.03</a>	Acero de Refuerzo FY=4200 k/c2 Muro de contención
02.03.09.03	<i>VIGAS</i>
<a href="#">02.03.09.03.01</a>	Concreto Premezclado f'c=280 k/c2 en Vigas
<a href="#">02.03.09.03.02</a>	Encofrado y Desencofrado Metálico para Vigas
<a href="#">02.03.09.03.03</a>	Acero de Refuerzo FY=4200 k/c2 Vigas
02.03.09.04	<i>LOSA MACIZA</i>
<a href="#">02.03.09.04.01</a>	Concreto Premezclado f'c=280 k/c2 en Losa Maciza
<a href="#">02.03.09.04.02</a>	Encofrado y Desencofrado Metálico para Losa Maciza
<a href="#">02.03.09.04.03</a>	Acero de Refuerzo FY=4200 k/c2 Losa Maciza
<b>02.03.10</b>	<b>RAMPAS</b>
<a href="#">02.03.10.01</a>	Concreto Premezclado f'c=280 k/c2 en Rampas
<a href="#">02.03.10.02</a>	Encofrado y Desencofrado Metálico para Rampa
<a href="#">02.03.10.03</a>	Acero de Refuerzo FY=4200 k/c2 Rampa
<b>02.03.11</b>	<b>PAVIMENTO RIGIDO</b>
<a href="#">02.03.11.01</a>	Concreto Premezclado f'c=280 k/c2 en Pavimento Rígido
<a href="#">02.03.11.02</a>	Encofrado y Desencofrado Metálico para Pavimento Rígido