



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**Desarrollo de un modelo basado en
una herramienta integradora 4D-PS
que permita la planificación de
construcción de edificaciones civiles
en condiciones de incertidumbre.**

Carlos Mauricio Valencia Granda

Universidad Nacional de Colombia
Facultad, Departamento de Ingeniería de la Organización.
Medellín, Colombia.
2020

Desarrollo de un modelo basado en una herramienta integradora 4D-PS que permita la planificación de construcción de edificaciones civiles en condiciones de incertidumbre.

Carlos Mauricio Valencia Granda

Trabajo final de maestría presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Administrativa

Director:

Ph.D Martín Darío Arango Serna.

Línea de Investigación:

Administración

Universidad Nacional de Colombia

Facultad, Departamento de Ingeniería de la Organización.

Medellín, Colombia.

2020

*“...me parece increíble que sigamos
construyendo, ladrillo a ladrillo, como los
sumerios hace cinco mil años, cuando somos
capaces de producir máquinas que surcan el
espacio...”*

(Fernando Martínez Hinojal).

Agradecimientos

A Dios por permitirme cumplir este sueño y poner en mi camino a estas personas maravillosas,

A mi Esposa Alexandra, Mis hijos Juan Manuel y Melissa, a mi madre y mi familia por ser mi soporte en la vida,

Al profesor Martín Darío Arango, PhD por creer en este proyecto y por sus valiosos aportes y orientación,

A Daniel Marín por sus aportes la construcción de los modelos estadísticos.

A Jorge Mendieta por sus aportes en la construcción de los modelos tridimensionales.

Resumen

Este trabajo de maestría en ingeniería administrativa en la modalidad de profundización se orienta a los proyectos de construcción que enfrentan grandes desafíos para el cumplimiento de los objetivos relacionados con el presupuesto y el cronograma, esto se debe a la incidencia directa de factores externos no controlables como son el clima, la volatilidad del dólar, la inflación, la política estatal, la cadena de abastecimiento, entre otros.

Con el fin de realizar una planificación más acertada de los proyectos de construcción, es necesario gestionar la incertidumbre, contemplando los factores anteriormente expuestos y su posible impacto en la ejecución del proyecto.

En este trabajo de maestría se realizó un modelo en 4D-PS de un proyecto de construcción real en la ciudad de Medellín (Colombia), lo que facilitó la planificación del mismo, así como también se desarrollaron modelos de pronóstico basados en regresión lineal y series de tiempo donde se explica la incidencia de la lluvia en la programación de la obra y la incidencia del IPC y la volatilidad del Dólar en el presupuesto.

Palabras clave: Planificación de obras, incertidumbre, 4D-PS, Modelos de pronóstico, constructabilidad.

Development of a model based on an integrative 4D-PS tool that allows the planning of construction of civil buildings in uncertain conditions.

Abstract

This administrative engineering master's thesis in the modality of deepening is oriented to construction projects that face great challenges to meet the objectives related to the budget and the schedule, this is due to the direct incidence of uncontrollable external factors such as climate, dollar volatility, inflation, state policy, the supply chain, among others.

In order to carry out a more successful planning of the construction projects, it is necessary to manage the uncertainty considering the factors previously exposed and their possible impact during the project execution.

In this master's thesis, a 4D-PS model of a real construction project was carried out in the city of Medellín (Colombia), which facilitated its planning, as well as forecast models based on linear regression and time series were developed. The incidence of rainfall in the work schedule and the incidence of the CPI and the volatility of the dollar in the budget are explained.

Keywords: Construction planning, uncertainty, 4D-PS, Forecast models, constructability.

Contenido

	Pág.
1 Conceptos de la planificación de obras civiles.....	4
1.1 La incertidumbre en proyectos civiles.....	5
1.2 Programación de proyectos: redes de programación	7
2 Metodología	9
3 Modelos para la planificación de proyectos.....	11
4 Incorporación de la incertidumbre en modelos para la planificación de proyectos.....	15
5 Gestión de la incertidumbre en obras civiles.....	19
5.1 Gestión de la incertidumbre.....	20
5.1.1 Precipitación	21
5.1.2 Fluctuaciones del dólar	22
5.1.3 Inflación	23
5.1.4 Condiciones políticas.....	24
6 Desarrollo y aplicación de un modelo basado en una herramienta integradora 4D-PS 26	
6.1 Modelos de pronóstico	26
6.1.1 Modelo de regresión lineal para el impacto del IPC en el costo del proyecto .27	
6.1.2 Serie de tiempo para evaluar el impacto del clima en el tiempo de desarrollo34	
6.2 Proyecto de aplicación: MALL INTERMEDIA PLAZA	39
6.2.1 Visualización del proyecto en 3D.....	40
6.2.2 Presupuesto	41
6.2.3 Programación de obra	42
6.2.4 Visualización del proyecto en 4D-PS con incertidumbre	45
7 Conclusiones.....	57
8 Referencias.....	59
9 ANEXO A: Análisis de variables por expertos	64
10 ANEXO B: Herramientas gráficas para la gestión de proyectos.....	67
11 NEXO C: Programación inicial, presupuesto inicial, fechas programación inicial vs programación con incertidumbre.....	70
Programación inicial de la obra.....	70

XII Desarrollo de un modelo basado en una herramienta integradora 4D-PS que permita la planificación de construcción de obras civiles en condiciones de incertidumbre.

Presupuesto inicial del proyecto 74
Comparación de las fechas iniciales y finales del proyecto..... 85

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1. Metodología para el desarrollo del modelo.	9
Figura 5-1. Variables que influyen sobre el cumplimiento de objetivos.....	21
Figura 6-1. Modelo conceptual para el desarrollo de una herramienta 4D-PS	27
Figura 6-2. Distribución de probabilidad de las diferencias en valores de obra	31
Figura 6-3. Hiperplano del modelo con las covariables para la identificación de valores atípicos.....	32
Figura 6-4. Gráfico de gusano para el análisis de residuales.....	33
Figura 6-5. Gráficos de valores ajustados vs cuantiles para analizar el supuesto de varianza constante.	33
Figura 6-6. Datos de precipitación de 1960 al 2018.	34
Figura 6-7. Gráfica con transformación estabilizadora de la varianza.	35
Figura 6-8. Descomposición de la serie en tendencia, estacionalidad, ciclos y error.	36
Figura 6-9. ACF y PACF de la serie transformada.....	36
Figura 6-10. Gráfica de la serie diferenciada en tendencia	37
Figura 6-11. ACF y PACF de la primera diferencia regular de la serie.....	37
Figura 6-12. ACF y PACF de los residuales del modelo	38
Figura 6-13- Histograma de residuales del modelo.....	38
Figura 6-14. Modelo 3D de Mall Intermedia Plaza vista lateral.	40
Figura 6-15. Modelo 3D de Mall Intermedia Plaza vista frontal.	41
Figura 6-16. Incidencia de condiciones climáticas en actividades del proyecto.....	44
Figura 6-17. Modelo 4D que integra el modelo 3D+programación	45
Figura 6-18. Comportamiento del IPC a octubre de 2019.	46
Figura 6-19. Pronósticos de costo real de la obra y días de retraso.....	46
Figura 6-20. Contención perimetral inicial en el modelo 4D	47
Figura 6-21. Contención perimetral en el modelo 4D con incertidumbre	48
Figura 6-22. Fundaciones iniciales en el modelo 4D.....	49
Figura 6-23. Fundaciones en el modelo 4D con incertidumbre	49
Figura 6-24. Estructura inicial en el modelo 4D.....	50
Figura 6-25. Estructura en el modelo 4D con incertidumbre	51
Figura 6-26. Mampostería inicial en el modelo 4D.	52
Figura 6-27. Mampostería en el modelo 4D con incertidumbre.....	52
Figura 6-28. Obra blanca inicial en el modelo 4D	53
Figura 6-29. Obra blanca en el modelo 4D con incertidumbre	53
Figura 6-30. Entrega inicial en el modelo 4D	54
Figura 6-31. Entrega en el modelo 4D con incertidumbre	54

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1. Variables generadoras de incertidumbre en proyectos de construcción.	6
Tabla 6-1. Información considerada para la construcción del modelo de regresión lineal	29
Tabla 6-2. Incidencia de la lluvia sobre la ejecución de obra.....	39
Tabla 10-1. Alcance de software comerciales para la elaboración de modelos virtuales.	67
Tabla 10-2. Software para la representación visual de proyectos.....	67
Tabla 10-3. Software para la programación de proyectos,	68

Introducción

En este trabajo de grado de maestría, se propone un modelo que permite la planeación de un proyecto de construcción de edificaciones, utilizando herramientas integradoras 4D-PS que facilite la gestión de la incertidumbre en los mismos, entendiendo 4D como la integración de las tres dimensiones espaciales más la variable tiempo. Para lograrlo, se propone en primer lugar, caracterizar las variables y los parámetros que intervienen en los procesos de construcción de edificaciones civiles; desarrollar la programación de línea de base y el presupuesto del proyecto que se modela en 3D; simular por medio de herramientas estadísticas y matemáticas los diferentes comportamientos que se presentan en proyectos de construcción de edificaciones y finalmente; se caracterizan las diferentes herramientas de software que facilitan modelizar la incertidumbre y el riesgo.

Es por ello, que es necesario caracterizar los componentes de riesgo e incertidumbre, toda vez que el sector de la construcción es uno de los principales contribuyentes a la economía global (Taylor & Levitt, 2005); en Colombia el aporte de esta industria en los últimos tres años ha representado cerca del 6% del PIB (Monroy & Barón, 2018); sin embargo, la construcción en el mundo es a menudo descrita como una industria rezagada en la adopción de nuevos productos y procesos (Taylor & Levitt, 2005), siendo aún más evidente esta situación en Latinoamérica y especialmente en Colombia; lo anterior puede derivarse de que el modelo de la cadena productiva se ve impactado por características operativas, financieras y gerenciales diferentes a las presentes en la industria manufacturera (Adams, Osmani, Thorpe, & Thornback, 2017).

El cumplimiento de los objetivos de planeación de los proyectos de construcción basados en el cronograma como herramienta para el control sobre el tiempo de ejecución, y en el presupuesto como guía para el desarrollo de actividades encaminadas a la finalización del proyecto; no suelen alcanzarse. Esto se debe a que la incertidumbre inherente a las

variables tiempo y costos, no son incorporadas en los procesos de planeación y formulación de proyectos de construcción (Niazi & Painting, 2017).

Dentro de los principales retos que afronta el sector de la construcción para alcanzar los objetivos propuestos en términos de tiempo y costo; se encuentra la gestión de proveedores debido a la diversidad de materia prima y servicios requeridos para la ejecución de obras; la influencia del clima en el desarrollo de los proyectos; la variabilidad de los precios asociados a el costo de la materia prima como consecuencia de la fluctuación de dólar, al igual que la demanda variable en términos de proyectos (Gebrehiwet & Luo, 2017). Estos retos permiten hablar de la incertidumbre inherente a las obras de construcción, haciendo de la tarea de planear los proyectos una tarea ardua que requiere la visualización de eventos futuros para mitigar los efectos negativos asociados a la misma (Migilinskas, Tamosaitiene, & Kazimieras, 2007).

Hoy en día, los proyectos no rutinarios tienen un dramático incremento a nivel mundial, esos proyectos son a menudo ejecutados con restricción de recursos y bajo condiciones de incertidumbre. En el ambiente competitivo actual, la demanda de la terminación de los proyectos en cortos periodos de ejecución está en aumento, esta situación obliga a los gerentes a reducir tiempos de obra y se vuelve crítica la incorporación del efecto de la incertidumbre y la restricción de recursos, añadiendo a esto que el proyecto es a menudo perturbado por retrasos e interrupciones, por lo que es necesario manipular la programación del proyecto durante la ejecución (Long & Ohsato, 2008)

En general, pueden identificarse un numero de características indeseables asociadas con fallas en los proyectos como los sobrecostos en los presupuestos, especificaciones del proyecto comprometidas y perdidas de hitos; en otras palabras, las tres dimensiones básicas del proceso del proyecto: tiempo, costo y calidad (Cherkaoui, Pellerin, Baptiste, & Haït, 2015); estas condiciones no deseadas que impactan el desarrollo del proyecto deben abordarse desde un enfoque preventivo.

Ya se ha mencionado que el sector construcción juega un importante rol en el desarrollo de la economía nacional, aun así, la industria enfrenta desafíos y se ve bajo la influencia de bajos márgenes de ganancia relacionados a la inadecuada planeación y a la falta de medidas que permitan aislarlo de las fluctuaciones económicas (Al-Hazim, Salem, &

Ahmad, 2017). En gran medida, estos desafíos asociados a las fuentes de incertidumbre son extensas y tienen un efecto fundamental sobre los proyectos y la gerencia de los mismos, esas fuentes no están reducidas a eventos potenciales e incluyen falta de información, barreras de comunicación entre los implicados, características particulares propias de cada proyecto, la búsqueda del equilibrio entre la confianza y mecanismos de control y variación de agendas en diferentes etapas del ciclo de vida del proyecto; en este sentido son necesarios esfuerzos que permitan no solo reconocer las fuentes de incertidumbre, sino también gestionarla (Mukuka, Aigbavboa, & Thwala, 2015).

Xu, Wang, Li, Huang, & Xia (2018), analizan una serie de posibles fuentes de incertidumbre que se asocia a las obras de construcción encontrando que las actividades pueden tener más o menos tiempo que los estimados inicialmente, los recursos pueden no estar disponibles, el material puede llegar atrasado, tiempos de preparación y fechas de vencimiento podrían tener que cambiarse, nuevas actividades que deban ser incorporadas o actividades podrían tener que abandonarse debido a los cambios en el alcance del proyecto, las condiciones meteorológicas pueden causar retrasos, entre otros.

Según lo anterior, la programación del proyecto donde se ocupa la selección de los métodos de ejecución y fijación de los intervalos de tiempo de ejecución de las actividades de un proyecto; debe ser la etapa donde se incorpore la incertidumbre para su gestión; esto considerando que, dentro de los problemas de programación de proyectos de tiempo y recursos limitados, dependiendo en gran medida del tipo de restricciones que se tomen en cuenta al programar el proyecto.

En problemas de planeación donde el tiempo es limitado, se supone que las actividades son programadas sujetas a relaciones de precedencia y que los recursos requeridos pueden proporcionarse en cualquier monto y momento deseado, posiblemente al precio de una ejecución más alto costo o uso desequilibrado de recursos. En el marco del problema de programación de un proyecto con recursos limitados, la disponibilidad de recursos se supone necesariamente que es limitada; consecuentemente, además de las relaciones de precedencia y las restricciones de recursos; deben tenerse en cuenta los problemas de compensación de costo-tiempo y de nivelación de recursos son ejemplos de problemas de programación de proyectos de tiempo limitado (Karabulut, 2017).

Por todo lo anterior se debe pensar en un nuevo modelo de planeación que permita reconstruir la misma forma de pensar los proyectos; donde los detalles asociados al impacto de condiciones externas se incorporen, permitiendo así la toma de decisiones asertivas y un pronóstico de finalización del proyecto más exacto y cercano a las metas presupuestadas. Conceptos como modelos de productos y procesos, e-bussiness, tecnologías de visualización, y las tecnologías derivadas del advenimiento de la industria 4.0, aún son vistos como aplicaciones propias de la industria manufacturera y poco aplicables a la realidad de los proyectos (Alsafouri & Ayer, 2018); esto se agrava al considerar que la literatura sobre la programación de proyectos bajo riesgo e incertidumbre es escasa en términos de brindar soluciones para la gestión de proyectos bajo estas condiciones (Hossen, Kang, & Kim, 2015).

La estructura del trabajo final busca permitir una comprensión clara de los conceptos usados para el desarrollo del modelo propuesto; iniciando con un capítulo dedicado a los conceptos que se encuentran al revisar el tema de la planificación de obras civiles; incertidumbre y la programación de proyectos; en el segundo capítulo se presenta la metodología seguida para dar cumplimiento al objetivo general del trabajo final de maestría para así; presentar los resultados obtenidos al seguir cada fase metodológica en los siguientes dos capítulos.

El capítulo 5 presenta los resultados derivados del análisis de la literatura en lo relacionado a la gestión de la incertidumbre y las variables que la propician; mientras que el capítulo 6 presenta el modelo de pronóstico propuesto y su aplicación en un proyecto real. Finalmente, se presentan las conclusiones derivadas del trabajo final de maestría donde se evidencia la consecución tanto de los objetivos específicos como del objetivo general.

Planteamiento del problema

La planeación de obras civiles ha sido un proceso ampliamente estudiado debido al gran uso de recursos, a los costos asociados y al tiempo requeridos para su ejecución; sin embargo, debido a las variables externas que impactan el adecuado desarrollo de las actividades necesarias para llevar a buen término un proyecto, los resultados obtenidos sobre la ejecución presupuestal y la duración del mismo no suelen corresponder con los esperados (Niazi & Painting, 2017).

Esta realidad es vivida diariamente por gerentes de obra y directores de construcción que deben enfrentarse con los inconvenientes generados por la planeación deficiente de los proyectos, que a su vez se materializan en consecuencias financieras para las empresas y en ocasiones para los clientes (Gebrehiwet & Luo, 2017). El desconocimiento en el sector sobre metodologías que incorporen la incertidumbre de diferentes variables en la planificación de proyectos, debido al énfasis que se ha dado a desarrollar otros campos relevantes para el sector, como por ejemplo las estructuras o la geotecnia y demás elementos que hacen parte de esta importante industria; agrava este problema ya que los problemas del mundo real incorporan diferentes tipos de información e incertidumbre (Ma, Demeulemeester, He, & Wang, 2019)

Si bien se han desarrollado esfuerzos en la construcción de modelos de programación que permitan incluir posibles retrasos en las actividades de la obra; son modelos que no responden a variables de incertidumbre relevantes, según el tipo de construcción, el área geográfica donde se desarrolla el proyecto o al contexto económico de la región (Aziz & Abdel-Hakam, 2016), por lo que es necesario preguntarse sobre la posibilidad de desarrollar modelos que permitan incorporar la incertidumbre en el proceso de planificación de obras y que contemplen la realidad a la que se enfrentan los ejecutores de proyectos.

Justificación

Teniendo presente la innovación y desarrollo tecnológico en la ingeniería para gestionar, graficar y presentar los proyectos constructivos, se han desarrollado formas y modelos que permitan de forma gráfica presentar un proyecto de manera eficaz, por lo cual se ha encontrado que existen herramientas 4D que permiten construir modelos y crear simulaciones gráficas del proceso de construcción; no obstante, se denota que dichas herramientas carecen de características para apoyar el análisis de la incertidumbre.

Una crítica sobre la mayoría de los prototipos y aplicativos de software comerciales de procesamiento, para la integración de varios aspectos de la construcción, es que ellos son fragmentados y en el mejor de los casos, un organizador en la parte superior, de forma manual, integra las islas dispersas del proyecto (Trebbe, Hartmann, & Dorée, 2015). Sin embargo, aún no se puede hablar de una oferta amplia de herramientas comercialmente accesibles para la integración de la programación del proyecto y la representación gráfica del mismo que sean accesibles a nivel empresarial; menos aún, de la incorporación de incertidumbre en los posibles hitos. En el Anexo B, se relacionan las herramientas más usadas en el proceso de planificación de obras con el fin de dar claridad sobre su alcance y características.

Si bien en este trabajo no se presenta un software que integre estas características, si brinda un aporte significativo al proponer un modelo que incluye la incertidumbre dentro de los aspectos relativos a la planeación de los proyectos de construcción basándose en una herramienta integradora 4D; es decir, la visualización tradicional en 3D del proyecto más la visualización de su desarrollo en el tiempo en función de la planificación del proyecto ó PS por sus siglas en inglés.

Objetivos

A continuación, se presentan el objetivo general y objetivos específicos del presente trabajo final de maestría.

Objetivo general

Desarrollar un modelo que permita realizar la planeación de un proyecto de construcción de edificaciones, utilizando herramientas integradoras de visualización virtual 4D-PS que facilite la gestión de la incertidumbre en los mismos.

Objetivos específicos

- Caracterizar las variables y los parámetros que intervienen en los procesos de construcción de edificaciones civiles. - Desarrollar la programación de línea de base y el presupuesto del proyecto que se modelará en 3D en Software comerciales de programación y presupuesto.
- Simular por medio de la utilización de herramientas estadísticas y matemáticas los diferentes comportamientos que se presentan en proyectos de construcción de edificaciones.
- Caracterizar las diferentes herramientas de software (Arquitectural Revit, MS Project, Opus, Matlab y Statgraphics) que facilite modelizar la incertidumbre y el riesgo.
- Modelizar proyectos de construcción en 3D, empleando aplicativos de software comercial.

1 Conceptos de la planificación de obras civiles

En este capítulo se presentan los conceptos básicos de la planificación de obras civiles, marco en el cual se desarrolla el presente trabajo final de maestría. Estos conceptos se presentan bajo el entendimiento de un proyecto como una única realización consistente de un conjunto complejo de precedencias relacionadas que deben ser ejecutadas usando diversos recursos, la mayoría limitados, siendo un ejemplo típico de un proyecto los emprendimientos de construcción de obras civiles e inmobiliarias, los cuales deben ser planeados adecuadamente (Perminova, Gustafsson, & Wikström, 2008). La planeación de proyectos es un proceso que comienza con el establecimiento de objetivos; donde se definen estrategias, políticas y planes detallados para lograrlos, es lo que establece una organización para poner en práctica las decisiones, e incluye una revisión del desempeño y retroalimentación para introducir un nuevo ciclo de planeación (Keshk, Maarouf, & Annany, 2018). De acuerdo con Waly & Thabet (2003), el proceso de planeación de una construcción se puede dividir en tres grandes procesos que son la macro planeación, la micro planeación y la toma de decisiones.

La macro planeación se encarga principalmente de la revisión de los diseños, investigación del sitio, selección de secuencia de la ruta y los mayores elementos requeridos para la ejecución de los trabajos y optimizaciones para lograr los objetivos de constructabilidad, en este se hace una revisión de los temas principales a grandes rasgos para tratar de satisfacer los objetivos del proyecto. Una vez los problemas son resueltos, el equipo del proyecto finaliza el macro plan, que son las bases para el presupuesto, la programación y el control. El macro plan es logrado durante las primeras etapas del proceso; esto permite a todas las partes involucradas el pensar, aportar, discutir y modificar el diseño y/o proponer planes de ejecución alternativos.

El segundo proceso durante la etapa de planeación es la Micro planeación, esta comienza con el inicio de la construcción e involucra decisiones para proporcionar todos los elementos de detalle necesarios para asistir en el campo a los equipos en la gestión y ejecución de las operaciones del día a día. El equipo del proyecto utiliza los resultados de la fase de macro planeación como guía para las programaciones de detalle; se caracterizan los métodos para la identificación de las operaciones y se asocian recursos; se obtiene información detallada acerca de la productividad, cantidades de materiales, herramientas, equipos necesarios, etc., recolectados por la experiencia y las bases de datos. Esta programación de detalle puede ser refinada una vez se satisfagan los requerimientos del proyecto.

El tercer proceso es la toma de decisiones, la cual se encarga de transformar los datos adquiridos en las etapas previas, a través de la manipulación y el procesamiento que involucra las acciones necesarias. En esta etapa, los datos (entradas) son usualmente transformados en acciones necesarias (salidas) a través de la manipulación y el procesamiento que involucra un proceso iterativo y la utilización del conocimiento de expertos en las diferentes actividades del proyecto (Yang & Kao, 2012).

Durante el proceso de planeación, la información necesaria para la toma de decisiones debe ser extraída de los datos de los recursos, esta información es procesada para formular el conocimiento del proyecto necesario para el proceso de toma de decisiones. Para la gran mayoría de los proyectos de construcción el enfoque tradicional para la implementación de este proceso de transformación de datos ha sido basado en procesos manuales; los datos generales y específicos de la información del proyecto son comunicados entre los participantes a través de los diseños en 2D.

1.1 La incertidumbre en proyectos civiles

Las definiciones de riesgo e incertidumbre dependen de la disciplina en la cual se presenta la situación a evaluar, esta puede ser definida desde la economía, la psicología, la filosofía, la gerencia de proyectos, la ingeniería, entre otras. Para efectos de este trabajo y su desarrollo se entenderán las definiciones de riesgo e incertidumbre bajo la disciplina de proyectos e ingeniería. En cuanto a la gestión de riesgos se han desarrollado diferentes conceptos para su incorporación en la gerencia de proyectos, se puede hablar de que

inicialmente es en el PMBOK donde desde la perspectiva de la gerencia de proyectos, el riesgo es descrito como un evento incierto o condición que, si ocurre, tiene un efecto positivo o negativo en por lo menos uno de los objetivos del proyecto como costo, tiempo alcance o calidad (Varajão, Colomo-Palacios, & Silva, 2017); en esta misma guía no se da una descripción de incertidumbre como tal, sino que se define a través del concepto del riesgo. Perminova; et al (2008), refiriéndose a este hecho expresan que la incertidumbre no es un término que se explica por sí mismo y ven errado el hecho de considerar que los términos riesgo e incertidumbre sean sinónimos tal como se pudiera interpretar de la definición dada por el PMBOK.

En torno a la conceptualización y medición de la incertidumbre, la mayoría de los estudios realizados se han enfocado en la identificación y vías de prescripción para que los gerentes puedan reducir o absorber las consecuencias negativas de los ambientes de incertidumbre, permitiendo así una construcción de concepto más no una hoja de ruta que permita disminuir sus posibles efectos (Yan, Gao, Elzarka, Mostafa, & Tang, 2019). Uno de los conceptos que puede enmarcarse dentro de la gestión de proyectos es la incertidumbre entendida por Jaafari (2001) como la probabilidad de que la función objetivo no alcance el valor previsto o como la probabilidad desconocida de la ocurrencia de un evento; así, el enfoque de incertidumbre adoptado para la realización del presente trabajo está estrechamente relacionado con la medición del desempeño del proyecto en términos de cumplimiento con el valor previsto en su tiempo de ejecución y costo presupuestado.

Dadas las características particulares de los proyectos de construcción, donde variabilidades externas influyen directamente sobre la consecución de los objetivos, y la incertidumbre asociada a ese nivel de impacto no es sencilla de estimar; diferentes autores han identificado las variables que causan incertidumbre y ponen en riesgo la ejecución del proyecto. La Tabla 1-1 presenta algunos de los estudios realizados en diferentes países que permiten identificar esas variables.

Tabla 1-1. Variables generadoras de incertidumbre en proyectos de construcción.

Autores	Variables
Ma et al., (2019)	Duración de la actividad, Desviación de tiempos de externos.
Yan et al., (2019)	Clima, condiciones regulatorias, especificaciones de calidad, gestión de la comunicación, retrasos tecnológicos.

Paz, Rozenboim, Cuadros, Cano, & Escobar, (2018)	Tiempos de duración de las actividades, cumplimiento de externos.
Xu et al. (2018)	Tiempo de duración de actividades, clima, cumplimiento de plazos.
Al-Hazim et al., (2017)	Condiciones del terreno, clima, variación de órdenes, mano de obra, errores de diseño, condiciones de mercado, retraso en pagos, demora en toma de decisiones.
Aziz & Abdel-Hakam, (2016)	Condiciones climáticas, almacenamiento, mano de obra, regulaciones externas, problemas geológicos.

Fuente: Elaboración propia (2019).

Como se observa en la Tabla 1-1, las fuentes de incertidumbre estudiadas pueden variar en función del contexto en el que se desee analizar su impacto sobre las principales salidas de una planeación de proyectos: el tiempo y el costo. En ese sentido, la selección de las posibles variables de incertidumbre, se realizó a través de un análisis de en función del impacto que, a consideración de los mismos, pueden tener sobre la ejecución del proyecto.

1.2 Programación de proyectos: redes de programación

En el tema de las redes de programación, la industria militar de los Estados Unidos desarrolló el método de la ruta crítica como una técnica de planificación de proyectos navales, este se basa en la dependencia de actividades y sus duraciones, presentándolas en formas de diagramas de red y gráficos (Guido & Clements, 2012), estas redes son llamadas CPM (Critical Path Method) y PERT (Project Evaluation and Review Technique), estos métodos se han considerado como una de las herramientas básicas de programación y control para ayudar a los gerentes de proyectos a garantizar la finalización de los mismos a tiempo y dentro del presupuesto, estos métodos asumen que las duraciones y las relaciones de precedencia de las actividades del proyecto son conocidas con certeza. La realidad, sin embargo, está condicionada por la incertidumbre, lo que hace que el método del camino crítico no sea aplicable a muchos proyectos de la vida real (Migilinskas et al., 2007).

En el Método del camino crítico, cada actividad se enlaza con otra y se asignan duraciones; la interdependencia de una actividad se agrega como predecesores o sucesores de otra actividad introduciendo además la duración de cada una de ellas. Según la dependencia y la duración de las actividades, la ruta más larga se define como la ruta más crítica. En

CPM, la limitación de recursos no se considera y una actividad se puede comenzar siempre que se completen todos sus predecesores; Sin embargo, esto no es práctico, ya que los recursos no son ilimitados y su disponibilidad afecta la programación del proyecto (Karabulut, 2017). En la práctica, una actividad podría interrumpirse temporalmente debido a la transferencia a corto plazo (por ejemplo, uno o dos días) de recursos a una actividad más importante o urgente.

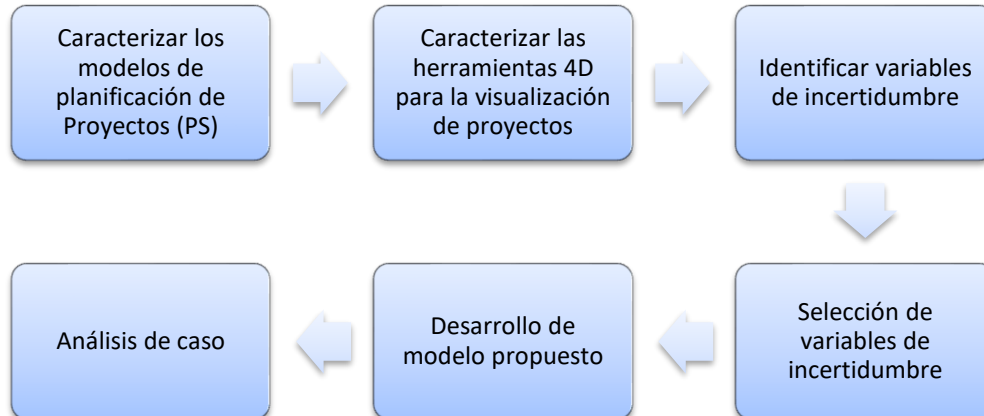
La literatura sobre programación de proyectos se ha concentrado ampliamente sobre la generación de precedencias y factibilidad de recursos que optimicen los objetivos de la programación, más a menudo la duración del proyecto (Heroelen et al, 2005). Algunos de los problemas que han sido propuestos son: el problema de la programación en ausencia de restricción de recursos (redes de análisis de tiempo de actividades), el problema de la programación con recursos restringidos (RCPS- Generalized Precedences Relations), compensación tiempo-costo, Multi modo y único modo, Resource Leveling Problems, RCPS con flujos de caja discontinuos, Redes GERT (basados en la teoría de restricciones de Goldratt), entre otros. Igualmente, algunas redes de programación con línea de base determinística e incertidumbre en las duraciones son: programación reactiva, programación estocástica de proyectos, programación de proyectos difusos, programación robusta (proactiva) y análisis de sensibilidad (Sánchez Chamba, 2018); si bien estos modelos proveen una base para la propuesta que se desarrolla en este trabajo de maestría; se hace necesario además incorporar el contexto de construcción Colombiano para analizar las principales variables generadoras de incertidumbre.

Teniendo en consideración los conceptos básicos de la planificación de proyectos, la incertidumbre asociada a estos y las metodologías más usadas para la planeación de obras civiles, es posible proceder a la presentación de la metodología seguida para el desarrollo de la herramienta propuesta en este trabajo de maestría.

2 Metodología

Con el ánimo de proponer una solución para las empresas de construcción que represente mejoras significativas relacionadas con la inclusión de variables generadoras de incertidumbre en la planificación de los proyectos, se propuso una metodología de 6 fases que permitió el desarrollo de un modelo basado en una herramienta integradora 4D-PS que posibilita la planificación de construcción de edificaciones civiles en condiciones de incertidumbre; durante su ejecución se siguió una metodología deductiva que generaliza un caso específico de estudio y sea referente para otros proyectos de construcción. Esta metodología se presenta en la Figura 2-1.

Figura 2-1. Metodología para el desarrollo del modelo.



Fuente: Elaboración propia (2019).

Las primeras tres etapas de la metodología se basan en un análisis sistemático de la literatura, donde en bases de datos indexadas y haciendo uso de ecuaciones de búsqueda estructuradas; se analizaron artículos, libros, tesis y documentos académicos que presentan en primer lugar, los modelos de planificación de proyectos -PS- por sus siglas en inglés de Project Scheduling; en segundo lugar se identifica no solo en bases de datos académicas sino también empresariales, las herramientas que se han desarrollado para la presentación visual de proyectos, también conocidas como herramientas 4D; que

presentan la evolución del proyecto en 3D e incorporan el tiempo como cuarta variable; en tercer lugar, se identifican las variables de incertidumbre que en la literatura se presentan a ser analizadas, y sobre las que es necesario analizar el impacto ocasionado a la gestión del proyecto.

El proceso de revisión sistemático de la literatura se inició con una fase de localización y selección de bases de datos indexadas en las que se encontraban estudios recientes relacionados con la incorporación de la incertidumbre en la planificación de proyectos de construcción y la planificación de proyectos en el sector; posteriormente los artículos hallados en las bases de datos fueron clasificados en función de las metodologías propuestas; los criterios de incertidumbre analizados y modelos propuestos. El contenido de cada uno de los artículos seleccionados se analizó identificando los aportes más significativos a la comprensión del problema, justificación del trabajo e identificación de las variables de incertidumbre relevantes para la construcción del modelo propuesto.

Toda vez que se identificaron las variables de incertidumbre propuestas en la literatura, es necesario seleccionar las que se incorporan al modelo; en este caso se realizó un análisis por parte de expertos sobre el nivel de influencia que tiene en el tiempo y en el costo del proyecto cada una de las variables identificadas. Con esta selección, se procede a la construcción de un modelo que permita estimar el impacto de las variables de incertidumbre y así incorporarlo a los valores esperados en tiempo de cada hito y en el costo total del proyecto. Con el ánimo de validar la posibilidad de integrar el modelo propuesto con la herramienta 4D, se toma un caso de estudio con un proyecto real.

3 Modelos para la planificación de proyectos

En consideración con la metodología propuesta, este capítulo presenta los modelos más representativos que se encuentran en la literatura para la planificación de proyectos; estos modelos se analizan de acuerdo con su relevancia y aporte en el sector de la construcción. En este sentido, es posible encontrar dentro de las primeras formalizaciones en la teoría de gestión de proyectos la propuesta por Brucker, Drexl, Möhring, Neumann, & Pesch (1999), proponen una clasificación de actividades para el PS (Project Scheduling) con el ánimo de ayudar a planificadores a seguir el rastro en el desarrollo de nuevas metodologías, pues si bien para la época ya se investigaba y estudiaba la gestión de proyectos, no se contaba con estandarización en la notación y clasificación de actividades, así como la descripción de los recursos y características de las actividades. Waly & Walid (2002), conceptúan que el proceso de planeación es crítico para el desarrollo exitoso y la ejecución de un proyecto de construcción, presentan así los conceptos de macro planeación, micro planeación y toma de decisiones en la planeación de proyectos de proyectos.

Más adelante, Long & Ohsato (2008) desarrollan el método de la cadena crítica difusa, consistente en una programación determinística con recursos restringidos, adicionando un buffer (amortiguador) de proyecto al final para el manejo de la incertidumbre, el tamaño del buffer del proyecto es determinado por cálculos con números difuso y durante la ejecución del proyecto, el método se enfoca en el nivel de penetración del buffer del proyecto y dinámicamente actualiza la programación para proveer una programación más exacta del progreso actual. El uso de un buffer de proyecto hace que el método sea similar a la gestión de proyectos de cadena crítica (CCPM), aunque no se alimenta de los buffers usados, el propósito del método es utilizarlo tanto para planeación como para ejecución de proyectos; así, Long & Ohsato (2008) encuentran como conclusión que para la creación de una

programación determinística deseable con restricción de recursos, se deben considerar tanto duraciones como tiempos de inicio para las actividades como variables de decisión para minimizar la duración del proyecto; según lo explicado por Sánchez Chamba (2018) bajo este enfoque la duración del proyecto es determinada por las relaciones entre duraciones de las actividades, relaciones de precedencias y restricción de recursos; así, usando el enfoque “tan pronto como sea posible” en el método propuesto, la programación determinística resultante tiene múltiples beneficios en aspectos de la gestión, como reducción del riesgo y mejora la situación de la administración para la negociación de recursos adicionales.

Se ha identificado, además, que en futuras investigaciones se debe desarrollar un método eficiente para determinar el tamaño del buffer del proyecto en situaciones particulares; por ejemplo, en proyectos de construcción factores como el clima, habilidades laborales, equipo y gestión de la calidad influyen muchas actividades en el proyecto. Cuando varias actividades son influenciadas por los mismos factores, sus duraciones tenderán a variar juntas, así que tanto la duración de la ruta y la duración del proyecto son afectadas.

Balouka & Cohen (2019) desarrollan un modelo basado en los algoritmos genéticos para resolver diferentes versiones del problema de RCPSP (Programación de proyectos con recursos restringidos), minimizando la duración de un proyecto, diseñando nuevas representaciones para las soluciones, diferentes técnicas de cruce, mecanismos innovadores de mutación y procedimientos de búsqueda local eficientes.

En cuanto a los modelos virtuales han sido descritos por Li et al., (2009) quienes indican que existen dos tipos de modelos digitales que son en primer lugar el BIM (Building information Modelling) y los modelos digitales de construcción detallada VDC (Virtual Design and Construction) los cuales propician una plataforma de colaboración con vistas a la mejora continua del proyecto con los aportes inclusive de los mismos usuarios finales. El primero ayuda a evaluar el rendimiento usando información de modelos 3D y la función principal es visualizar errores e interferencias, el segundo relaciona directamente las actividades del proyecto y está asociado con la programación. En la literatura es posible identificar el gran esfuerzo que se ha hecho para hacer simulación basada en modelos 3D, a los cuales se les ha integrado el programa de construcción; estos son los modelos 4D, y

modelos nD que consideran diferentes aspectos del proyecto antes de la fase de construcción (Trebbe et al., 2015).

En el tema de la modelación virtual de proyectos se encuentra en los años noventa con Akinci, Staub-French, & Fischer, (1997), quienes explican cómo un modelo 4D ayuda identificar a tiempo los conflictos de espacios entre las actividades concurrentes y proporciona asistencia en el cálculo de estimaciones de costos más realistas; igualmente proponen algoritmos que permiten hacer cambios en los rendimientos de las actividades que calculan los costos siendo aun así un modelo simple pues incluyen solamente 3 actividades.

McKinney & Fischer (1998) presentan las ideas principales de la creación de modelos en 4D basados en modelos 3D, presentando varias alternativas para su construcción, incluyendo softwares comerciales de simulación 4D, esto a través de un ejemplo sencillo de simulación. Se presentan además las limitaciones de los programas comerciales de simulación 4D y dan los primeros lineamientos para las próximas generaciones en cuanto a la construcción de modelos 4D + (espacio, costos, productividad, interferencias, etc.)

Más adelante, Koo & Fischer (2000) determinan los beneficios y limitaciones de utilizar modelos 4D, esta publicación es referenciada por la mayor parte de autores que investigan sobre modelos 4D, ya que al ser una de las primeras publicaciones del tema propone lineamientos para futuras investigaciones, incluyendo la manipulación del modelo 4D y la mejora de su funcionamiento, además de características para detectar los problemas y transmitir la información a los usuarios; este artículo se limita al problema de constructabilidad.

Kanagasabapathi & Ananthanarayanan, (2004), informan sobre el desarrollo y la aplicación de una herramienta de 4D en la industria de la construcción en India, este estudio ha servido como fuente de comparación con la aplicación de estas metodologías en ambientes diferentes a los de los estados Unidos, pues la mayoría de información proviene de investigaciones en este país.

Wang, Zhang, Chau, & Anson, (2004) analizan las características de la construcción de un modelo 4D y describen las técnicas subyacentes necesarias para la aplicación del modelo en las prácticas de gestión de la construcción; en comparación con otros modelos 4D esta investigación se extiende a las áreas de gestión de recursos y la utilización del espacio del

sitio, además de la planificación de la construcción; siendo así un acercamiento más completo a las necesidades que se buscan suplir mediante estos modelos en los proyectos de construcción.

Continuando con el uso de modelos virtuales, Baldwin et al., (2009) describen el uso de prototipos virtuales para optimizar la planificación de cronogramas de construcción mediante el análisis de la asignación de recursos y la planificación con los modelos de construcción integrada; más adelante Ku & Taiebat (2011) presentan un marco para integrar las herramientas 3D, el costo y la información de programación, centrándose en la generación de métodos de construcción alternativos; así, el objetivo es doble: en primer lugar se busca examinar el estado del arte y la evolución comercial de modelos 5D y en segundo lugar se busca mejorar la técnica de la investigación actual y la evolución comercial del modelo 5D mediante la descripción de un marco modelo de datos.

Li et al., (2009) expresan que los métodos más sofisticados combinan tres técnicas tradicionales como la localización de recursos, nivelación de recursos y análisis de balance tiempo – costo. Inicialmente, se encuentran algunos investigadores como Wang et al. (2004) que desarrollan el sistema 4D-MCPRU - Management for Construction Planning and Resource Utilization, el cual enlaza un modelo geométrico en 3D con recursos para calcular los requerimientos de recursos. Otros modelos 4D creados son el 4D-GCPSU- Graphics for Construction Planning and Site Utilization, desarrollado por Zhang et al. (2000), el modelo 4D WPSG -Work Planner Space Generator desarrollado por Akinci et al (2002), el modelo 4D-ISPS - Integrated Site Planning System; entre otros. En los últimos años se encuentran autores como De Soto, Rosarius, Rieger, Chen, & Adey, (2017), que proponen algoritmos genéticos para los problemas de optimización tiempo-costo.

En este sentido es evidente que los modelos contemplan variables tradicionales como lo son el tiempo y el costo; sin embargo, la incertidumbre no se ha contemplado de forma constante en la formulación de estos, por lo que se hace necesario analizar cómo se ha incorporado la incertidumbre en la planificación de proyectos.

4 Incorporación de la incertidumbre en modelos para la planificación de proyectos

La incorporación de la incertidumbre en proyectos fue estudiada por Laufer (1991) quien presenta la idea de que la industria de la construcción presenta los mayores grados de incertidumbre en la información para planeación; la principal premisa del estudio, es que la incertidumbre puede tener una gran influencia sobre la planeación de la construcción y esa planeación debería abordar la incertidumbre explícita y sistemáticamente bajo una hoja de ruta. Más adelante, Hans, Herroelen, Leus, & Wullink (2007) revisan varios puntos de vista sobre la gestión de la planeación de la complejidad de organizaciones multi-proyectos bajo condiciones de incertidumbre haciendo un estado del arte de enfoques de planeación jerárquica para los ambientes de la manufactura tradicional y como puede extrapolarse bajo un enfoque de proyectos; siendo el propósito el de presentar una guía general para el uso de técnicas avanzadas de planeación de multi-proyectos, proponiendo al mismo tiempo una estructura jerárquica detallada para planeación y control de proyectos. Como conclusiones señalan que los diferentes niveles de toma de decisiones jerárquica (estratégica, táctica y operacional) requieren diferentes métodos y no deberían ser siempre combinados en un modelo monolítico.

Perminova et al., (2008) discuten el fenómeno de la incertidumbre en proyectos y como podría incorporarse dentro de la gerencia; para ello presentan la definición de la incertidumbre como un elemento fundamental de la gestión de proyectos, ya que no hay un consenso en los académicos en el significado del término; así mismo, argumentan que el elemento clave en la gestión de la incertidumbre es el aprendizaje reflexivo y la conciencia como facilitadores de flexibilidad y rapidez en la toma de decisiones, con respecto a la escogencia de acciones alternativas en respuesta a una situación. Presentan como conclusiones la idea de la orientación hacia los clientes y la mejora continua. La

incertidumbre puede ser pensada entonces como una característica de la evolución: si no hay incertidumbre no hay evolución; sin embargo, no hay un común entendimiento acerca de la definición de incertidumbre y por tanto suficientes herramientas para gestionarla.

Más allá de la definición del término incertidumbre, Sanderson (2012) señala que sus fuentes son extensas y tienen un efecto fundamental sobre los proyectos y la gerencia de proyectos, esas fuentes no están confinadas a eventos potenciales e incluyen falta de información, ambigüedad, características de las partes del proyecto, equilibrio entre la confianza y mecanismos de control y variación de agendas en diferentes etapas del ciclo de vida del proyecto. La práctica común en gerencia de proyectos no direcciona muchos recursos fundamentales de incertidumbre, particularmente en proyectos “suaves” donde la flexibilidad y tolerancia de la vaguedad son necesarias señalando así que esfuerzos más sofisticados para reconocer y gestionar los recursos generadores de incertidumbre son necesarios.

Hu, Cui, Demeulemeester, & Bie (2016), analizan la incertidumbre en la producción de los proyectos de construcción desde la visión de variabilidad, reúnen los enfoques de 6 autores para definir las ventajas y las desventajas de la simulación de programas de construcción, sin embargo, se enfocan en hacer énfasis en la necesidad de formular herramientas, sin brindar soluciones puntuales.

Más recientemente, Hazır & Ulusoy (2019), revisan los criterios fundamentales para la planificación en situaciones de incertidumbre, acá se discute el potencial de estos enfoques para la programación de proyectos en virtud de la incertidumbre con estructura determinista de evolución de la red y como investigaciones futuras se señala el campo relacionado con la generación de múltiples programaciones con líneas de base robustas en combinación con programas eficientes y eficaces y los mecanismos de reparación reactiva. El estudio se limita a evaluar algunos métodos “tradicionales”, debería incluir temas de optimización como algoritmos genéticos, redes neuronales, etc.

Se ha encontrado en la literatura descrita, que la mayoría de los programas de construcción están basados en los supuestos de las redes CPM/PERT, técnicas que muestran un carácter estático para representar la naturaleza dinámica de los procesos de producción

en construcción (González, Alarcón, & Molenaar, 2009). Algunos planificadores de proyectos de construcción, utilizan el método de CPM para integrar el producto (lo que hay que hacer) con el proceso (cómo se hace) pero esto lleva a programaciones CPM muy detalladas que son difíciles de usar y actualizar, que dan como resultado programas que no son actualizados durante el proceso de construcción y así pierden su valor como instrumento para planeación del flujo de trabajo (Jongeling et al, 2007). Además los métodos tradicionales de planificación de ruta crítica, presentan soluciones “planas” a los problemas que intuitivamente sabemos son tridimensionales y que sumadas al tiempo de ejecución presentan una cuarta dimensión; excluyendo además, el modelo habitual de planear los proyectos considera los riesgos e incertidumbres asociadas a la tecnología, el clima, las organizaciones, la logística, la política y el mercado, pues estos no son atribuibles directamente a las actividades de construcción. Los métodos de planeación descritos anteriormente, tienen la dificultad de imposibilitar la visualización de las situaciones críticas, de no ponderar los riesgos y el conflicto de comunicación entre los participantes del proyecto, (Koo & Fisher, 2000); en este escenario de trabajo las situaciones de incertidumbre o no controlables son tomadas como imprevistos, lo cual genera un riesgo que se puede calificar como alto para el proyecto.

Otro aspecto a ser tenido en cuenta es la incertidumbre de las organizaciones y la estructura de los proyectos, estos tópicos han sido estudiados por Atkinson et al. (2006) quienes exponen tres áreas claves como fuentes de incertidumbre a saber: *Incetidumbre en las estimaciones* debido a la falta de especificaciones claras de lo que se requiere; novedad o falta de experiencia en una actividad en particular, el análisis limitado de los procesos envueltos en la actividad, sesgo optimista, etc. *Las incertidumbres asociadas con las partes interesadas del proyecto*, es decir con objetivos y motivación de cada parte, calidad y fiabilidad de los trabajos realizados, etc.; finalmente, exponen *la incertidumbre asociada con las etapas del ciclo de vida* del proyecto. Para abordar la solución a los inconvenientes causados por este tipo de incertidumbres Atkinson et al (2006), proponen una mayor atención al entendimiento del proceso de gestión asociado con la construcción de confianza, sentido de pertenencia, aprendizaje organizacional y construcción de una cultura organizacional apropiada, más adecuada para operar con altos niveles de incertidumbre. El tipo de incertidumbre organizacional no será objeto de estudio en este trabajo ya que se encuentra fuera del foco de estudio.

Si bien se encuentran estudios recientes sobre la incorporación de la incertidumbre en la gestión de proyectos y su incorporación en modelos gráficos, en realidad, en la década de los 90 del siglo pasado, se empiezan a desarrollar metodologías que pretenden tener en cuenta la interrelación espacial de las tareas, la utilización efectiva de los recursos y la aceptación de la existencia de los riesgos; algunas de estas metodologías, desarrolladas por el CIFE (Center For Integrated Facility Engineering) de la universidad de Standford y liderados por el profesor Martin Fisher, son los de visualización virtual VDC, dentro de los cuales se incluye la metodología 4D-PS que consiste, básicamente, en una simulación virtual de una construcción mostrando interferencias y secuencias entre las actividades, así como la vinculación del programa de construcción. Las metodologías de 4D presentan una forma de producir integración entre las distintas fases de los proyectos civiles, por medio del modelo CAD tridimensional, cuyos elementos constituyentes están vinculados a un programa de construcción (Morgues & Fisher, 2001); de esta forma, a medida que un programa avanza se puede visualizar virtualmente la construcción del proyecto; permitiendo detectar tempranamente deficiencias en programas constructivos, optimizando su seguridad y productividad.

Algunos de los beneficios, que se espera obtener con la aplicación de los modelos 4D son: la mejor comunicación entre dueño, diseñadores y constructor; reconocimiento de programas de construcción incompletos identificando componentes del proyecto que no tienen actividades correspondientes en el programa; detección de problemas de secuencias constructivas; anticipación de conflictos espacio-tiempo mostrando componentes que son construidos en espacios de trabajo reducidos; identificación de problemas de accesibilidad y congestión dentro de las obras (Morgues & Fisher, 2001).

En este sentido, el presente trabajo de maestría propone una metodología de planeación de tiempo y presupuesto aplicada a un proyecto construcción real, utilizando herramientas de planificación existentes (modelos 4D-PS) que vinculan la incertidumbre asociada a externalidades y su impacto en el costo y tiempo de finalización del proyecto, para ello se basa en el uso de herramientas estadísticas para la incorporación de variables como el clima y la fluctuación del dólar y su impacto sobre ambos componentes de la planeación.

5 Gestión de la incertidumbre en obras civiles

Con el ánimo de dar cumplimiento al objetivo general propuesto y tomando como base los modelos analizados, en este capítulo se analizan las fuentes generadoras de incertidumbre que se deberían contemplar en la planeación de obras civiles. Las fuentes de incertidumbre seleccionadas se lograrán incorporar al ensamblar un proyecto real de edificación en 3D en el software de diseño Architectural Revit versión 2019 de Autodesk, con esto se estará en la capacidad de visualizar anticipadamente la construcción del mismo, permitiendo simular el proceso constructivo de las actividades principales, brindando tanto al cliente como a los socios y al equipo planificador y constructor una gran herramienta en la comprensión del proyecto, con las ventajas que esto tiene como anticiparse a los posibles conflictos espaciales. Este Software permite obtener los insumos y cantidades de obra para presupuesto, sin la necesidad de vincular la interface humana en esta labor, la cual puede ser generadora de errores debido a su alto nivel de detalle.

Para el desarrollo de la programación de la construcción se procederá a articular las actividades con sus duraciones, precedencias y demás relaciones entre cada una de las tareas en diagrama de red. Para el desarrollo del presupuesto proyecto se tomarán bases de datos que contienen los análisis de precios unitarios de las actividades relacionadas.

Los múltiples actores dentro de la configuración de un proyecto de construcción hacen posible la integralidad del mismo; cada componente aporta características importantes para el normal desarrollo de lo construido y su adecuado funcionamiento; la arquitectura, estructura y redes se entrelazan dentro del espacio que ha sido planificado y se integran en todas las dimensiones del proyecto. Esta situación hace indispensable una adecuada coordinación de diseños desde las dimensiones, espacios, recorridos y requerimientos de cada componente. Sin esta etapa previa a la etapa de construcción, existe una alta

probabilidad de encontrar interferencias durante la etapa de construcción en componentes, arquitectura, estructura y redes, una probabilidad directamente proporcional al grado de complejidad del proyecto. Para la simulación de los diferentes comportamientos que se presentan en los proyectos de edificación se utilizarán herramientas estadísticas y matemáticas con las cuales se pretende tener en cuenta eventos no previstos.

Los resultados del trabajo permitirán tener cronogramas de obras más realistas pues se minimiza el riesgo de un inversionista por la falta de certidumbre, pudiendo así establecer condiciones de toma de decisiones con altos porcentajes de confiabilidad. Con el desarrollo de este trabajo de maestría, se pretende igualmente aportar una herramienta más para la toma de decisiones en un proyecto de construcción desde la fase de planeación, esto puede aportar tanto a la empresa privada como al sector público.

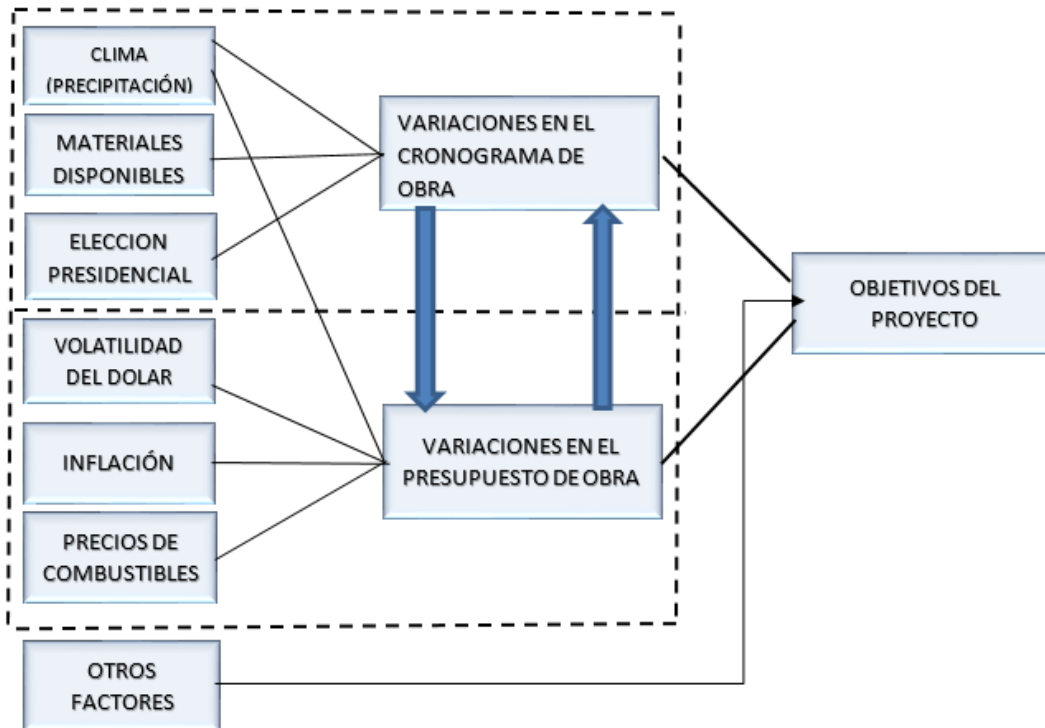
5.1 Gestión de la incertidumbre

Para gestionar la incertidumbre, se toma en consideración tanto la experiencia y conocimiento del autor de más de veinte años en el sector y el conocimiento adquirido en reunión con un grupo focal de expertos (ver Anexo A), se identificaron las variables externas e internas que afectan el cumplimiento de los objetivos de los proyectos de construcción como son: el clima, la disponibilidad de algunos materiales críticos, la política estatal, la volatilidad del dólar, la inflación, los precios de los combustibles, el acceso de la financiación oportuna, cambios de diseños, reprocesos, etc., algunos de ellos se pueden modelar y tratar de predecir por medio de modelos de pronóstico, tal es el caso de la precipitación, la volatilidad del dólar y la inflación, otros como la política estatal representada en la elección popular de alcaldes y gobernadores, elecciones presidenciales, etc., son fácilmente identificables a futuro. Las demás variables como la disponibilidad de materiales críticos, acceso a financiación oportuna, cambios en diseños y reprocesos, entre otras, requieren modelos de pronóstico que contemplan múltiples variables saliéndose del alcance del presente trabajo.

En la Figura 5-1 se presenta esquemáticamente la interacción entre algunas de las variables externas (no se pueden controlar) que han sido tenidas en cuenta por la literatura y que pueden afectar el cumplimiento de los objetivos de los proyectos de construcción.

Como se puede observar el clima, representado por los niveles de precipitación, tiene incidencia no solo en la duración del proyecto sino también en el presupuesto, así mismo otros factores culturales, motivacionales, políticos, entre otros también influyen.

Figura 5-1. Variables que influyen sobre el cumplimiento de objetivos



Fuente: Elaboración propia (2019)

A continuación, se describen las variables presentadas en la Figura 5-1 y cómo influyen sobre el cumplimiento de los objetivos del proyecto.

5.1.1 Precipitación

La variable lluvia tiene implicación directa en la duración de los proyectos de construcción, debido a que la ocurrencia de estas, detienen el avance de las actividades a cielo abierto (movimiento de tierras, urbanismo, estructura, etc.), así como representan amenaza debido a probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino (Hurtado-Montoya & Mesa-Sánchez, 2015) para la estabilidad de taludes, erosión y desperdicio de materiales. La intensidad de lluvia se mide en las estaciones meteorológicas a través de pluviógrafos o pluviómetros y la unidad de medida es mm de precipitación, que es en esencia una representación de la cantidad de agua que cae en un (1) metro cuadrado (m^2) en una hora.

En el área metropolitana de Medellín existe una red de estaciones meteorológicas que cuenta con 30 pluviógrafos aproximadamente a lo largo y ancho del valle del Aburrá. Para determinar que tanto afecta la lluvia es necesario ubicar geográficamente el Proyecto objeto del análisis y así determinar la estación pluviométrica más cercana, de la cual se tomarán datos históricos y de allí se realizará un modelo de pronóstico con el propósito de predecir los mm de precipitación que afectaría eventualmente el proyecto en el periodo de tiempo en el cual se va a desarrollar.

Para poder definir si el valor en mm de lluvia tiene la intensidad suficiente para detener las actividades y así afectar la duración del proyecto de construcción, se debe parametrizar el modelo de acuerdo a la clasificación de la intensidad de la precipitación. Oficialmente se clasifica la intensidad de la lluvia según la cantidad registrada en una hora, de tal modo que podemos oír hablar de lluvia débil, moderada o fuerte, e incluso lluvia inapreciable, muy débil, muy fuerte o torrencial. Por ejemplo, la lluvia muy fuerte sería entre 30.1 mm hasta 60 mm, registrados en una hora. (análisis de intensidad de la precipitación) Sin embargo, siguiendo el ejemplo podríamos encontrar dos registros de lluvia muy fuerte (p.e. 40 mm en una hora), pero uno podría ser constante (40 mm caídos regularmente durante una hora) y el otro podría ser muy variable (35 mm caídos en 5 minutos, y el resto, repartido hasta completar la hora).

5.1.2 Fluctuaciones del dólar

En los proyectos de construcción se requiere la utilización de insumos que, por su tecnología, especificaciones o calidad, son importados y su precio se tasa en dólares, el cambio del dólar no es constante y este se devalúa y se revalúa afectando casi siempre de forma negativa el cumplimiento de los presupuestos de obra. Las variaciones de los precios de los activos se entienden como volatilidad

De acuerdo con Tecano (2010), la volatilidad entendida como una medida del ritmo de las variaciones de los precios de los activos, es uno de los conceptos más importantes en finanzas porque constituye una forma para cuantificar el riesgo, definir estrategias de inversión, estimar precios, valorar instrumentos derivados y calcular niveles para las garantías en posiciones a plazo o créditos, entre otros. Sin embargo, la volatilidad no es

una magnitud que se puede observar cómo los precios o los retornos de un activo, por eso, en la actualidad se dispone de diferentes metodologías para su estimación, entre las cuales no existe un consenso sobre cuál puede considerarse como la mejor; no obstante, si partimos de analizar cómo la volatilidad influye en la predicción de los precios, la relevancia se centra en la precisión de dichos pronósticos en el corto y mediano plazo. En este trabajo de grado se propone un modelo que establece la incidencia en el presupuesto de obra, debido a la variación del precio del dólar en el periodo de tiempo que se ejecutará el proyecto.

5.1.3 Inflación

Económicamente la inflación ha sido definida por distintos economistas y estudiosos, pero no todos se han puesto de acuerdo en cómo precisarla. Hay quienes la han definido desde sus causas y determinan que la inflación es el exceso de emisión monetaria frente a una escasez de bienes y servicios o la pérdida de valor económico que pueda tener una moneda, sin embargo, éstas son causas de la inflación y no la inflación en sí misma (Pardo & Abella, 2013).

Por otro lado, se presentan quienes definen la inflación a partir de las consecuencias y por ello la determinan como la subida general de los precios de bienes y servicios, así como el aumento de las tasas de cambio con monedas extranjeras.

Para poder obtener una definición concreta, podemos referirnos a la inflación por su naturaleza misma y así lograremos obtener una definición que arrope completamente el concepto en sí mismo. De esta forma podemos decir que la inflación es el exceso de la demanda general de bienes y servicios sobre la oferta de estos mismos bienes y servicios, lo que genera un ritmo acelerado en el aumento de los precios de estos productos escasos. No obstante, para poder entenderla de una manera más clara, podemos ver su concepto plasmado en el desequilibrio que se puede presentar entre el caudal del dinero circulante y la estándar de producción. Estos dos elementos deben crecer a ritmos pares y similares, tanto en aceleración como en contracción. Cualquier fluctuación que cause algún tipo de diferencia entre los dos, causará una oscilación en el mercado que causará la denominada inflación.

Por todo lo anterior, la inflación genera incremento o reducción en los precios de los insumos y esa variabilidad se determina por medio del IPC (índice de precios al

consumidor). Este indicador tiene relación entre las variables ICCV (Índice de costos de construcción de vivienda) y IPVN (índice de precios de vivienda nueva). De acuerdo con Camacol: El IPC, ICCV y IPVN son los principales evaluadores del comportamiento y las dinámicas que suceden dentro del mercado inmobiliario en el país. Sus agregados capturan la esencia de la economía nacional y sectorial, pudiendo medir tanto las expectativas como los impactos de las disposiciones de los agentes, quienes a su vez también se encuentran influenciados por las demás externalidades recurrentes de una coyuntura. Sin embargo, definir la relación de estos parámetros y que tan fuerte sería esa relación no es una tarea sencilla, es así como resulta entonces de importancia hacer un análisis que permita identificar el grado de correlación entre las variables, sus oscilaciones a lo largo del ciclo del tiempo observado y que hechos tuvieron efecto en esos movimientos.

El ICCV y el IPVN se correlacionan, conociendo de antemano que la lógica invita a que aumentos o disminuciones en el ICCV, afectan en cierto nivel y de forma directa, los precios finales para la adquisición de vivienda nueva. Este sentido de la correspondencia se puede interpretar como una influencia cíclica entre ambos parámetros y habla de la repercusión de las fluctuaciones de un índice frente al otro. Del mismo modo, esta proximidad da certeza que las atmósferas políticas, sociales y económicas experimentadas en los últimos años han tenido un rol relevante en estas variaciones, sin mencionar la incertidumbre internacional que afecta constantemente los tipos de cambio para la comercialización de materias primas básicas en la actividad.

En este trabajo analizaremos la variación histórica del IPC con el propósito de realizar un modelo de pronóstico que nos permita conocer los valores aproximados de este indicador y como afecta el presupuesto del proyecto objeto de este estudio.

5.1.4 Condiciones políticas

En Colombia, las condiciones políticas, especialmente las épocas de elecciones presidenciales juegan un papel importante en la economía, toda vez que en los años en los cuales se han desarrollado los comicios electorales se han presentado repuntes o desaceleraciones de la economía debido a diversos factores; para la construcción de obras civiles, La Ley 996 de 2005, llamada "ley de garantías" consagra una serie de condiciones a observar en época de elecciones con el propósito de garantizar la igualdad de los candidatos en la contienda electoral y, en últimas, evitar se vicie la voluntad popular.

Específicamente, en materia de contratación pública la llamada ley de garantías establece unas prohibiciones que impiden a las autoridades públicas suscribir contratos o convenios en ciertas circunstancias concretas durante determinado periodo de tiempo afectando directa o indirectamente el desarrollo de los proyectos de construcción.

Lo que se presenta entonces en este trabajo de maestría es un modelo que se basa en una nueva metodología para desarrollar y presentar de forma esquemática los proyectos de construcción de obras civiles que faciliten de forma gráfica e interactiva la consecución de los objetivos relacionados con el presupuesto y el tiempo de ejecución del proyecto y su aplicación en un proyecto de construcción real: MALL INTERMEDIA PLAZA.

6 Desarrollo y aplicación de un modelo basado en una herramienta integradora 4D-PS

En este capítulo de acuerdo con el objetivo general y los objetivos específicos, se propone un modelo que permite integrar herramientas 4D con la planificación de proyectos, tomando en consideración los posibles efectos de variables generadoras de incertidumbre para el cumplimiento de la programación inicial. Para lograrlo, explica cómo se debe seleccionar las variables consideradas de alta influencia en la ejecución exitosa de los proyectos de construcción; en este sentido se identifica a través de una consulta a expertos las variables a considerar y su nivel de impacto sobre diferentes hitos de la obra de construcción; esta información se encuentra consignada en el anexo A.

6.1 Modelos de pronóstico

En este numeral se presenta la construcción de un modelo de pronóstico que usa como base la información brindada por expertos en el área; estos expertos han ocupado cargos como gerentes técnicos, gerentes de proyectos, directores de obra y directores de área de ingeniería con amplia experiencia en el desarrollo de proyectos de construcción inmobiliarios y de infraestructura.

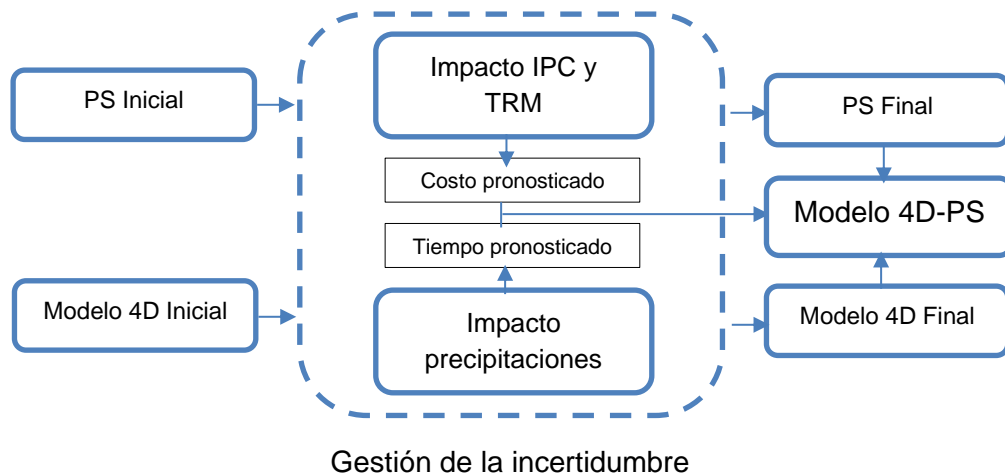
Derivado del análisis de expertos, se encuentran como variables críticas para la gestión de la incertidumbre; las variaciones del IPC, la tasa de cambio del dólar y el impacto de las precipitaciones, como condición climática en la duración del proyecto, son las que deben considerarse como “variables más influyentes”.

El marco metodológico para el desarrollo del modelo 4D-PS, consta de tres fases; la primera de ellas es la generación del presupuesto inicial bajo condiciones tradicionales de la gestión de obras, esta fase contempla el desarrollo de un modelo inicial en 4D que se construye con base en la programación de la obra inicial.

La fase dos, tiene como objetivo la cuantificación del impacto del IPC y la TRM en el costo del proyecto y el impacto del clima considerando los niveles de precipitación en el tiempo de ejecución de la obra, estos impactos se cuantifican a través de modelos estadísticos desarrollados con información de proyectos anteriores.

Finalmente, el modelo conceptual para el desarrollo de la herramienta 4D-PS, toma como insumo los resultados arrojados por los modelos estadísticos para la construcción de un nuevo presupuesto y tiempo de ejecución para cada hito del proyecto; comparándolo con el presupuesto y programación inicial y así integrarlo en un modelo 4D-PS. Teniendo en cuenta lo anterior, se propone como marco metodológico el presentado en la Figura 6-1.

Figura 6-1. Modelo conceptual para el desarrollo de una herramienta 4D-PS



Fuente: Elaboración propia (2019).

El proceso para la gestión de la incertidumbre se basará en el cálculo del impacto de las variables IPC, TRM y precipitación a través de dos modelos estadísticos que permiten predecir el valor esperado en términos de costo del proyecto y su duración. A continuación, se presentan los dos modelos propuestos.

6.1.1 Modelo de regresión lineal para el impacto del IPC en el costo del proyecto

La regresión lineal es una metodología estadística que permite cuantificar la relación existente entre una o varias variables explicativas con una variable de interés, se llama regresión lineal ya que consiste principalmente en ajustar relaciones lineales entre las variables sujeta a los supuestos: La variable de respuesta se comporta como una

distribución normal; los errores distribuyen de estadísticamente independientes con media cero y varianza constante. En múltiples situaciones de la vida real es complicado garantizar el cumplimiento de estos supuestos lo que puede llegar a generar modelos poco realistas.

Con el ánimo de trabajar con valores reales, para la construcción del modelo se tuvo en cuenta una base de datos de veinte proyectos en los cuales el autor tuvo participación en su construcción, en donde los datos que alimentarán el modelo son: costo real, costo presupuestado, tiempo estimado inicial y tiempo de ejecución real del proyecto. Estos datos históricos basados en la realidad de algunos proyectos de construcción ingresados a un modelo de pronóstico nos ayudarán a tomar decisiones y explicarán de alguna manera comportamientos de proyectos futuros en cuanto al cumplimiento de los presupuestos y las programaciones.

Sin el uso de los datos que se presentan en la tabla 6.1, la construcción de modelos estadísticos que permitan cuantificar el impacto en tiempo y costo del proyecto no sería posible. De los proyectos que se presentan a continuación, se cuenta con información relacionada al costo y plazo, comparando los costos reales versus los presupuestados al igual que el tiempo real de ejecución versus el pronosticado inicialmente.

Tabla 6-1. Información considerada para la construcción del modelo de regresión lineal

TORRE	Costo			Plazo					
	Costo real ejecutado (\$)	Costo presupuestado (\$)	Costo m2 (CT m2)	Fecha inicio	Fecha terminación	Tiempo ejecución real del proyecto	P real (días)	Tiempo estimado inicial	P estimado (días)
GORRION	\$ 9.650.891.353	\$ 6.330.994.435	\$ 422.799	oct-04	sep-05	11	330	10	300
TURPIAL	\$ 7.675.100.152	\$ 6.278.217.944	\$ 405.020	oct-05	sep-06	11	330	10	300
SINSONTE	\$ 8.315.744.510	\$ 6.278.217.944	\$ 405.491	dic-05	ene-06	13	390	10	300
COLIBRI	\$ 14.261.195.940	\$ 9.807.719.282	\$ 518.105	dic-06	oct-07	10	300	11	330
ALONDRA	\$ 17.064.584.665	\$ 12.121.260.570	\$ 496.569	dic-06	abr-08	16	480	12	360
CARRIQUI	\$ 12.680.939.473	\$ 10.062.331.082	\$ 531.555	ene-07	ene-08	12	360	11	330
RUISEÑOR	\$ 14.064.018.553	\$ 11.134.081.914	\$ 531.257	ene-08	abr-09	15	450	12	360
MANTIS	\$ 13.317.269.614	\$ 12.267.796.489	\$ 560.532	ene-08	abr-09	15	450	12	360
SALTAMONTES	\$ 18.469.025.645	\$ 16.923.173.781	\$ 683.820			18	540	12	360
CIGARRAS	26.991.642.950	\$ 15.367.526.979	\$ 733.254	ene-07	abr-08	15	450	12	360
ODONATA	28.537.889	\$ 23.283.000.000	\$ 609.943	feb-10		22	660	15	450
LUCIERNAGAS		\$ 13.955.710.768,00	\$ 655.125	mar-10					
SALAMANDRA		\$ 21.904.543.547,00	\$ 548.585	abr-10					
CANTARIDA		\$ 22.566.555.080,00	\$ 580.057						
CARACOL		\$ 15.602.322.572,00							
CUARZO		\$ 15.602.322.572,00							
EXITO	\$ 9.777.318.389	\$ 8.255.697.000,00							
RIVERA DE SURAMÉRICA T1		\$ 11.624.437.337,00	\$ 972.268	jun-14		28	840	22	660
RIVERA DE SURAMÉRICA T2		\$ 11.233.428.841,00	\$ 991.127	nov-15		32	960	22	660
TREPIU		\$ 44.997.888.662,00	\$ 1.986.749	ago-15		52	1560	38	1140

Fuente: Elaboración propia (2019).

En el caso particular de este estudio y teniendo en cuenta la información de la tabla 6.1 se construye un modelo de regresión lineal múltiple, aunque por la ausencia de grandes volúmenes de datos no se puede garantizar el cumplimiento del teorema del límite central, que establece que para conjuntos grandes de datos la distribución de estos tiende a comportarse asintóticamente como una distribución normal. Basado en lo anteriormente mencionado y reconociendo la importancia del análisis de las inferencias sobre las variables se decide aplicar una metodología estadística de regresión llamada gamlss (generalized additive model for location, scale and shape) que permiten modelar la variable de respuesta sin importar su distribución y además se pueden ajustar modelos a los demás parámetros que modelan la forma y la escala de la distribución que en cada caso mejor se adapten forma a la variable de respuesta.

En este caso el paquete que ha permitido aplicar estas metodologías llamado gamlss está disponible en el software estadístico R, inicialmente se busca la distribución que mejor se ajuste a la variable de respuesta de interés en este caso se hace uso de la función fitDist() del mismo paquete que basada en el criterio AIC (Criterio de información de Akaike) busca la distribución que mejor se ajuste a la variable de respuesta. Al analizar la información de las obras se obtuvo la distribución inversa generalizada como la que mejor se ajusta al conjunto de datos ya que es al que presenta un mejor AIC al ser comparada con las demás que presentan un ajuste aceptable

En concordancia con lo analizado por los expertos, se proponen las siguientes variables dentro del modelo de regresión:

$X_1 = \text{promedio del IPC (Índice de precios al consumidor) en los años}$
durante los cuales se realizó la construcción

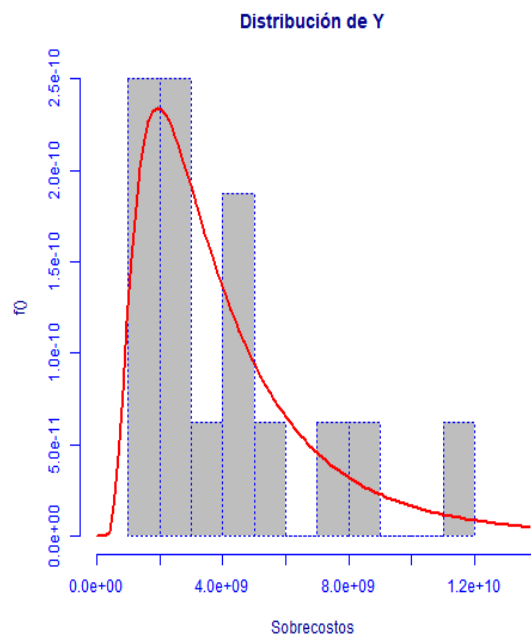
$X_2 = \text{promedio de la tasa de cambio del dólar en los años durante}$
los cuales se realizó la construcción

$Y = \text{Diferencia existente entre el valor real de construcción y el presupuestado inicialmente.}$

Una vez ajustados los datos de las diferencias entre los valores reales de las obras presentadas en la tabla 6-1, se encuentra la distribución de probabilidad de la variable Y; en la Figura 6-2 se muestra entonces un histograma construido haciendo uso de los datos de la tabla 6.1 y una línea de tendencia en color rojo que representa el comportamiento de

la distribución que mejor que ajusta a el conjunto de datos, en este caso es una distribución inversa generalizada. Esta distribución se define usando el criterio de información de Akaike. La representación de este gráfico es importante ya que nos permite ver que el histograma de este conjunto de datos no se asemeja en una distribución normal por lo que se puede inferir que los modelos clásicos de regresión no se pueden usar ya que se está rechazando el supuesto que afirma que la distribución de la variable de respuesta debe comportarse bajo una distribución normal.

Figura 6-2. Distribución de probabilidad de las diferencias en valores de obra



Fuente: Elaboración propia (2019).

A continuación, se procede a construir el modelo de forma explícita, se modela:

$$\log(\mu) = \alpha_{1.1} + \beta_{1.1} \times X_1 + \beta_{2.1} \times X_2 \text{ y } \log(\sigma) = \alpha_{1.2} + \beta_{1.2} \times X_1 + \beta_{2.2} \times X_2$$

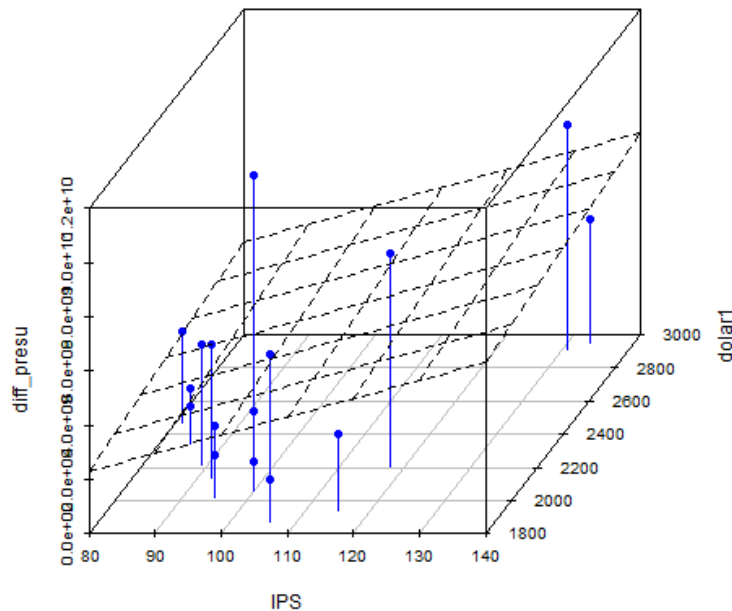
Las expresiones anteriores se representan de forma logarítmica ya que los parámetros de la distribución inversa generalizada se mueven en un rango $[0,inf]$ y logaritmo es una función que garantiza esto; los valores finales obtenidos son:

$$\log(\sigma) = -8.4038725 - 0.0084251 \times X_1 - 0.0009996 \times X_2$$

$$\log(\mu) = 21.7101061 + 0.0092966 \times X_1 - 0.0001661 \times X_2$$

En la figura 6-3, se presenta el hiperplano del modelo se presentan las covariables x_1 y x_2 en el eje X y Y y en el eje z la variable de respuesta se puede observar que, aunque el modelo trata de simular el comportamiento de los datos, se observa cómo algunos puntos presentan valores bastante atípicos (que no siguen el comportamiento habitual de los datos) y no permiten entonces un ajuste preciso, esto se debe a que en este tipo de aplicaciones los valores en la variable de respuesta pueden ser bastante variables

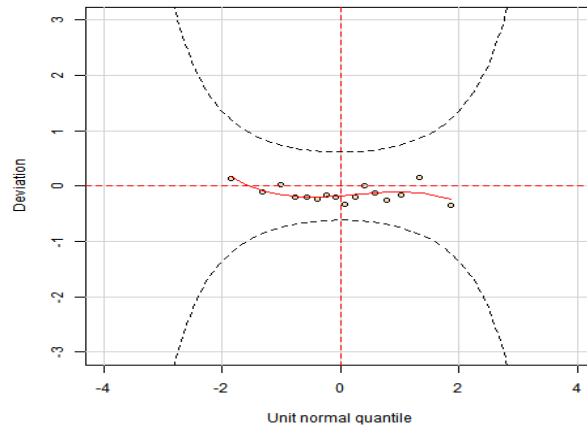
Figura 6-3. Hiperplano del modelo con las covariables para la identificación de valores atípicos.



Fuente: Elaboración propia (2019).

Para concluir la construcción del modelo de regresión debemos observar cómo se comportan los residuales ya que estos representan los patrones que no fueron explicados por el modelo; estos residuales se presentan en la figura 6-4, en el caso de los modelos gamlss se debe garantizar que estos se comportan de forma normal por lo que usamos el gráfico de gusano en el que se puede observar que como los puntos no ingresan dentro del área de las elipse se puede concluir que no existe violación evidente de los supuestos.

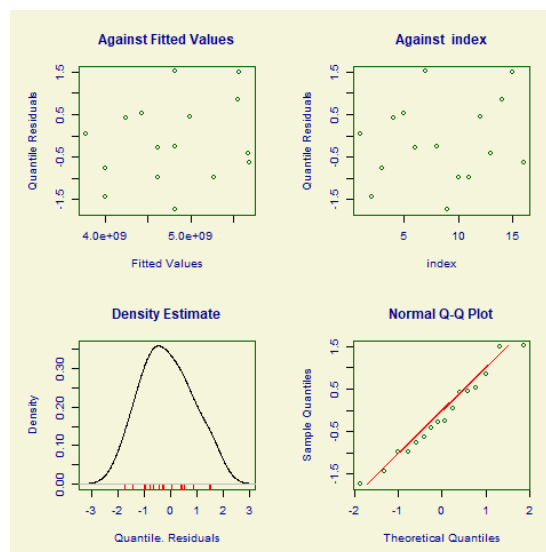
Figura 6-4. Gráfico de gusano para el análisis de residuales.



Fuente: Elaboración propia (2019).

En la figura 6-5, se presentan los gráficos de variables de valores ajustados vs cuantiles, el grafico de normalidad y qqplot y la densidad estimada para los residuales los cuales permiten supervisar si los residuales presentan patrones no explicados o comportamientos extraños y así podemos concluir que en los gráficos se puede ver como no se encuentra violaciones contra el supuesto de varianza constante y no se observan patrones polinomiales, cuando hablamos del grafico qqplot se puede ver como los valores de los residuales se ajustan bien a los valores de los cuantiles teóricos.

Figura 6-5. Gráficos de valores ajustados vs cuantiles para analizar el supuesto de varianza constante.



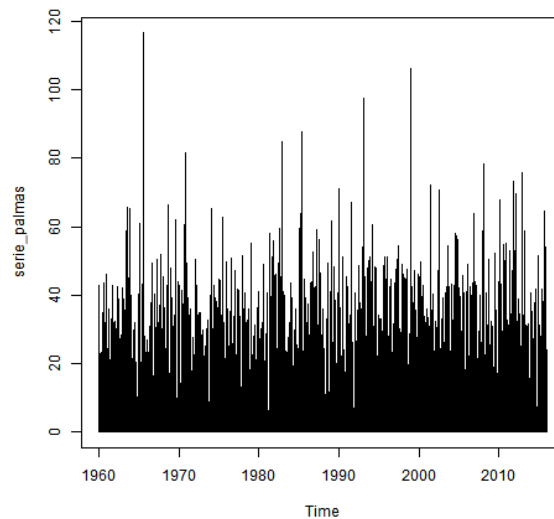
Fuente: Elaboración propia (2019).

De acuerdo a todo lo anterior, es relevante indicar que, para la construcción del modelo, se contempla el promedio del IPC y la TRM durante la ejecución de cerca de 20 obras con diferentes tiempos de ejecución.

6.1.2 Serie de tiempo para evaluar el impacto del clima en el tiempo de desarrollo

En este trabajo ha sido necesario evaluar y analizar una serie de tiempo que facilite establecer el impacto climático en los tiempos de ejecución de las obras de construcción; una serie de tiempo es un conjunto de datos estadísticos que se recopilan, observan o registran en intervalos de tiempo regulares (diario, semanal, semestral, anual, entre otros). En este trabajo de grado de maestría, se ha utilizado una serie de tiempo que está constituida por un conjunto de datos relacionados con la precipitación registrada mensual entre el año 1960 hasta el año 2018; esta información ha sido suministrada por el “Sistema de Información de alertas tempranas de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA)” como se puede ver en la Figura 6-6.

Figura 6-6. Datos de precipitación de 1960 al 2018.

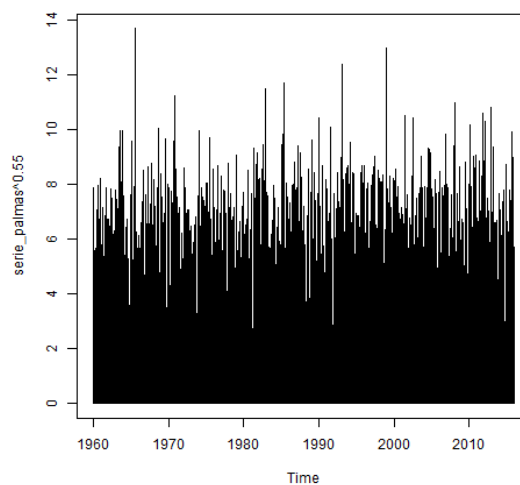


Fuente: Elaboración propia (2019)

Inicialmente lo que se busca a la hora de construir un modelo de serie de tiempo es definir si los datos se comportan de forma estacionaria lo que significa que estos presenten una varianza constante a partir del tiempo, la media es constante y que

la correlación entre un par de puntos solo depende de la separación temporal; en este caso si bien se conoce el registro de los datos de precipitación en función del tiempo, es necesario aplicar una transformación que estabilice la varianza; a continuación, se presenta entonces la figura 6-7 con transformación estabilizadora de varianza BoxCox aproximadamente 0.55; este valor se obtiene a través de R que realiza la búsqueda del valor.

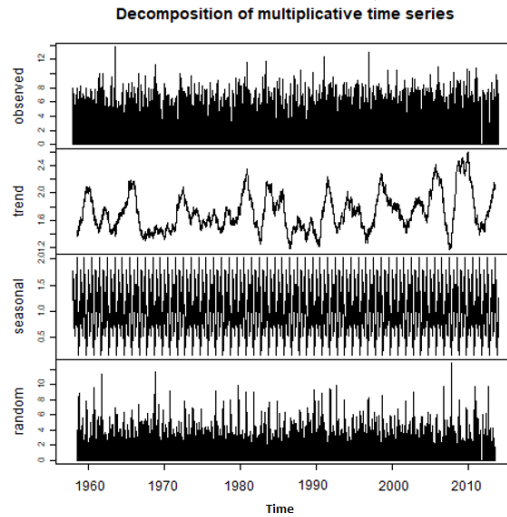
Figura 6-7. Gráfica con transformación estabilizadora de la varianza.



Fuente: Elaboración propia (2019).

Toda vez se estabiliza la varianza al observar cómo los puntos se encuentran en un rango inferior en el eje Y, es necesario analizar la descomposición de la serie en tendencia, estacionalidad, ciclos y error; esta descomposición se evidencia en la Figura 6-8, donde se evidencia la necesidad de realizar una diferencia regular mas no estacional con el propósito de transformar la serie.

Figura 6-8. Descomposición de la serie en tendencia, estacionalidad, ciclos y error.

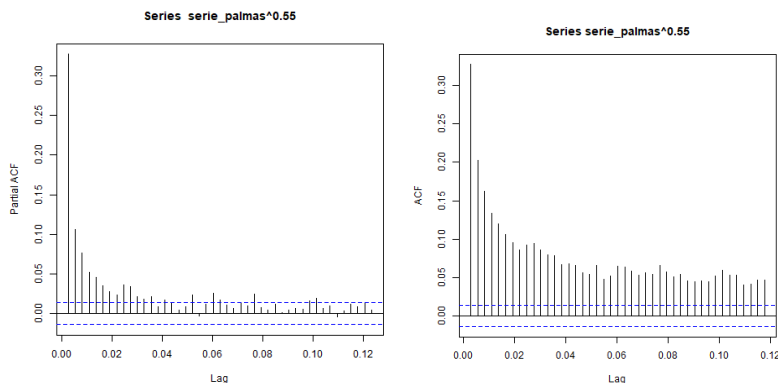


Fuente: Elaboración propia (2019).

En la figura 6-8 se puede observar claramente que hay estacionalidad relacionada probablemente a los meses de cada año de forma comparativa; los picos muestran los meses con mayores precipitaciones y los valles los meses de verano que es coherente con lo identificado por Hurtado-Montoya & Mesa-Sánchez, (2015).

En este caso cuando se observa la descomposición en la gráfica anterior se tiene una idea de la necesidad de realizar una diferencia regular mas no estacional con el propósito de transformar la serie; sin embargo, esta idea debe soportarse al construir la ACF (Función de autocorrelación) y la PACF (Función de autocorrelación parcial) de la serie transformada los cuales señalan posibles estructuras de correlación en los datos que a la hora de explicar la tendencia estos patrones irán a los residuales; estas se evidencian en la Figura 6-9.

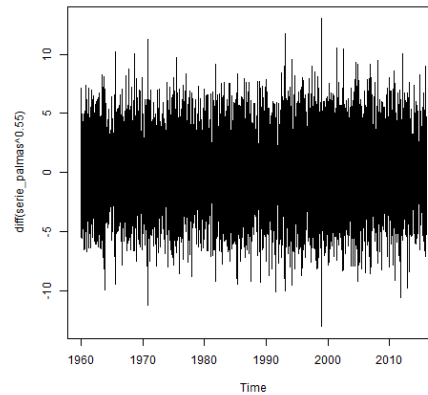
Figura 6-9. ACF y PACF de la serie transformada



Fuente: Elaboración propia (2019).

Después de observar la ACF y la PACF de la serie original transformada se evidencia que claramente no es estacionario por decaimiento tipo cola lentamente aparente componente estacionaria, por lo que se realiza una diferencia regular la cual se muestra en la Figura 6-10.

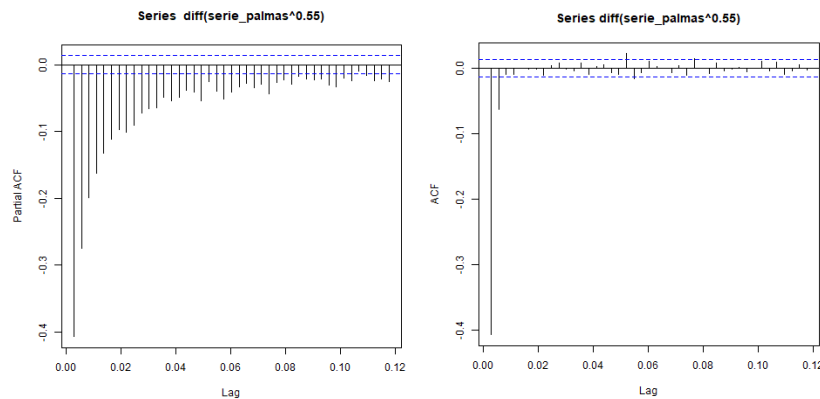
Figura 6-10. Gráfica de la serie diferenciada en tendencia



Fuente: Elaboración propia (2019).

En la figura 6-10 es posible observar que la serie de tiempos presenta aparentemente una media constante al igual que la varianza, así, después de satisfacer los supuestos de varianza constante y media contante, se recurre a explicar los a través de un modelo que permita modelar los errores aleatorios; por lo que se construye nuevamente la ACF y la PACF para la serie que contienen las transformaciones anteriores como se muestra en la figura 6-11.

Figura 6-11. ACF y PACF de la primera diferencia regular de la serie.

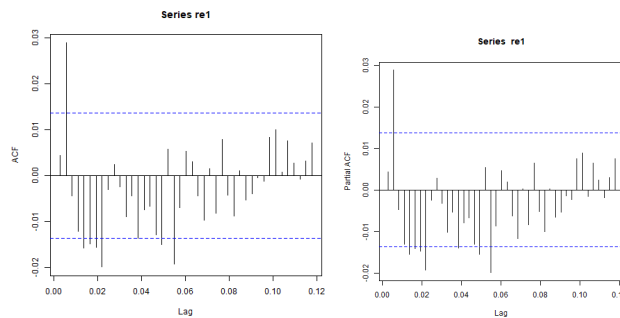


Fuente: Elaboración propia (2019)

Al analizar ACF Y PACF de la primera diferencia regular de la serie y basado en estos gráficos, se construyen 3 modelos donde se validan supuestos de que los errores son independientes y se comportan de forma normal además que no existen patrones evidentes presenten en estos; posteriormente se encontró que las mejores medidas de ajuste y pronóstico las que derivan un modelo ARIMA (0,1,2) ensamblado sobre la serie original con varianza transformada.

Igualmente, se evalúa los supuestos sobre los residuales del modelo (normalidad e independencia) contrayendo la ACF, la PACF sobre el comportamiento sobre los residuales del modelo como se muestra en la Figura 6-12 donde se evidencia que presentan rezagos aleatorios y poco significativos por lo que no se rechaza el supuesto de independencia.

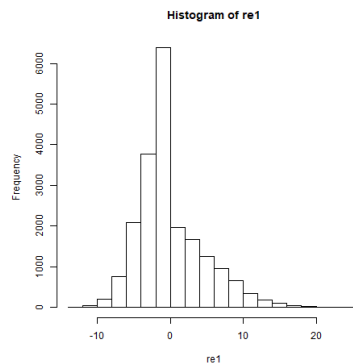
Figura 6-12. ACF y PACF de los residuales del modelo



Fuente: Elaboración propia (2019).

En la figura 6-13, se presenta el histograma de la distribución de los residuales del modelo final dado que es necesario conocer el comportamiento de los datos residuales para determinar su tipo de distribución.

Figura 6-13- Histograma de residuales del modelo.



Fuente: Elaboración propia (2019).

Basado en las gráficas anteriores para los residuales se llega a la conclusión que la PACF y la ACF presentan rezagos aleatorios y poco significativos por lo que no se rechaza el supuesto de independencia. Por otro lado, al observar el histograma se evidencia que, aunque la distribución no es completamente normal, la media si es aproximadamente cero, este comportamiento se está dando debido a valores atípicos y comportamientos extraños.

Finalmente, se concluye que no se rechaza el supuesto de normalidad, independencia y media cero para los residuales del modelo escogido. Con lo anterior, los criterios que se consideran para el impacto porcentual en las actividades de obra según las precipitaciones se muestran en la tabla 6-2.

Tabla 6-2. Incidencia de la lluvia sobre la ejecución de obra

Clasificación	mm	Porcentaje afectación
Muy Fuerte	Más de 30	100%
Fuerte	Entre 15 y 30	40%
Moderada	Entre 5 y 15	20%
Débil	Menos de 5	0%

Fuente: Elaboración propia (2019).

A continuación, se procede a realizar la aplicación del modelo en un proyecto real.

6.2 Proyecto de aplicación: MALL INTERMEDIA PLAZA

Como es claro en el objeto de un trabajo final de maestría en la modalidad de profundización, se debe presentar un caso aplicado en el cual se muestre una solución a un problema real de la industria, en este caso se selecciona un proyecto que se ha venido estructurando desde el año 2017 hasta la fecha, en el cual se presentan las características esenciales para poder formular un proyecto en las condiciones exigidas para este tipo de trabajo.

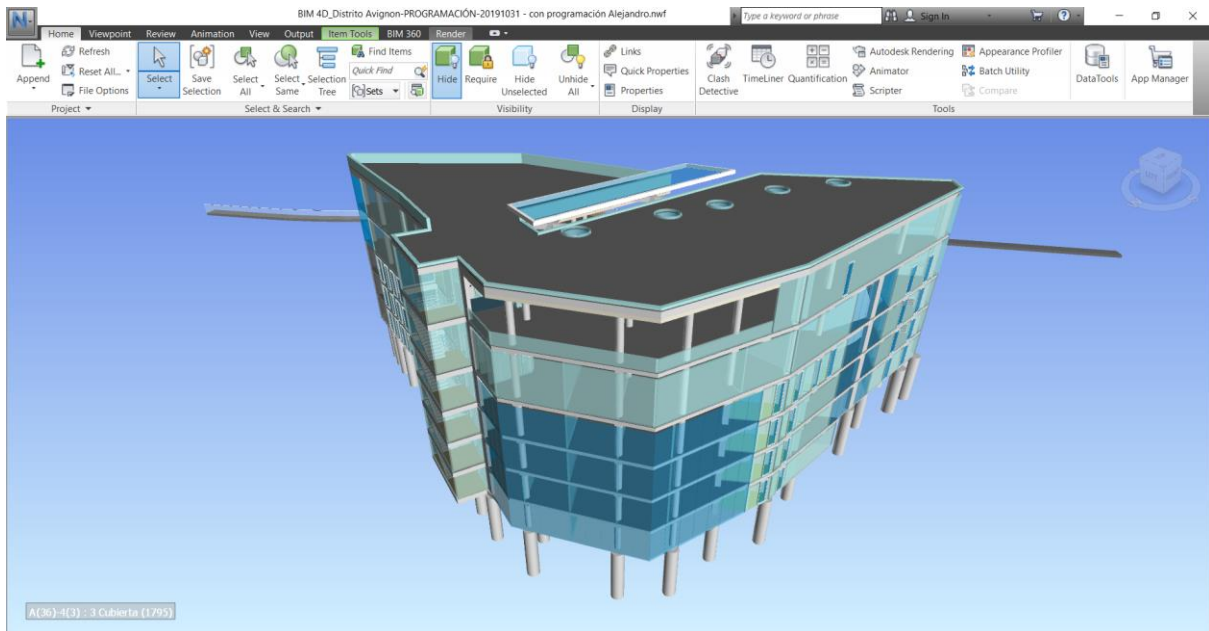
El modelo es aplicado en el proyecto constructivo MALL INTERMEDIA PLAZA, este es un proyecto comercial de 6 niveles, ubicado en el municipio de Envigado (Antioquia) el cual se tiene planificado su inicio en el mes de octubre de 2019. En este proyecto se ha aplicado las técnicas tradicionales de planificación de obra y elaboración del presupuesto para posteriormente, aplicar el modelo propuesto permitiendo evidenciar que es posible su aplicación a cualquier proyecto constructivo en que se adopte la metodología desarrollada. En consecuencia, se presenta de manera detallada la programación inicial del proyecto (MS Project) en el anexo C.

Para el caso aplicado en este trabajo final de grado, se procede a construir el modelo 3D con base en el diseño del proyecto comercial y donde es posible visualizar las diferentes etapas del proyecto; posteriormente, se muestra el presupuesto inicial y la programación de obra construido bajo metodologías tradicionales que no incorporan la incertidumbre; finalmente, se muestra la visualización del modelo 4D-PS que incorpora los cambios en la fecha de programación con base en los modelos de pronóstico construido, al igual que el valor estimado del presupuesto considerando la incertidumbre; esta información se encuentra consignada en el anexo C.

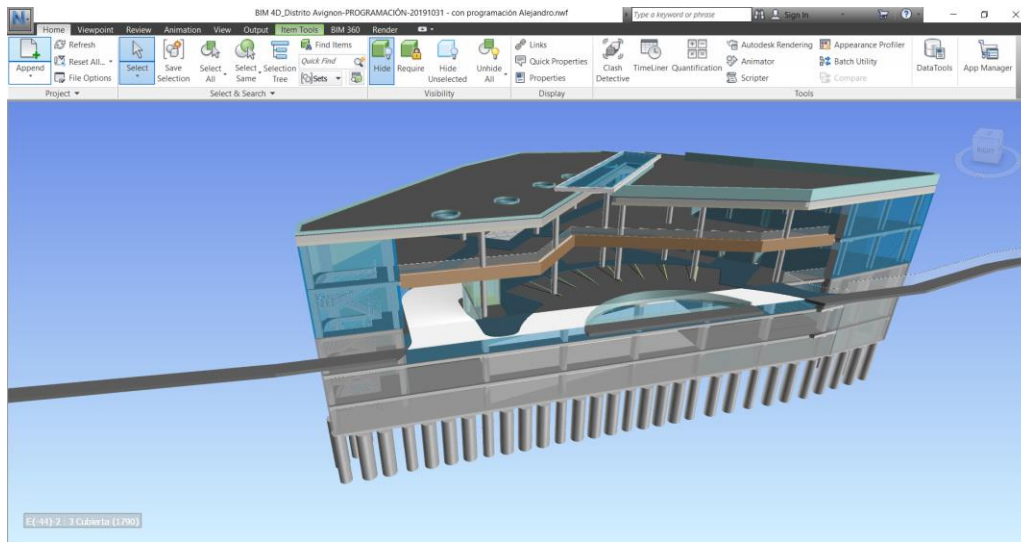
6.2.1 Visualización del proyecto en 3D

Toda vez se conoce la programación de la obra y los planos aprobados del proyecto, se procede a la construcción de un modelo 3D que permite visualizar como será al finalizar el centro comercial. El modelo para el caso aplicado se muestra la figura 6-14 y figura 6-15.

Figura 6-14. Modelo 3D de Mall Intermedia Plaza vista lateral.



Fuente: Elaboración propia (2019).

Figura 6-15. Modelo 3D de Mall Intermedia Plaza vista frontal.

Fuente: Elaboración propia (2019).

Para la visualización del modelo se puede acceder al link: <https://a360.co/34tqj7X> con la clave: LOTUS_DTA. El manejo es muy intuitivo y de forma gráfica se logra identificar la acción que se desea realizar, como rotar el modelo, desplazarlo, caminar, tomar foto desde algún punto. En caso de tener inquietudes o querer profundizar en el manejo de la herramienta, se puede descargar manuales de usuario desde: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/learn-support> y acceder a video tutoriales en: https://www.youtube.com/watch?v=St3Kee1_jNg. Con base en el diseño del proyecto, se presenta la construcción del presupuesto inicial bajo consideraciones clásicas.

6.2.2 Presupuesto

La elaboración de un presupuesto de obra civil es una tarea fundamental en la estructuración de un proyecto de construcción y de su correcta estimación depende considerablemente el éxito o el fracaso de los proyectos de construcción. Los aspectos que se deben tener en cuenta antes de iniciar con un presupuesto de un proyecto son: alcance, ubicación, duración estimada, tipología, diseños, etc.

Dependiendo del tipo de proyecto se debe establecer la estructura del presupuesto de costos directos, orientado a lo que se desee controlar, normalmente los presupuestos de costos directos en obras civiles se dividen en: Capítulos, subcapítulos y actividades. De acuerdo a la estructura del presupuesto y basados en la experiencia del presupuestador se

inicia con la definición de los capítulos de construcción, algunos de estos son: Excavaciones, fundaciones, estructura, mampostería, ventanería, pintura, aseo, etc. Posteriormente se listan los subcapítulos que hacen parte de los capítulos y por último las actividades que componen los subcapítulos. Una vez se haya listado preliminarmente la estructura que tendrá el presupuesto, se definen las cantidades de obra y las unidades de medida (m^3 , m^2 , ml, und, GB, etc), estas se basan en la geometría de los elementos y se basan en los diseños (Arquitectónicos, estructurales, redes, etc). Las cantidades de obra pueden ser tomadas de forma manual en caso de proyectos que sean gestionados de manera tradicional; para este trabajo las cantidades de obra para el presupuesto son tomadas del modelo 4D teniendo en cuenta previamente la parametrización del modelo.

Posterior a las cantidades de obra de cada actividad, se estructuran los A.P.U (Análisis de Precios Unitarios), estos análisis corresponden a la cantidad de insumos consumidos en cada actividad y dependen de la unidad de medida sobre la cual se vaya a gestionar la actividad; los insumos son: materiales, herramientas, equipo y mano de obra. Para terminar de completar el A.P.U se coloca el precio de cada insumo y el resultado final es la suma de cada uno de ellos.

En el anexo C se presenta la construcción del presupuesto inicial de la obra; encontrando que el presupuesto del proyecto, sin tener en cuenta la incertidumbre y de acuerdo a la forma como tradicionalmente se gestiona el componente costo en los proyectos de construcción, se logra una cifra de \$13.906'343.500 como valor estimado del proyecto objeto del este trabajo.

6.2.3 Programación de obra

La realización de una programación de obras civiles implica tener conocimiento de los procesos de construcción de obra en lo que se refiere a la precedencia de las actividades, aunque necesariamente las actividades de construcción no están relacionadas directamente con las actividades del presupuesto, lo ideal es que se conserve lo máximo posible esta relación para un mejor control. Es por ello, que antes de presentar la programación de la obra bajo estudio, es importante concebir la realidad de la programación en el entorno de la Construcción en Colombia teniendo presente todos los capítulos anteriores.

El primer paso para la elaboración de un cronograma de obra es organizar un calendario para el proyecto, esto significa definir los días laborales, los días no laborales, el horario de trabajo, los recursos disponibles, etc. Seguidamente se define la EDT (estructura de división del trabajo) lo cual consiste en dividir y subdividir el alcance del proyecto en “piezas” llamados capítulos subcapítulos y actividades.

Como tercer paso se establece la duración de las actividades, para ello se requiere experticia y conocimiento de los procesos de obra, pues puede resultar demasiado complejo relacionar mentalmente los procesos que pueden ser sucesivos, incluso con la ayuda de las herramientas de planificación 4D-PS. Uno de los elementos que se deben tener en cuenta para la duración de las actividades es el rendimiento de la mano de obra.

Para concluir con la preparación del cronograma, de acuerdo con el software de programación MS PROJECT, se debe establecer la precedencia de las actividades, esto implica definir de que actividad o actividades depende el inicio de otra. Existen cuatro (4) relaciones de precedencia entre actividades, estas pueden ser:

- CC (Comienzo – comienzo) Ambas actividades A y B comienzan al mismo tiempo.
- FC (fin – comienzo) Se debe terminar primero la actividad A para que pueda iniciar la siguiente B.
- CF (Comienzo – fin) Esta es el tipo de relación de precedencia menos frecuente, en ella el inicio de la actividad precedente con el fin de la actividad siguiente. La actividad B no puede terminar hasta que no haya acabado la actividad A.
- FF (Fin – Fin) La actividad siguiente B y la actividad precedente A finalizan al mismo tiempo.

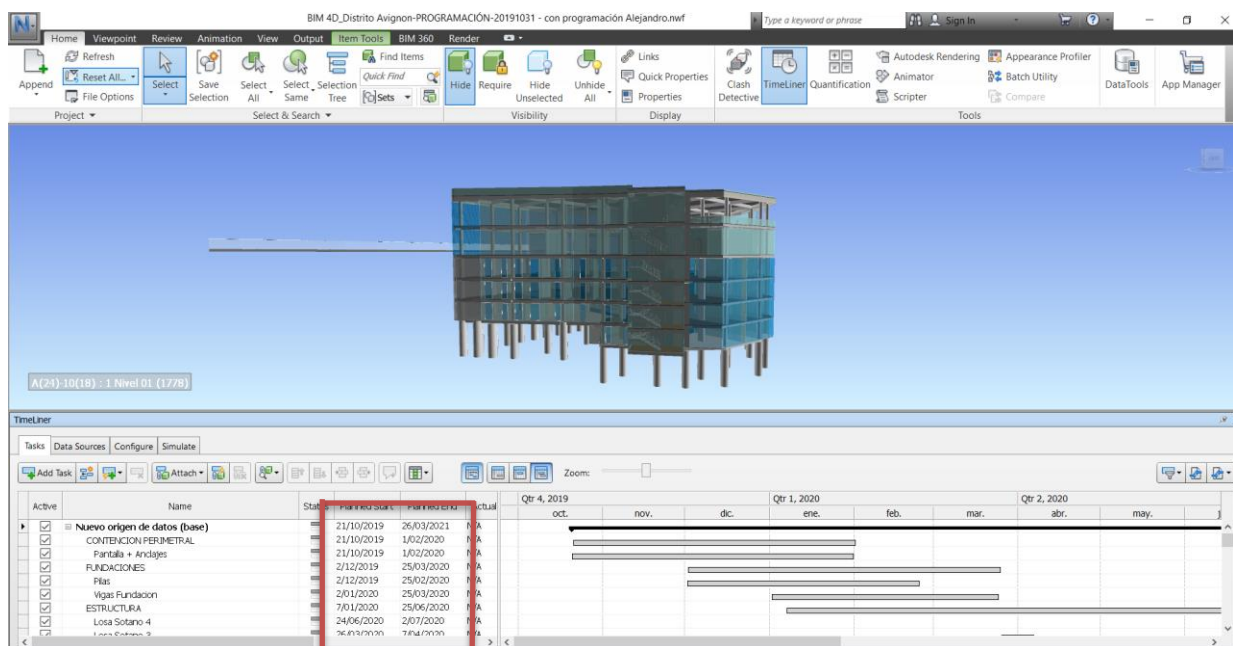
En la figura 6-16 se presenta la incidencia porcentual estimada por cada variable que afecta los objetivos de los proyectos y su impacto en cada una de los capítulos del proyecto de construcción. Estas variables son lluvia (LL), fluctuación del dólar (FD), paros nacionales (PN), año de elecciones (AE), inflación (I), incremento en combustibles (IC), financiación del proyecto (FP), reprocesos por defectos (RD) y cambios en diseños (CD).

Tomando en consideración el presupuesto, los hitos de la obra y la programación del proyecto, se procede a la construcción del modelo en 4D-PS; para analizar las diferencias que se obtienen en fechas de finalización de los hitos al incorporar incertidumbre; se mostrarán gráficos con el avance inicial planeado de la obra al finalizar cada hito, y se comparará con el desarrollo pronosticado del modelo para la misma fecha; evidenciando retrasos a través de la modificación del modelo 4D.

6.2.4 Visualización del proyecto en 4D-PS con incertidumbre

Una vez desarrollado el cronograma, del proyecto y su configuración en el modelo 4D inicial; es posible proceder a parametrizar el modelo 4D-PS bajo la planeación inicial; el resultado se observa en la Figura 6-17.

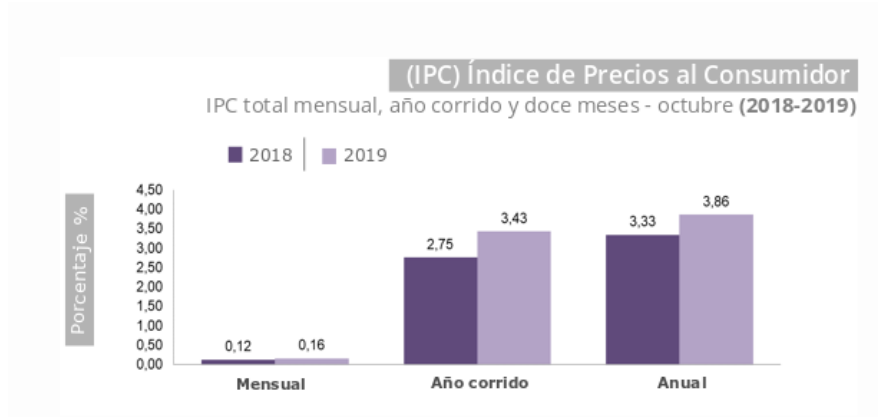
Figura 6-17. Modelo 4D que integra el modelo 3D+programación



Fuente: Elaboración propia (2019).

En el recuadro señalado, se evidencia como fecha de inicio del proyecto normal el 21 de octubre de 2019 y como fecha de terminación del proyecto normal el 14 de abril de 2021 (Esta información puede ser corroborada en el anexo C). Para la simulación e ingreso de los datos del modelo se tomó la información del IPC reportado por el DANE que se muestra en la figura 6-18, al igual que el valor del dólar el 29 de noviembre de 2019: \$3.502,00.

Figura 6-18. Comportamiento del IPC a octubre de 2019.



Fuente: DANE (2019).

Igualmente, se ingresan los parámetros al modelo como lo son valor inicial del proyecto \$13.906'343.500; valor del IPC, TRM y fecha de inicio y fin de la obra; los modelos construidos permiten obtener un valor estimado real de ejecución por \$14.476'838.300 y un estimado de 115 días adicionales, debido a la pérdida de jornales de trabajo por condiciones climáticas; esta simulación se muestra en la figura 6-19.

Figura 6-19. Pronósticos de costo real de la obra y días de retraso.

Filters

Valor inicial
Ingrese el valor inicial
13906343500

Parametros de presupuesto
Ingrese el valor del IPC
3,43
Ingrese el valor del dolar
3502

Parametros de tiempo
Ingrese fecha inicio y fin de obra
2019-09-16 to 2021-04-14

Predicción modelo
14576938300

Limite Inferior
28475468500

Limite Superior
28491095100

Dif fecha
[1] "2019-09-16" "2021-04-14"

Días de ejecución
[1] 576

Precipitación promedio en tiempo de ejecución
[1] 14,39253

Días perdidos
[1] 115,2

Fuente: Elaboración propia (2019).

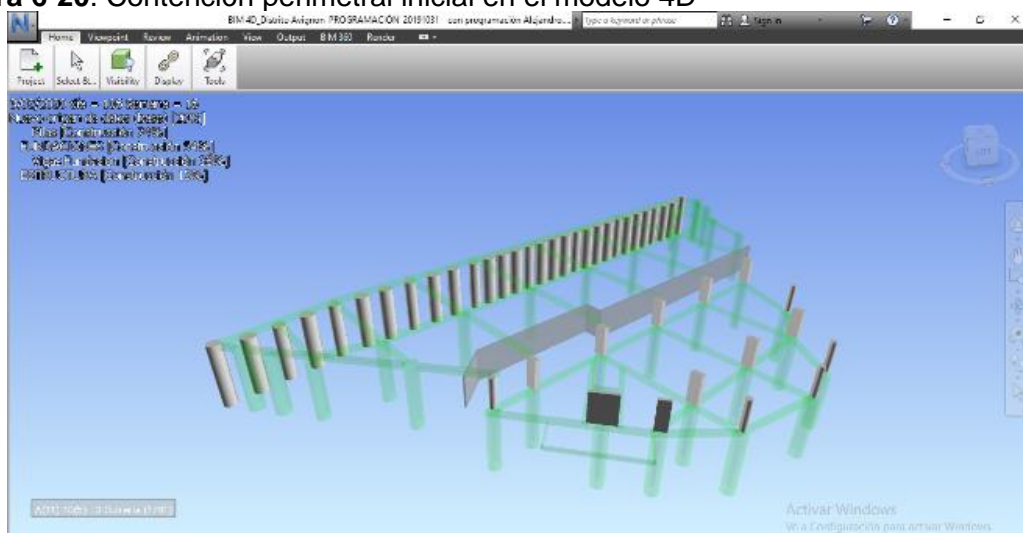
El acceso a la aplicación construida con los modelos propuestos se realiza a través del enlace: <https://ydmarinb97.shinyapps.io/Aplicacion/>. Con el propósito de verificar la incidencia de la precipitación en el cronograma de obra en el proyecto objeto de este

trabajo, se compararán los principales capítulos del proyecto de construcción, los cuales consisten en los hitos más relevantes tanto por la duración, la especialidad y el costo; esta comparación se basa en la modelación en 4D-PS del proyecto con la duración de las actividades como se hace tradicionalmente (condiciones óptimas) y el segundo, un modelo en 4D-PS que contempla la duración de las actividades con los tiempos adicionales generados por la precipitación que fue pronosticada por medio de los modelos de regresión lineal. Se eligieron los capítulos de la obra al aire libre, ya que son afectados directamente por el clima. Se hará una breve descripción de los capítulos que se analizarán, los cuales son: Contención perimetral, fundaciones, estructura, mampostería, obra blanca y entregas.

- **Contención perimetral**

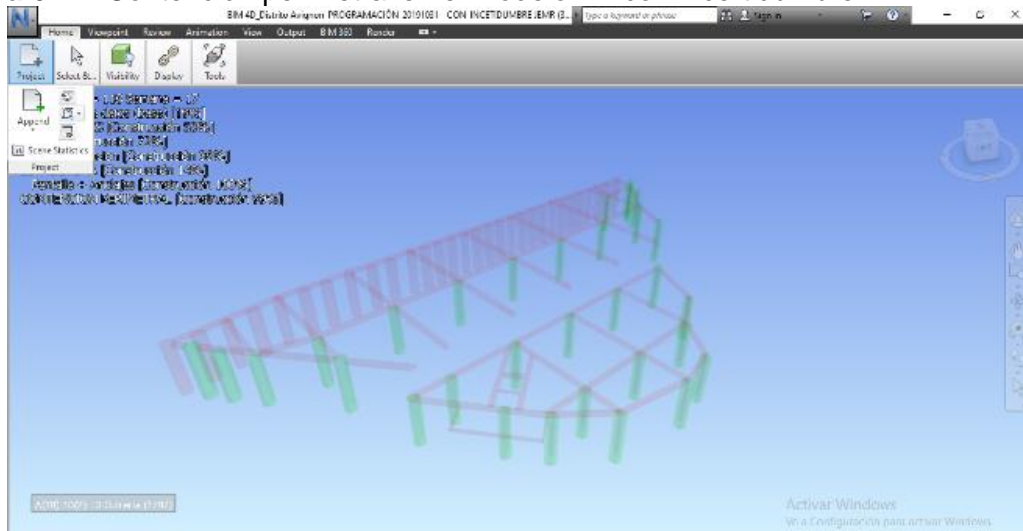
La contención perimetral es la primera actividad de este proyecto, se trata de la construcción de una pantalla de 34 pilas excavadas manualmente, que tiene como propósito contener una porción de terreno que luego será excavada, esto debido a la topografía del lote y a la configuración arquitectónica de la edificación. En el caso de MALL INTERMEDIA PLAZA tiene como fecha de inicio de la contención perimetral el 21 de octubre de 2019; sin embargo, como se muestra en la Figura 6-20 y la Figura 6-21 hay un retraso asociado a la finalización de este capítulo, donde la fecha de finalización bajo condiciones óptimas es el 1 de febrero de 2020 mientras que en condiciones de incertidumbre se prevé el 21 de abril de 2020 como fecha de finalización.

Figura 6-20. Contención perimetral inicial en el modelo 4D



Fuente: Elaboración propia (2019).

Figura 6-21. Contención perimetral en el modelo 4D con incertidumbre



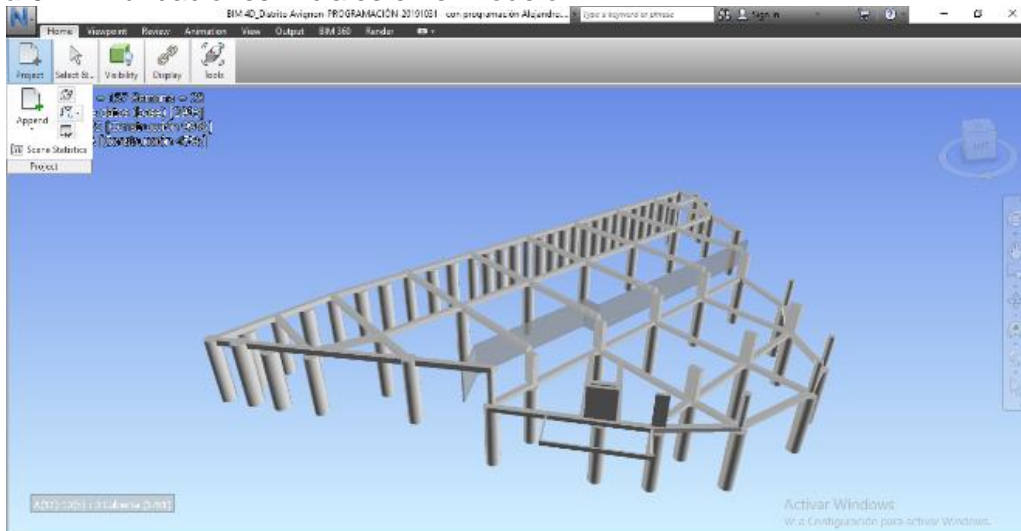
Fuente: Elaboración propia (2019).

El modelo 4D permite visualizar el retraso pronosticado por el modelo al colorear en rojo las actividades que debieron estar concluidas al 1 de febrero de 2020 (fecha de finalización del capítulo) pero no han sido ejecutadas, teniendo así una diferencia de 34 días entre el modelo sin considerar los efectos de la lluvia y el modelo que sí los considera, representando así hasta ahora 34 días de retraso. De forma análoga se mostrarán los gráficos comparativos para los siguientes capítulos de obra que se presentan a continuación.

- **Fundaciones**

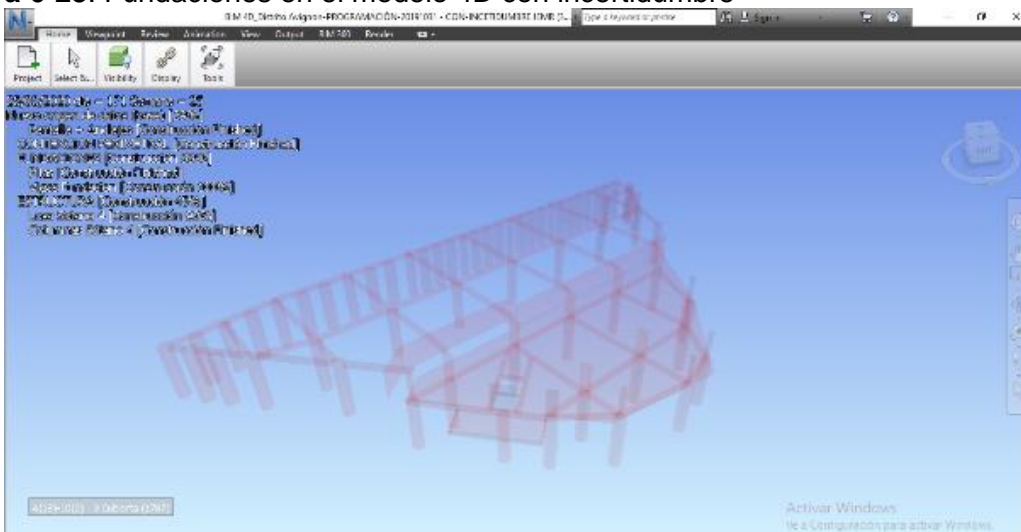
Las fundaciones, también llamado subestructura, corresponde al segundo capítulo de este proyecto, las fundaciones tienen como objetivo trasladar los esfuerzos generados por la estructura a estratos (capas) de suelo más competentes de forma que eviten deformaciones de la estructura por asentamientos. La Figura 6-22 y la Figura 6-23 permite realizar una comparación en el modelo 4D de las fechas de finalización de las fundaciones para la programación original y para la programación modificada por el modelo de pronósticos que incorpora la incertidumbre asociada al IPC, la TRM y las precipitaciones en el desarrollo del proyecto.

Figura 6-22. Fundaciones iniciales en el modelo 4D



Fuente: Elaboración propia (2019).

Figura 6-23. Fundaciones en el modelo 4D con incertidumbre



Fuente: Elaboración propia (2019).

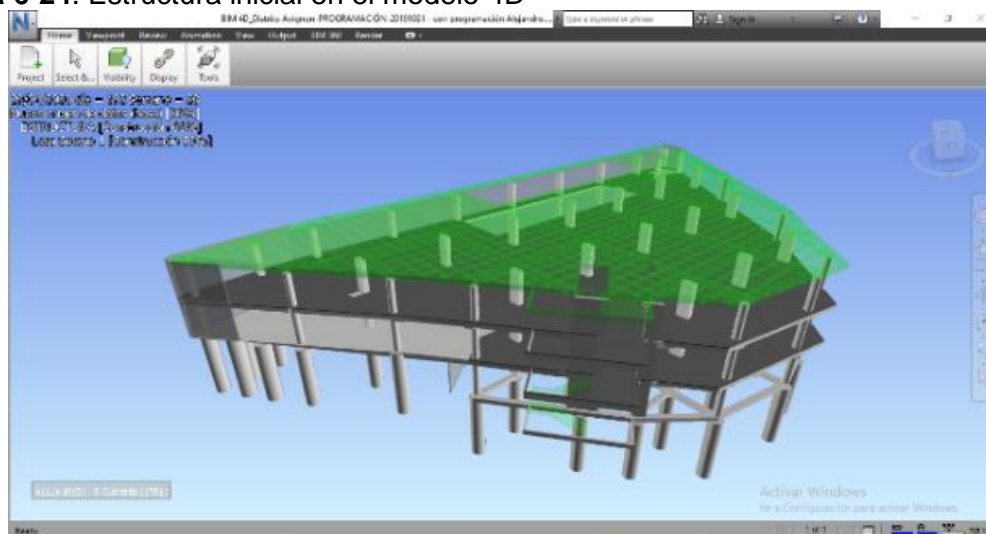
Debido a que el primer capítulo de la obra presentó 34 días de retraso, las fundaciones que estaban presupuestadas para iniciar el 2 de diciembre de 2019, iniciarán el 5 de enero de 2020; al adicionar los días perdidos según el pronóstico para las fundaciones, retrasan la finalización del 25 de marzo de 2020 al 2 de junio de 2020, es decir, se acumulan hasta el momento 67 días adicionales a la planeación original de la obra bajo condiciones óptimas.

- **Estructura**

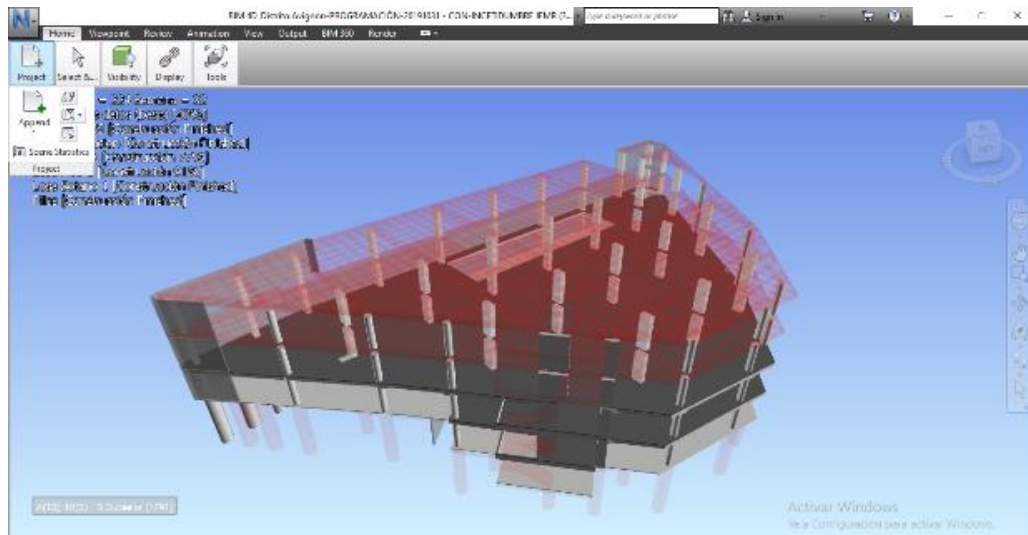
La estructura es la actividad que consiste en la construcción del “esqueleto” de la edificación y como tal soporta las cargas y deformaciones impuestas por el peso de los materiales, las cargas vivas y los sismos. La estructura la conforman las columnas, las vigas aéreas y las losas (pisos). Los materiales con los que se hacen las estructuras puede ser acero, concreto reforzado, madera, etc. En este proyecto la estructura fue diseñada en concreto reforzado.

Con la Figura 6-24 y la Figura 6-25 se realiza la comparación en el modelo 4D de las fechas de finalización de la estructura en un 50% de su desarrollo, esta comparación se hace para la programación original y para la programación modificada por el modelo de pronósticos.

Figura 6-24. Estructura inicial en el modelo 4D



Fuente: Elaboración propia (2019).

Figura 6-25. Estructura en el modelo 4D con incertidumbre

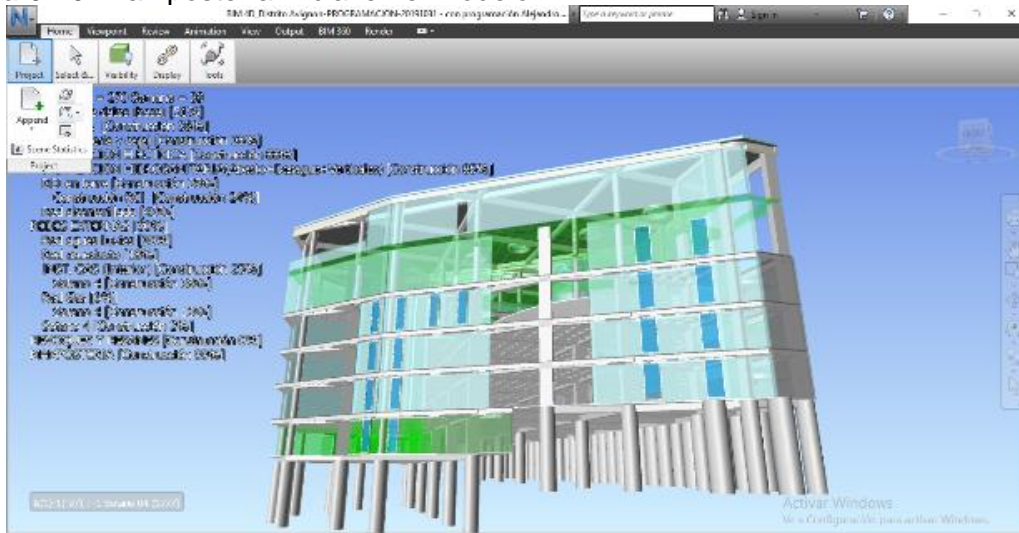
Fuente: Elaboración propia (2019).

Debido a que ya se cuenta con 70 días de retraso, reportados en las fundaciones, en total en el momento de ejecución del 50% de la estructura, este capítulo de la obra que estaba presupuestada para iniciar el 7 de enero de 2020, iniciará el 10 de febrero de 2020; y al adicionar los días perdidos en total según el pronóstico para este capítulo de la obra, desplazan la fecha de finalización del 25 de junio de 2020 para el 18 de septiembre de 2020, es decir, se han acumulado hasta el momento 82 días adicionales a la planeación original de la obra bajo condiciones óptimas.

- **Mampostería**

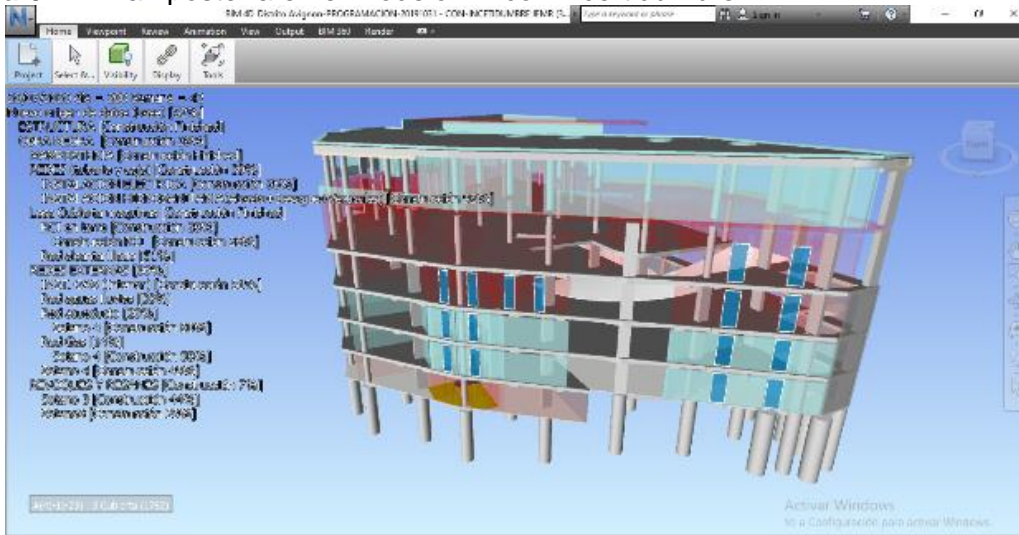
La mampostería consiste en la colocación manual de elementos para conformar los muros tanto en fachada como en el interior de la edificación. En el mercado existen múltiples tipos de formatos de los elementos de mampostería y su elección depende de criterios arquitectónicos y presupuestales. La comparación relacionada al retraso en ejecución de este capítulo de la obra se evidencia en la Figura 6-26 y la Figura 6-27 se presenta la comparación en el modelo 4D de las fechas de finalización de la mampostería, esta comparación se hace para la programación original y para la programación modificada por el modelo de pronósticos.

Figura 6-26. Mampostería inicial en el modelo 4D.



Fuente: Elaboración propia (2019).

Figura 6-27. Mampostería en el modelo 4D con incertidumbre



Fuente: Elaboración propia (2019).

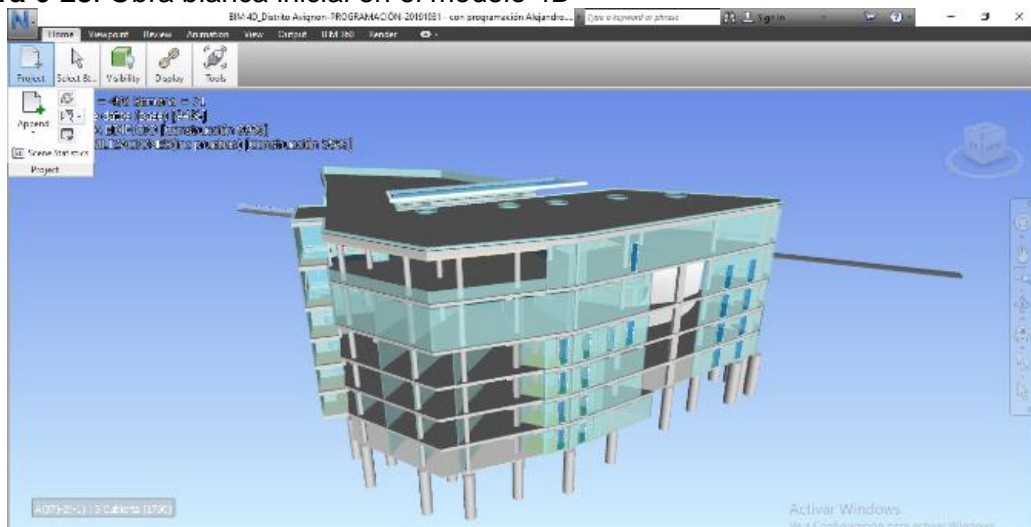
Debido a los retrasos que se han acumulado hasta el momento (reportados por la estructura), este capítulo de la obra que estaba presupuestada para iniciar el 20 de mayo de 2020, iniciará el 25 de julio de 2020; y al adicionar los días perdidos en total según el pronóstico para este capítulo de la obra, desplazan la fecha de finalización del 16 de julio de 2020 hasta el 28 de octubre de 2020, es decir, se han acumulado hasta el momento 90 días adicionales a la planeación original de la obra bajo condiciones óptimas.

- **Obra blanca y entrega**

En la ciudad de Medellín se conoce al capítulo obra blanca como la etapa final de una obra, donde priman los acabados y detalles de diseño, dándole apariencia estética y confortable. Las actividades de la obra blanca son: estucos, pintura, cielos rasos, instalación de puertas, carpintería, etc.

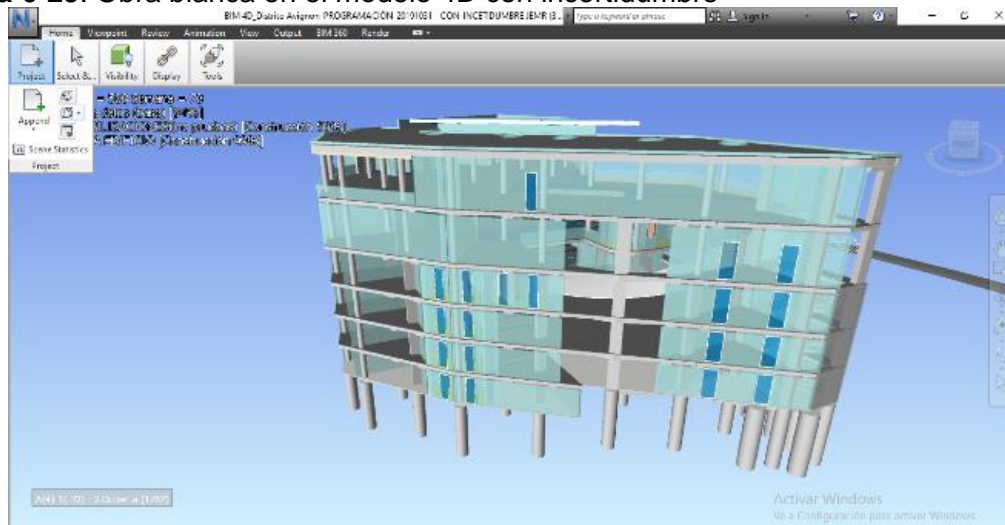
En la Figura 6-28 y la Figura 6-29 se presenta la comparación en el modelo 4D de las fechas de finalización de la obra blanca, esta comparación se hace para la programación original y para la programación modificada por el modelo de pronósticos.

Figura 6-28. Obra blanca inicial en el modelo 4D



Fuente: Elaboración propia (2019).

Figura 6-29. Obra blanca en el modelo 4D con incertidumbre



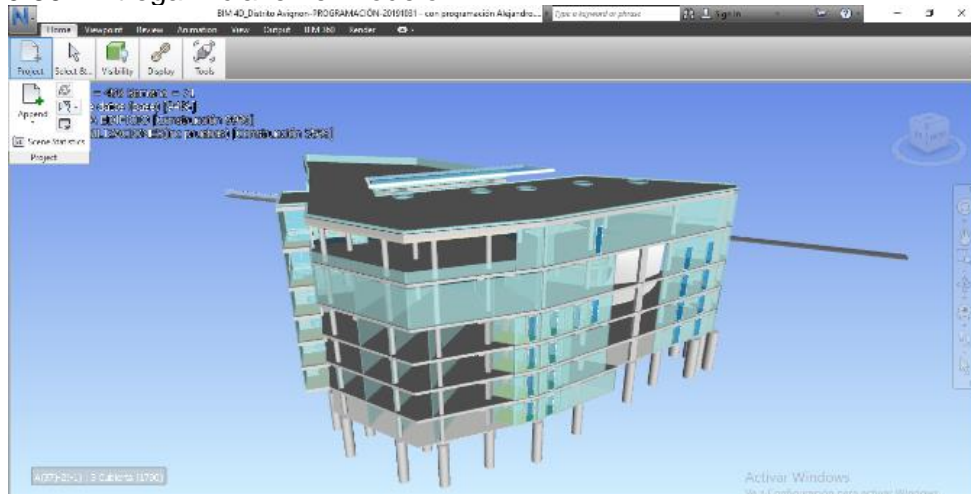
Fuente: Elaboración propia (2019).

- 54 Desarrollo de un modelo basado en una herramienta integradora 4D-PS que permita la planificación de construcción de edificaciones civiles en condiciones de incertidumbre.

La incidencia sobre la ejecución de la obra blanca de las variables generadoras de incertidumbre analizadas, no es significativo, esto se aprecia en que tan solo se asocian 3 días de retraso a este capítulo de la obra; acumulando en total 93 días adicionales a la programación inicial y teniendo como fecha de entrega de la obra blanca bajo condiciones óptimas el 23 de febrero de 2021 pero como fecha pronosticada el 2 de mayo de 2021.

En cuanto a la entrega, es la parte final del proyecto en el cual se hace ejecutan detalles de puesta a punto, aseo y se prueban los equipos y sistemas para entrega final al cliente, se consideró importante separarlo por su impacto en el tiempo final del proyecto. La Figura 6-30 y la Figura 6-31 se muestra la comparación del modelo 4D para la entrega del proyecto.

Figura 6-30. Entrega inicial en el modelo 4D



Fuente: Elaboración propia (2019).

Figura 6-31. Entrega en el modelo 4D con incertidumbre



Fuente: Elaboración propia (2019).

En este último capítulo de la obra, se encuentra que la fecha de terminación del proyecto bajo condiciones óptimas era el 14 de abril de 2021; sin embargo, debido a las variables de incertidumbre que incidieron en la ejecución de la obra según el modelo de pronósticos, esta fecha de terminación se desplazó al 9 de agosto de 2021 acumulando 115 días de retraso.

Como se puede observar; se logró integrar el impacto de variables externas como lo son el IPC y la variación del dólar en el costo estimado del proyecto, al igual que el impacto de las condiciones climáticas en la duración de cada uno de los capítulos del proyecto, estimando cerca de 115 días que no pudieron laborarse dadas estas condiciones.

El capítulo 6, muestra entonces el desarrollo de dos modelos de pronóstico que pretenden identificar el impacto que tendrán las variables externas: IPC, TRM y precipitación en la duración y costos del proyecto; el primer modelo incorpora las variables IPC y TRM en el costo final del proyecto a través de una regresión lineal; mientras que dadas las características de la variable precipitación, fue necesario construir una serie de tiempo para evaluar el impacto de la misma sobre la duración de los proyectos.

Para analizar el comportamiento de estos modelos e integrarlos con la programación de la obra y el modelo 4D, se usa el caso de estudio del Mall Intermedia Plaza, identificando que el presupuesto inicial al incorporar las variables generadoras de incertidumbre aumenta de \$13.906'343.500 a \$14.476'838.300; mientras que la fecha de finalización de la obra se desplaza del 14 de abril de 2021 al 9 de agosto de 2021. El impacto en la planeación se ve reflejado en el modelo 4D a través de la comparación del avance de la obra esperado al final de cada capítulo de construcción versus el estado de avance para esa misma fecha previsto con incertidumbre; integrando así el modelo desarrollado.

Los valores de incremento en costo y fecha de finalización, evidencian la necesidad de que las empresas del sector incorporen variables de incertidumbre en los procesos de planeación de obras civiles, ya que son precisamente esos márgenes de tiempo y costo los que impactan de forma significativa en las utilidades percibidas por las empresas y también, en el cumplimiento y reputación percibidas por el medio.

7 Conclusiones

En primera instancia se debe resaltar que tanto el objetivo general como los objetivos específicos se cumplieron a cabalidad de acuerdo a los seis (6) capítulos anteriores. Así mismo es importante destacar que un trabajo de maestría de esta índole presenta dificultades para cumplir con los objetivos; entre esas dificultades se encuentra la falta de métrica en muchos parámetros de medición de las entidades gubernamentales en Colombia. Por lo anterior, se podría decir que, en buena medida el éxito de terminación en un proyecto de construcción civil radica en la calidad de la información tanto oficial como no gubernamental.

Se debe resaltar el objetivo principal de este trabajo de proponer un modelo que permite la planeación de un proyecto de construcción de edificaciones, utilizando herramientas integradoras 4D-PS; cuyo cumplimiento se facilita siempre y cuando sea adecuado el desempeño de los pronósticos de tiempos de finalización y costo de obra en condiciones reales de incertidumbre en Colombia.

En cuanto a la caracterización de las variables y los parámetros que intervienen en los procesos de construcción de edificaciones civiles; se encontró a través de un análisis sistemático de literatura y de la reunión con expertos, que no solo se deben contemplar las variables tradicionales, sino también las generadoras de incertidumbre como lo son las fluctuaciones en indicadores económicos, condiciones sociales, variables climáticas, entre otros.

Con el proyecto MALL INTERMEDIA PLAZA, se logró desarrollar una programación de línea de base y el presupuesto y modelarlo en 3D en Revit; esta información se simuló en la interfaz propuesta y bajo los dos modelos estadísticos construidos para pronosticar el impacto en tiempo y costo del proyecto obteniendo que si bien la fecha de finalización propuesta es de 26 de marzo de 2021; según el modelo propuesto se tendrán 115 días de

retraso derivados de una precipitación promedio durante la ejecución de la obra de 14.8 mm llevando a una finalización el 15 de agosto de 2021; en cuanto al costo total; se había presupuestado una ejecución de 13.909.343.500; sin embargo, el modelo arroja una ejecución esperada de 14.576.938.300.

En cuanto a la caracterización de las herramientas de software que facilitan modelizar la incertidumbre y el riesgo; no se encuentran software comerciales que permitan integrar la planeación del proyecto y la visualización en 3D del avance del mismo, en función del impacto generado de las variables de incertidumbre; se encuentran esfuerzos aislados por integrar cambios de la programación con la visualización como lo hace navisworks; pero requiere que se hagan esfuerzos individuales en estimar los cambios derivados de la incertidumbre.

Es importante resaltar que la construcción del modelo presentó dificultades relacionadas con la identificación de las variables de impacto a través del análisis de la literatura; ya que estas se modificaban en función del área geográfica en que se desarrollaba cada estudio, es por esto que fue necesario acudir al grupo de expertos para analizar las variables de impacto en el contexto local. Una vez identificadas estas variables, la obtención, análisis y uso de la información representó un reto dada la necesidad de un modelo de pronóstico que permitiera identificar patrones e impacto de las variables de análisis.

Finalmente, es posible concluir que en los proyectos de construcción se requieren la incorporación de herramientas de gestión que permitan reducir la incertidumbre generada por factores externos. En Colombia y en general en el mundo, los sobre costos en los presupuestos y los incumplimientos en la entrega oportuna son un desafío para la industria de la construcción. Esto nos lleva a pensar en un nuevo modelo de planeación que permita reconstruir la misma forma de gestionar los proyectos; donde los detalles asociados al impacto de condiciones externas se incorporen, permitiendo así la toma de decisiones oportunas y un pronóstico de finalización del proyecto más exacto y cercano a las metas presupuestadas como se propuso en este trabajo de maestría.

8 Referencias

- Adams, K. T., Osmani, M., Thorpe, T., & Thornback, J. (2017). Circular economy in construction: Current awareness, challenges and enablers. *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Waste and Resource Management*, 170(1), 15–24. <https://doi.org/10.1680/jwarm.16.00011>
- Akinci, B., Staub-French, S., & Fischer, M. A. (1997). *PRODUCTIVITY AND COST ANALYSIS BASED ON A 4D MODEL Automated Imagery Data Collection and Analysis for Efficient and Effective Underwater Inspection of Canals View project Information Quality (IQ) of Building Information Modeling (BIM) View project*. Retrieved from <http://itc.scix.net/>
- Al-Hazim, N., Salem, Z. A., & Ahmad, H. (2017). Delay and Cost Overrun in Infrastructure Projects in Jordan. *Procedia Engineering*, 182, 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.105>
- Alsafouri, S., & Ayer, S. K. (2018). Review of ICT Implementations for Facilitating Information Flow between Virtual Models and Construction Project Sites. *Automation in Construction*, 86, 176–189. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.10.005>
- Aziz, R. F., & Abdel-Hakam, A. A. (2016). Exploring delay causes of road construction projects in Egypt. *Alexandria Engineering Journal*, 55(2), 1515–1539. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.03.006>
- Baldwin, A., Li, H., Huang, T., Kong, C. W., Guo, H. L., Chan, N., & Wong, J. (2009). Supporting pre-tender construction planning with virtual prototyping. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 16(2), 150–161. <https://doi.org/10.1108/09699980910938028>
- Balouka, N., & Cohen, I. (2019). A Robust Optimization Approach for the Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem. *European Journal of Operational Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.09.052>
- Brucker, P., Drexl, A., Möhring, R., Neumann, K., & Pesch, E. (1999). Resource-constrained project scheduling: Notation, classification, models, and methods. *European Journal of Operational Research*, 112(1), 3–41. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00204-5](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00204-5)
- Cherkaoui, K., Pellerin, R., Baptiste, P., & Hait, A. (2015). A Time Driven RCCP Model with Two Levels of Planning and a Reactive Planning Approach for Tactical Project Planning. *Procedia Computer Science*, 64, 257–264. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.08.488>

- DANE. (2019). Índice de Precios al Consumidor (IPC). Retrieved November 29, 2019, from <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/precios-y-costos/indice-de-precios-al-consumidor-ipc>
- De Soto, B. G., Rosarius, A., Rieger, J., Chen, Q., & Adey, B. T. (2017). Using a Tabu-search Algorithm and 4D Models to Improve Construction Project Schedules. *Procedia Engineering*, 196, 698–705. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.236>
- Gebrehiwet, T., & Luo, H. (2017). Analysis of Delay Impact on Construction Project Based on RII and Correlation Coefficient: Empirical Study. *Procedia Engineering*, 196(June), 366–374. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.212>
- González, V., Alarcón, L. F., & Molenaar, K. (2009). Multiobjective design of Work-In-Process buffer for scheduling repetitive building projects. *Automation in Construction*, 18(2), 95–108. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.05.005>
- Guido, J., & Clements, J. (2012). *Administración Exitosa de Proyectos - Jack Gido, Jim*. Retrieved November 2, 2019, from Clemson University website: https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=MSKGVyXE9RwC&oi=fnd&pg=PR7&dq=Administración+exitosa+de+proyectos&ots=cESN3c-MM-&sig=IltkesaDeONcGTTpxPhkkirs3w0&redir_esc=y#v=onepage&q=Administración+exitosa+de+proyectos&f=false
- Hans, E. W., Herroelen, W., Leus, R., & Wullink, G. (2007). A hierarchical approach to multi-project planning under uncertainty. *Omega*, 35(5), 563–577. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2005.10.004>
- Hazır, Ö., & Ulusoy, G. (2019). A classification and review of approaches and methods for modeling uncertainty in projects. *International Journal of Production Economics*. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107522>
- Hossen, M. M., Kang, S., & Kim, J. (2015). Construction schedule delay risk assessment by using combined AHP-RII methodology for an international NPP project. *Nuclear Engineering and Technology*, 47(3), 362–379. <https://doi.org/10.1016/j.net.2014.12.019>
- Hu, X., Cui, N., Demeulemeester, E., & Bie, L. (2016). Incorporation of activity sensitivity measures into buffer management to manage project schedule risk. *European Journal of Operational Research*, 249(2), 717–727. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.08.066>
- Hurtado-Montoya, A. F., & Mesa-Sánchez, Ó. J. (2015). Cambio climático y variabilidad espacio – temporal de la precipitación en Colombia. *Revista EIA*, 12(24), 131–150. <https://doi.org/10.14508/reia.2015.12.24.131-150>
- Jaafari, A. (2001). Management of risks, uncertainties and opportunities on projects: Time for a fundamental shift. *International Journal of Project Management*, 19(2), 89–101. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(99\)00047-2](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(99)00047-2)
- Kanagasabapathi, B., & Ananthanarayanan, K. (2004). Implementation of 4D Visualization as a planning tool in the Indian AEC Industry. *Journal of Institution of Engineers*, 85(2), 35–40.

- Karabulut, M. (2017). Application of Monte Carlo simulation and PERT/CPM techniques in planning of construction projects: A Case Study. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 5(3), 408–420. <https://doi.org/10.21533/pen.v5i3.152>
- Keshk, A. M., Maarouf, I., & Annany, Y. (2018). Special studies in management of construction project risks, risk concept, plan building, risk quantitative and qualitative analysis, risk response strategies. *Alexandria Engineering Journal*, 57(4), 3179–3187. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.12.003>
- Koo, B., & Fischer, M. (2000). Feasibility Study of 4D CAD in Commercial Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 126(4), 251–260. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2000\)126:4\(251\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2000)126:4(251))
- Ku, K., & Taiebat, M. (2011). BIM experiences and expectations: The constructors' perspective. *International Journal of Construction Education and Research*, 7(3), 175–197. <https://doi.org/10.1080/15578771.2010.544155>
- Laufer, A. (1991). Construction planning in uncertain environments. *International Journal of Project Management*, 9(1), 53–60. [https://doi.org/10.1016/0263-7863\(91\)90057-3](https://doi.org/10.1016/0263-7863(91)90057-3)
- Li, H., Chan, N., Huang, T., Guo, H. L., Lu, W., & Skitmore, M. (2009). Optimizing construction planning schedules by virtual prototyping enabled resource analysis. *Automation in Construction*, 18(7), 912–918. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.04.002>
- Long, L. D., & Ohsato, A. (2008). Fuzzy critical chain method for project scheduling under resource constraints and uncertainty. *International Journal of Project Management*, 26(6), 688–698. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2007.09.012>
- Ma, Z., Demeulemeester, E., He, Z., & Wang, N. (2019). A computational experiment to explore better robustness measures for project scheduling under two types of uncertain environments. *Computers and Industrial Engineering*, 131, 382–390. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.04.014>
- McKinney, K., & Fischer, M. (1998). Generating, evaluating and visualizing construction schedules with CAD tools. *Automation in Construction*, 7(6), 433–447. [https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(98\)00053-3](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(98)00053-3)
- Migilinskas, D., Tamosaitiene, J., & Kazimieras, E. (2007). UNCERTAINTY ANALYSIS IN CONSTRUCTION PROJECT'S APPRAISAL PHASE. Retrieved October 19, 2019, from Conference papaer website: https://www.researchgate.net/publication/278672435 UNCERTAINTY_ANALYSIS_IN_CONSTRUCTION_PROJECT'S_APPRAISAL_PHASE
- Monroy, E. R., & Barón, C. (2018). La Fiducia mercantil inmobiliaria en el sector de la construcción en Colombia | Revista Ingeniería De Obras Civiles. Retrieved October 18, 2019, from Revista Ingeniería de obras civiles website: <http://revistas.ufro.cl/ojs/index.php/rioc/article/view/2002>
- Mukuka, M., Aigbavboa, C., & Thwala, W. (2015). Effects of Construction Projects Schedule Overruns: A Case of the Gauteng Province, South Africa. *Procedia Manufacturing*, 3(Ahfe), 1690–1695. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.989>

- Niazi, G. A., & Painting, N. (2017). Significant Factors Causing Cost Overruns in the Construction Industry in Afghanistan. *Procedia Engineering*, 182, 510–517. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.145>
- Pardo, J. L. R., & Abella, D. G. (2013). La inflación en Colombia. *APUNTES DEL CENES*, 31(53), 201. <https://doi.org/10.19053/22565779.9>
- Paz, J. C., Rozenboim, D., Cuadros, Á., Cano, S., & Escobar, J. W. (2018). A simulation-based scheduling methodology for construction projects considering the potential impacts of delay risks. *Construction Economics and Building*, 18(2), 41–69. <https://doi.org/10.5130/AJCEB.v18i2.5842>
- Perminova, O., Gustafsson, M., & Wikström, K. (2008). Defining uncertainty in projects - a new perspective. *International Journal of Project Management*, 26(1), 73–79. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2007.08.005>
- Sánchez Chamba, L. G. (2018). *Administración del proceso constructivo con el método PERT CPM, caso de aplicación Unidad educativa José Anselmo García Cajamarca de la ciudad de Huaquillas provincia del Oro*.
- Sanderson, J. (2012). Risk, uncertainty and governance in megaprojects: A critical discussion of alternative explanations. *International Journal of Project Management*, 30(4), 432–443. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2011.11.002>
- Taylor, J. E., & Levitt, R. (2005). *CIFECENTER FOR INTEGRATED FACILITY ENGINEERING Modeling Systemic Innovation in Design and Construction Networks*.
- Tecano, M. (2010). *Volatilidad de la tasa de cambio peso dólar: estimación de un indicador para la gestión del riesgo y la planeación de estrategias de inversión*. Universidad Nacional de Colombia.
- Trebbe, M., Hartmann, T., & Dorée, A. (2015). 4D CAD models to support the coordination of construction activities between contractors. *Automation in Construction*, 49(PA), 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.10.002>
- Varajão, J., Colomo-Palacios, R., & Silva, H. (2017). ISO 21500:2012 and PMBoK 5 processes in information systems project management. *Computer Standards and Interfaces*, 50, 216–222. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2016.09.007>
- Waly, A. F., & Thabet, W. Y. (2003). A Virtual Construction Environment for preconstruction planning. *Automation in Construction*, 12(2), 139–154. [https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(02\)00047-X](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(02)00047-X)
- Wang, H. J., Zhang, J. P., Chau, K. W., & Anson, M. (2004). 4D dynamic management for construction planning and resource utilization. *Automation in Construction*, 13(5 SPEC. ISS.), 575–589. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2004.04.003>
- Xu, X., Wang, J., Li, C. Z., Huang, W., & Xia, N. (2018). Schedule risk analysis of infrastructure projects: A hybrid dynamic approach. *Automation in Construction*, 95, 20–34. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.07.026>
- Yan, H., Gao, C., Elzarka, H., Mostafa, K., & Tang, W. (2019). Risk assessment for

-
- construction of urban rail transit projects. *Safety Science*, 118, 583–594.
<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.05.042>
- Yang, J. Bin, & Kao, C. K. (2012). Critical path effect based delay analysis method for construction projects. *International Journal of Project Management*, 30(3), 385–397.
<https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2011.06.003>

9 ANEXO A: Análisis de variables por expertos

Como se explica en el apartado 6.1; con el ánimo de identificar las variables que más afectaciones tienen sobre los proyectos de construcción; se invitó a un grupo de 4 expertos para que analizaran y cuantificaran el nivel de impacto asociado a las 11 variables que se aprecian en las columnas de las matrices de impacto sobre los hitos del proyecto que se ubican en las filas de la misma matriz. Los resultados se presentan a continuación.

Experto 1

	Lluvia	Fluctuación del dólar	Paros Nacionales	Año de elecciones	Inflación	Incremento en combustibles	Disponibilidad de materiales	Financiación del proyecto	Reprocesos por defectos	Cambios de diseños en el desarrollo del proyecto	Motivación del personal
EXCAVACIONES Y MUROS DE CONTENCIÓN	4	4	3	2	4	2	2	4	2	3	3
FUNDACIONES Y MUROS DE CONTENCIÓN	4	4	3	2	4	2	3	4	4	4	3
ESTRUCTURA	4	4	3	2	4	2	3	4	4	4	3
MAMPOSTERIA	4	3	2	2	4	2	3	4	4	4	3
INSTALACIONES TÉCNICAS	2	4	3	2	4	2	3	4	4	4	3
ACABADOS	3	4	3	2	4	2	3	4	4	4	3
OBRAS PROVISIONALES	3	3	2	2	4	2	2	4	2	3	3
OBRAS DE URBANISMO	4	2	2	2	4	2	2	4	3	3	3

Experto 2

	Lluvia	Fluctuación del dólar	Paros Nacionales	Año de elecciones	Inflación	Incremento en combustibles	Disponibilidad de materiales	Financiación del proyecto	Reprocesos por defectos	Cambios de diseños en el desarrollo del proyecto	Motivación del personal
EXCAVACIONES Y LLENOS	4	4	2	2	4	2	2	4	2	2	3
FUNDACIONES Y MUROS DE CONTENCIÓN	4	4	3	2	4	2	3	4	3	4	3
ESTRUCTURA	4	4	3	2	4	2	3	4	4	5	3
MAMPOSTERIA	2	3	2	2	4	2	3	4	4	4	2
INSTALACIONES TÉCNICAS	2	4	3	1	4	1	3	4	4	4	2
ACABADOS	2	4	3	1	4	1	2	4	4	4	2
OBRAS PROVISIONALES	3	3	2	1	3	1	2	4	1	3	2
OBRAS DE URBANISMO	3	2	4	1	4	1	2	4	3	3	2

Experto 3

	Lluvia	Fluctuación del dólar	Paros Nacionales	Año de elecciones	Inflación	Incremento en combustibles	Disponibilidad de materiales	Financiación del proyecto	Reprocesos por defectos	Cambios de diseños en el desarrollo del proyecto	Motivación del personal
EXCAVACIONES Y LLENOS	5	4	2	1	4	2	2	5	2	2	2
FUNDACIONES Y MUROS DE CONTENCIÓN	5	5	3	1	4	2	3	5	4	4	2
ESTRUCTURA	4	4	3	3	4	2	3	5	4	5	2
MAMPOSTERIA	3	3	2	1	4	2	3	5	4	4	2
INSTALACIONES TÉCNICAS	1	4	3	1	4	1	3	4	4	4	2
ACABADOS	2	4	3	1	4	1	2	4	4	4	2
OBRAS PROVISIONALES	3	3	2	1	3	1	2	4	1	3	2
OBRAS DE URBANISMO	3	2	2	1	4	1	2	4	3	3	2

Experto 4

	Lluvia	Fluctuación del dólar	Paros Nacionales	Año de elecciones	Inflación	Incremento en combustibles	Disponibilidad de materiales	Financiación del proyecto	Reprocesos por defectos	Cambios de diseños en el desarrollo del proyecto	Motivación del personal
EXCAVACIONES Y LLENOS	5	4	2	2	4	2	2	4	2	2	3
FUNDACIONES Y MUROS DE CONTENCIÓN	4	5	3	2	5	2	3	4	4	4	3
ESTRUCTURA	4	4	3	2	4	2	3	4	4	5	3
MAMPOSTERÍA	3	3	2	2	4	2	3	4	4	4	3
INSTALACIONES TÉCNICAS	2	4	3	2	5	1	3	4	4	4	3
ACABADOS	3	4	3	2	4	1	2	4	4	4	3
OBRAS PROVISIONALES	3	3	2	2	4	1	2	4	1	3	3
OBRAS DE URBANISMO	4	2	2	2	4	1	2	4	3	3	3

10 ANEXO B: Herramientas gráficas para la gestión de proyectos

Con el ánimo de conocer el alcance de algunos aplicativos de software y prototipos comerciales, este anexo presenta las características de algunos de las herramientas más usadas en el sector. La Tabla 10-1 presenta el alcance de los software comerciales. :

Tabla 10-1. Alcance de software comerciales para la elaboración de modelos virtuales.

Prototipo / Software	3 D	Programación	Costo	Recursos	Constructabilidad	Toma de decisiones Automáticas	Detección de Errores	Análisis de incertidumbre (*)	Paquete Comercial
Simuladores 3D	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	REVIT
Simuladores 4D	SI	SI	NO	NO	SI	NO	NO	NO	SYNCHRO
Simuladores 5D	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	VICO
Sistemas VP	SI	SI	NO	SI	SI	NO	NO	NO	CVP

Fuente: Taiebat, (2009).

En la Tabla 10-2 se muestran las principales características de las herramientas comerciales disponibles en la actualidad para la modelación de proyectos en cualquier dimensión.

Tabla 10-2. Software para la representación visual de proyectos.

NOMBRE COMERCIAL	PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS
REVIT	<ul style="list-style-type: none"> Modelado de información para la construcción (BIM) Integración entre diseño y construcción Inclusión Revit e integración Arquitectura, MEP y estructura.
SYNCHRO	<ul style="list-style-type: none"> Plataforma tecnológica para la inclusión de manufactura esbelta

	<ul style="list-style-type: none"> • Plataforma 4D BIM y de diseño virtual y construcción VDC • Interfaz intuitiva
VICO	<ul style="list-style-type: none"> • Integra estimación de la construcción, programación y gestión del diseño • Control de documentos Vicio Office • Revisión automática de modelos
IFC	<ul style="list-style-type: none"> • Permite el intercambio de modelos de información sin pérdida de datos • Uso de Open BIM • Codifica en tres formatos diferentes lo que puede aumentar complejidad
ASSEMBLE	<ul style="list-style-type: none"> • Acceso para los equipos del proyecto • Usa una estimación conceptual con base en los datos de costos ordinarios • Permite sincronizar la información bajo modelo Revit • Fácil importación desde Excel

Fuente: Elaboración propia, (2019).

Igualmente, se hace necesario caracterizar los software la programación de proyectos; los más usados se presentan en la Tabla 10-3.

Tabla 10-3. Software para la programación de proyectos,

NOMBRE COMERCIAL	PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS
PRIMAVERA	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de bases de datos SQL • Alta penetración en el mercado • Registro ilimitado de líneas de base • Calculo de la duración real y el cambio en el % de duración.
ASTA POWER PROJECT	<ul style="list-style-type: none"> • Puede abrir un solo archivo de proyecto localmente o desde un servidor. • Varios usuarios pueden abrir un archivo de proyecto. • Se pueden mantener múltiples proyectos en un solo archivo de Proyecto. • Se pueden mantener varios proyectos en una base de datos Oracle o Microsoft SQL. • No muchas personas saben manejarlo
PROJECT	<ul style="list-style-type: none"> • Paquete más usado

	<ul style="list-style-type: none">• Cuenta con plantilla en blanco que permite incorporar limitaciones y precedencias• Intuitivo• Uso en cualquier equipo de cómputo
--	--

Fuente: Elaboración propia, (2019).

11 NEXO C: Programación inicial, presupuesto inicial, fechas programación inicial vs programación con incertidumbre

En este anexo, se presenta la programación inicial en diagrama de Gantt, seguida del presupuesto inicial y finalmente; la comparación de las fechas iniciales con las arrojadas por el modelo.

Programación inicial de la obra



Presupuesto inicial del proyecto

PRESUPUESTO INICIAL PROYECTO

		DESCRIPCIÓN	U N	CANTIDA D	VALOR	TOTAL	%
EXCAVACIONES Y LLENOS						315,656,892.91	2.70
1	EXCAVACIONES					288,443,194.85	2.47
	1010244	CARGUE Y BOTADA DE TIERRA PALEROS	M3	541.50	43,250.01	23,419,878.68	.20
	1011267	CORTE CARGUE Y BOTADA DE TIERRA A MAQUINA	M3	4,869.94	36,312.64	176,840,389.73	1.52
	1010193	CORTE CARGUE Y DISPOSICION INTERNA TIERRA	M3	112.39	16,258.67	1,827,312.19	.02
	1011246	EXCAVACION CAMPANA PILAS	M3	31.39	89,916.34	2,822,473.99	.02
	1010416	EXCAVACION DESAGUES Y FILTROS SOTANO	ML	322.86	18,025.52	5,819,719.39	.05
	1010011	EXCAVACION FOSO DE ASCENSOR	M3	12.45	38,900.86	484,315.73	.00
	1011247	EXCAVACION MANUAL VIGAS DE CIMENTACION	ML	433.46	9,111.52	3,949,479.46	.03
	1011243	EXCAVACION PILAS FUNDACION	M3	240.14	140,527.23	33,746,209.42	.29
	1011274	EXCAVACION TIERRA 0-2 M MANUAL	M3	100.00	32,322.40	3,232,240.40	.03
	1010261	INVERNADERO SOBRE EDIFICIO	M2	1,399.80	21,867.00	30,609,426.60	.26
	1010007	TRANSPORTE INTERNO DE TIERRA	M3	270.74	21,022.93	5,691,749.26	.05
2	LLENOS					27,213,698.06	.23
	1020088	ENTRESUELO	M2	1,399.80	14,406.09	20,165,651.45	.17
	1020135	LLENOS A MANO CON MATERIAL DE EXCAVACION	M3	123.85	37,903.05	4,694,292.99	.04
	1020328	LLENOS A MANO CON MATERIAL DE PRESTAMO	M3	27.73	74,908.07	2,077,200.73	.02
	1020246	LLENOS FILTROS Y BRECHAS	ML	12.91	21,421.60	276,552.89	.00
FUNDACIONES Y MUROS DE CONTENCIÓN						1,784,595,802.22	15.29
1	FUNDACIONES					211,064,030.09	1.81
	2010115	ANILLO PARA PILAS	M2	546.00	46,520.86	25,400,389.18	.22
	2010697	CABEZOTES PARA PILAS	M3	44.11	607,184.69	26,782,916.50	.23
	2010617	COLUMNETAS DE FUNDACIONES	ML	17.50	239,537.73	4,191,910.34	.04
	2011120	CONCRETO CAMPANA	M3	63.20	454,501.14	28,724,472.17	.25
	2010210	CONCRETO PILAS	M3	107.10	446,651.99	47,836,427.70	.41

	2010615	CORRECCION FUNDACIONES	GL	.00	.00	.00	.00
	2010662	DESCABECE DE PILAS	UN	26.00	90,879.13	2,362,857.33	.02
	2010644	PROTECCION TALUD	M2	152.47	58,258.20	8,882,627.75	.08
	2011200	SOLADO FUNDACIONES	M2	307.50	21,885.29	6,729,726.97	.06
	2010891	VIGAS FUNDACION	ML	433.46	138,773.36	60,152,702.14	.52
	2	MUROS DE CONTENCIÓN				26,326,753.80	.23
	2020615	MUROS DE CONTENCIÓN EN CONCRETO 15 CM	M2	190.62	138,111.18	26,326,753.80	.23
	4	MURO DE CONTENCIÓN EN PILAS Y/O ANCLADOS				1,547,205,018.33	13.26
	2040001	ACERO DE REFUERZO 60000 FIGURADO (MURO PILAS)	KG	110,608.00	3,620.64	400,471,317.75	3.43
	2040056	ALQUILER COMPRESORES CON MARTILLOS	GL	1.00	82,000,000.00	82,000,000.00	.70
	2040057	ANCLAJES MURO	UN	1.00	30,000,000.00	30,000,000.00	.26
	2040051	CABEZOTE PILA	M3	27.79	599,184.69	16,651,342.42	.14
	2040045	CARGUE Y BOTADA DE TIERRA PALEROS (MURO PILAS)	M3	1,759.00	43,250.01	76,076,761.96	.65
	2040003	CONCRETO ANILLO PARA PILAS (MURO PILAS)	M2	3,386.00	43,725.69	148,055,175.63	1.27
	2040054	CONCRETO CAMPANA	M3	13.78	459,851.14	6,336,748.74	.05
	2040363	CONCRETO MURO DE CONTENCIÓN ENTRE PILAS (MURO PILAS)	M2	.00	92,092.00	.00	.00
	2040022	CONCRETO PILAS (MURO PILAS)	M3	1,137.00	459,843.04	522,841,531.93	4.48
	2040031	CORRECCION MURO PILAS	GL	1.00	2,919,000.00	2,919,000.00	.03
	2040049	EXCAVACIÓN CAMPANA PILA	M3	13.78	87,635.84	1,207,621.90	.01
	2040366	EXCAVACION MURO DE CONTENCIÓN ENTRE PILAS (MURO PILAS)	M3	107.00	31,861.83	3,409,215.81	.03
	2040007	EXCAVACION PILAS (MURO PILAS)	M3	1,517.00	96,698.19	146,691,147.40	1.26
	2040364	IMPERMEABILIZACION MURO ENTRE PILAS (MURO PILAS)	M2	.00	11,031.86	.00	.00
	2040052	INCLINOMETRO	UN	1.00	16,828,000.00	16,828,000.00	.14
	2040050	MURO DE CONCRETO ESP 15	M2	356.00	117,340.00	41,773,040.00	.36
	2040020	MUROS DE CONTENCIÓN EN PILAS	M2	.00	1,201,200.00	.00	.00
	2040053	REPROCESO PILAS MURO	GL	1.00	9,205,000.00	9,205,000.00	.08

	2040037	SOLADO (MURO PILAS)	M2	86.28	21,886.41	1,888,359.83	.02
	2040011	TRANSPORTE INTERNO DE TIERRA (MURO PILAS)	M3	.00	21,022.93	.00	.00
	2040365	VIGA CABEZAL (MURO PILAS)	ML	77.00	341,601.08	26,303,283.14	.23
	2040030	VOLADURA EN ROCA (MURO PILAS)	PL	45,897.00	316.96	14,547,471.81	.12
ESTRUCTURA						1,816,742,112.37	15.57
1	ESTRUCTURA					1,616,322,282.59	13.85
	3011730	COLUMNAS	ML	647.15	281,088.61	181,906,492.15	1.56
	3011535	CONCRETO FOSO DE ASCENSOR	M3	4.01	1,149,944.43	4,611,277.18	.04
	3011501	CONCRETO VIGAS AEREAS	ML	127.34	208,204.53	26,512,764.62	.23
	3010568	ESCALERAS EN CONCRETO	TR	10.00	2,222,582.58	22,225,825.78	.19
	3012229	LOSA ALIGERADA PARQUEADEROS	M2	7,438.00	175,394.60	1,304,585,067.16	11.18
	3012377	PANTALLAS EN CONCRETO	M2	71.45	228,628.95	16,335,538.21	.14
	3010266	PANTALLAS EN CONCRETO TANQUES	M2	324.00	185,633.70	60,145,317.50	.52
2	PISOS Y RAMPAS					200,419,829.78	1.72
	3020027	LOSA MACIZA DE CONTRAPISO 0.20	M2	1,399.80	134,351.20	188,064,803.04	1.61
	3020344	LOSA MACIZA DE TANQUE 0.20	M2	96.00	128,698.20	12,355,026.74	.11
ACERO DE REFUERZO						1,321,971,950.56	11.33
1	ACERO DE REFUERZO EN BARRAS					1,152,444,413.80	9.87
	4010001	ACERO DE REFUERZO 60000 FIGURADO	KG	313,150.00	3,623.15	1,134,590,449.63	9.72
	4010443	ANCLAJES DE ACERO	UN	3,734.00	4,781.46	17,853,964.17	.15
2	MALLAS DE REFUERZO					169,527,536.76	1.45
	4020010	MALLA ELECTROSOLDADA D-84	M2	24,727.68	6,855.78	169,527,536.76	1.45
MAMPOSTERIA						564,234,198.49	4.83
1	MUROS					460,741,672.29	3.95
	5011893	CHAPAS FACHADA	M2	154.51	102,143.55	15,782,199.88	.14
	5011895	MURO BLOQUE	M2	4,141.59	70,544.13	292,164,854.46	2.50
	5010632	MURO DURAPANEL 0.15	M2	.00	100,100.00	.00	.00
	5011198	MURO FACHADA	M2	1,068.13	112,368.57	120,024,241.02	1.03
	5011798	MURO LADRILLO LISO 15X20X40	M2	.00	55,864.88	.00	.00

	5010990	MURO LADRILLO SUCIO 15X20X40	M2	.00	48,288.17	.00	.00
	5011877	MUROS NO ESTRUCTURALES 12	M2	250.25	103,512.00	25,903,878.00	.22
	5011449	REMATES BUITRON	UN	3.00	288,904.37	866,713.10	.01
	5011555	SOBRECIMIENTO EN BLOQUE 15	ML	323.78	18,530.44	5,999,785.83	.05
2	OTROS ELEMENTOS DE MAMPOSTERIA					103,492,526.19	.89
	5020282	CUELGAS	ML	294.49	33,195.03	9,775,605.78	.08
	5020567	DINTELES	ML	51.50	22,269.12	1,146,859.67	.01
	5020283	DOVELAS EN CONCRETO	ML	3,456.40	6,420.06	22,190,297.30	.19
	5020215	JUNTAS MAMPOSTERIA SISMOFLEX	ML	3,125.83	7,657.65	23,936,512.10	.21
	5020154	LAGRIMALES	ML	360.27	36,071.33	12,995,418.31	.11
	5020248	MARCAACION MAMPOSTERIA GENERAL	ML	1,903.87	3,803.80	7,241,940.71	.06
	5020486	QUICIOS ASCENSOR	UN	14.00	278,069.45	3,892,972.34	.03
	5020255	TALON EN CONCRETO	ML	507.06	11,056.88	5,606,499.72	.05
	5020984	VIGA SILLAR	ML	629.13	26,554.80	16,706,420.28	.14
	IMPERMEABILIZACIONES Y FILTROS					161,845,138.47	1.39
1	IMPERMEB. LOSAS Y MUROS DE CONTENCIÓN					118,742,660.61	1.02
	6010159	IMPERMEABILIZACION ANTIRAIZ	M2	109.32	47,045.00	5,142,959.40	.04
	6010069	IMPERMEABILIZACION FOSO ASCENSOR	M2	26.75	46,303.26	1,238,612.12	.01
	6010195	IMPERMEABILIZACION LOSA TRAFICO VEHICULAR	M2	54.71	85,085.00	4,655,000.35	.04
	6011024	IMPERMEABILIZACION MANTO GRANULADO	M2	1,251.86	50,900.00	63,719,679.37	.55
	6010816	IMPERMEABILIZACION MANTO NEGRO	M2	324.29	41,276.81	13,385,657.58	.11
	6010029	IMPERMEABILIZACION MUROS DE CONTENCIÓN	M2	190.62	18,698.68	3,564,342.38	.03
	6011009	IMPERMEABILIZACION MUROS TANQUE	M2	491.08	55,055.00	27,036,409.40	.23
3	FILTROS, CAÑUELAS Y OTROS					43,102,477.86	.37
	6030351	CAÑUELA EN CONCRETO MURO LIMPIEZA	ML	246.86	37,587.31	9,278,802.51	.08
	6030303	CAÑUELA PERIMETRAL EN CONCRETO	ML	173.17	37,587.31	6,508,993.89	.06
	6030009	FILTRO EN LAMIDREN PARA CONTENCIÓN	M2	190.62	38,850.86	7,405,750.69	.06

	6030362	FILTRO MURO CONTENCION	ML	77.53	89,935.94	6,972,733.27	.06
	6030257	FILTROS EN TRITURADO ESPINA PESCADO	ML	322.86	40,067.51	12,936,197.51	.11
CUBIERTAS Y CIELOFALSOS						142,395,136.94	1.22
1	CUBIERTAS					106,808,639.40	.92
	7010073	CUBIERTA PERGOLA	M2	128.58	620,620.00	79,799,319.60	.68
	7010621	EMBUDO TERRAZA	UN	25.00	77,477.40	1,936,935.00	.02
	7010267	LUCERNARIOS	M2	45.60	549,833.00	25,072,384.80	.21
2	CIELOFALSOS					35,586,497.54	.30
	7020198	CIELO FALSO DRYWALL RH	M2	124.72	55,185.13	6,882,689.41	.06
	7020720	CIELO FALSO LAMINA	M2	359.36	79,874.80	28,703,808.13	.25
INSTALACIONES ELECTRICAS						772,515,744.00	6.62
1	SALIDAS ELECTRICAS					772,515,744.00	6.62
	8010485	INSPECCION RETIE	GL	1.00	5,005,000.00	5,005,000.00	.04
	8010088	INSTALACION ELECTRICA	GL	7,667.44	100,100.00	767,510,744.00	6.58
INSTALACIONES HIDRAULICAS						270,926,582.12	2.32
1	INSTAL.HIDROSANITARIA					248,527,471.12	2.13
	9010992	EQUIPO DE BOMBEO	UN	1.00	20,000,000.00	20,000,000.00	.17
	9010576	REDES HIDROSANITARIAS	GL	7,667.44	23,023.00	176,527,471.12	1.51
	9010392	TANQUE INFERIOR DE RESERVA DE AGUA	M3	80.00	650,000.00	52,000,000.00	.45
2	EQUIPOS ESPECIALES					2,077,386.00	.02
	9020156	GABINETE CONTADOR ACUEDUCTO	PI	6.00	346,231.00	2,077,386.00	.02
3	RED DE GAS					20,321,725.00	.17
	9030005	RED DE GAS	UN	5.00	4,064,345.00	20,321,725.00	.17
PUERTAS Y CERRADURAS						67,697,574.70	.58
1	PUERTAS					66,570,849.10	.57
	1001034 1	PUERTA SUBESTACION Y PLANTA	UN	2.00	3,503,500.00	7,007,000.00	.06
	1001185 6	TOPEPUERTAS	UN	21.00	11,511.50	241,741.50	.00
	1001046 4	VANO CONTADORES	UN	7.00	1,501,500.00	10,510,500.00	.09
	1001183 2	VANO CORTAFUEGO	UN	12.00	1,644,379.80	19,732,557.60	.17
	1001185 4	VANOS MADERA	UN	21.00	650,650.00	13,663,650.00	.12
	1001185 5	VANOS TECNICOS	UN	10.00	1,001,000.00	10,010,000.00	.09
	1001183 3	VANOS TECNICOS DOBLE ALA	UN	4.00	1,351,350.00	5,405,400.00	.05
2	CERRADURAS					1,126,725.60	.01

	1002021 2	CERRADURA VANO MADERA	UN	21.00	53,653.60	1,126,725.60	.01
REVOQUES Y RESANES						134,085,471.72	1.15
1	REVOQUES O PAÑETES					134,085,471.72	1.15
	1101000 5	CORTAGOTERAS VENTANAS Y BALCONES	ML	264.09	9,023.72	2,383,073.39	.02
	1101036 5	LLENO EN VENTANAS	ML	834.12	3,144.22	2,622,658.42	.02
	1101073 0	RESANE CASETONES A LA VISTA	M2	1,769.92	7,933.32	14,041,335.25	.12
	1101000 2	RESANE FOSO ASCENSOR	M2	210.41	3,531.23	743,006.08	.01
	1101058 6	RESANE GENERAL	GL	1.00	32,316,882.83	32,316,882.83	.28
	1101058 5	RESANE MUROS FACHADA	M2	89.67	11,812.35	1,059,213.09	.01
	1101071 9	REVOQUE DE TANQUES	M2	416.02	22,444.05	9,337,173.12	.08
	1101020 9	REVOQUE EN FACHADA	M2	766.28	39,847.24	30,534,146.65	.26
	1101071 8	REVOQUE EN MUROS	M2	2,138.26	17,154.07	36,679,855.88	.31
	1101040 4	SELLO DE VENTANERIA	ML	947.10	4,612.11	4,368,127.01	.04
PISOS ENCHAPES Y ZOCALOS						575,313,572.40	4.93
1	PISOS Y ENCHAPES EN CERAMICA					557,831,293.77	4.78
	1201006 6	CONTRATO ENCHAPE ASCENSOR	UN	6.00	3,003,000.00	18,018,000.00	.15
	1201263 4	ENCHAPE CUARTOS DE ASEO	UN	5.00	90,581.19	452,905.95	.00
	1201266 5	ENCHAPE DE FACHADA ALUCOBOND	M2	301.07	400,381.00	120,542,707.67	1.03
	1201222 0	ENCHAPE DE FACHADA MADERA	M2	82.38	476,476.00	39,252,092.88	.34
	1201266 9	ENCHAPE DE TANQUES	M2	491.08	62,898.73	30,888,306.54	.26
	1201267 2	PISO EN MORTERO ESMALTADO TECNICOS	M2	238.21	30,637.22	7,298,091.49	.06
	1201267 0	PISO PORCELANATO PUNTOS FIJOS	M2	441.66	175,608.88	77,559,416.45	.66
	1201261 0	PISO PORCELANATO WC	M2	124.72	153,597.88	19,156,727.17	.16
	1201267 3	PISO PORCELANATO ZONAS DE COMIDA	M2	1,328.30	175,630.88	233,290,493.42	2.00
	1201267 4	ZOCALO PORCELANATO PUNTOS FIJOS	ML	148.50	24,928.46	3,701,875.71	.03
	1201267 1	ZOCALO PORCELANATO WC	ML	174.69	22,527.26	3,935,286.34	.03
	1201261 4	ZOCALO PORCELANATO ZONAS DE COMIDA	ML	149.83	24,930.86	3,735,390.15	.03
2	OTROS ZOCALOS					9,520,904.48	.08

	1202000 2	ZOCALO EN MEDIA CAÑA ARENA LAVADA	ML	355.62	26,772.69	9,520,904.48	.08
3	OTROS PISOS					7,961,374.14	.07
	1203121 3	PISO EN ARENA LAVADA	M2	39.38	40,917.90	1,611,346.86	.01
	1203000 2	TOPELLANTAS EN CONCRETO	UN	182.00	34,890.26	6,350,027.28	.05
CARPINTERIA						727,172,657.87	6.23
1	CARPINTERIA METALICA					698,037,902.22	5.98
	1301222 2	BANDEJA TECNICA METALICA	M2	72.72	150,150.00	10,918,908.00	.09
	1301171 1	DIVISIONES EN ACERO INOX	M2	45.05	600,600.00	27,057,030.00	.23
	1301065 2	ESCALERA TIPO GATO	UN	1.00	450,450.00	450,450.00	.00
	1301225 6	ESPEJO BAÑOS	UN	15.00	255,455.20	3,831,828.00	.03
	1301224 0	FACHADA EN LAMINA MICROPERFORADA	M2	431.60	420,420.00	181,453,272.00	1.55
	1301225 5	FACHADA EN VIDRIO	M2	354.88	610,607.00	216,692,212.16	1.86
	1301223 8	PASAMANOS METALICO PARALES ESCALERAS	ML	111.91	200,200.00	22,404,382.00	.19
	1301037 7	PASAMANOS METALICO RODAMANOS ESCALERAS	ML	75.10	55,055.00	4,134,630.50	.04
	1301223 9	PASAMANOS VIDRIO ZONAS COMUNES	ML	60.76	647,642.50	39,350,758.30	.34
	1301037 8	VITRINAS	M2	497.62	385,323.00	191,744,431.26	1.64
2	CARPINTERIA MADERA					29,134,755.65	.25
	1302130 9	COCINETA	UN	1.00	2,970,968.00	2,970,968.00	.03
	1302227 8	DETALLE MARCO MADERA Y MALLA	UN	9.00	500,500.00	4,504,500.00	.04
	1302242 1	MESON DE BAÑOS	UN	13.00	1,328,577.25	17,271,504.25	.15
	1302242 0	PARED EN LISTONES DE MADERA	M2	14.14	310,310.00	4,387,783.40	.04
PINTURA Y ENLUCIDOS						143,663,096.16	1.23
1	PINTURAS					143,663,096.16	1.23
	1401001 3	CAL FOSO ASCENSOR	M2	210.41	3,503.50	737,171.44	.01
	1401101 1	CHAMPEADO ACRONAL MUROS Y BORDE DE LOSA	M2	623.96	4,857.53	3,030,903.40	.03
	1401100 2	ESTUCO SOBRE MUROS	M2	2,437.47	8,908.90	21,715,176.48	.19
	1401043 0	LAVADA E HIDROFUGO FACHADA	M2	1,115.66	11,592.54	12,933,333.18	.11

	1401101 2	PINTURA CIELO ESCALERAS	M2	39.90	15,651.00	624,474.90	.01
	1401056 6	PINTURA EXTERIOR KORAZA	M2	766.28	25,865.84	19,820,475.88	.17
	1401001 7	PINTURA NUMEROS PARQUEADEROS	UN	91.00	15,015.00	1,366,365.00	.01
	1401048 3	PINTURA SEÑAL DISCAPACITADOS	UN	4.00	150,150.00	600,600.00	.01
	1401100 3	PINTURA SOBRE CASETONES	M2	1,810.00	15,651.00	28,328,310.00	.24
	1401099 9	PINTURA SOBRE CONCRETO FACHADA	M2	89.67	40,180.14	3,602,953.15	.03
	1401100 0	PINTURA TOPELLANTAS	UN	182.00	3,453.45	628,527.90	.01
	1401067 9	PINTURA TRAFICO DEMARCAACION	ML	547.02	4,704.70	2,573,564.99	.02
	1401004 4	PINTURA TUBERIA SOTANO	ML	2,000.00	4,204.20	8,408,400.00	.07
	1401016 1	PINTURA VINILO MUROS	M2	3,886.05	9,784.78	38,024,124.89	.33
	1401026 7	SEÑALIZACION COLUMNAS PARQUEADEROS	ML	256.05	4,954.95	1,268,714.95	.01
APARATOS SANITARIOS Y ACCESORIOS						36,579,743.20	.31
1	APARATOS SANITARIOS					29,196,367.20	.25
	1501190 2	BARRAS DISCAPACITADOS	UN	4.00	123,123.00	492,492.00	.00
	1501190 1	LAVAESCOBAS PREFABRICADO	UN	6.00	184,384.20	1,106,305.20	.01
	1501030 8	LAVAMANOS	UN	29.00	170,170.00	4,934,930.00	.04
	1501190 3	ORINAL	UN	7.00	632,632.00	4,428,424.00	.04
	1501190 4	SANITARIO	UN	23.00	792,792.00	18,234,216.00	.16
2	MEZCLADORES, GRIFERIAS Y REJILLAS					7,383,376.00	.06
	1502126 8	LLAVE BOCAMANGUERA LAVAESCOBA	UN	6.00	30,230.20	181,381.20	.00
	1502121 5	MEZCLADOR LAVAMANOS	UN	29.00	194,694.50	5,646,140.50	.05
	1502126 9	REJILLA DE PISO 2"	UN	29.00	18,518.50	537,036.50	.00
	1502028 7	REJILLA DE VENTILACION	UN	9.00	14,214.20	127,927.80	.00
	1502097 2	REJILLA GRANADA	UN	25.00	35,635.60	890,890.00	.01
EQUIPOS ESPECIALES						1,949,772,000.0	16.7
1	EQUIPOS ESPECIALES					1,949,772,000.0	16.7
	1601066 0	ASCENSOR EN POSITIVO (13 PERSONAS-6 PARADAS)	UN	2.00	164,690,000.0 0	329,380,000.00	2.82

	16010659	ESCALERAS ELECTRICAS	UN	2.00	230,650,000.00	461,300,000.00	3.95
	16010419	EXTRACCION COCINAS	GL	1.00	50,000,000.00	50,000,000.00	.43
	16010389	PLANTA ELECTRICA	GL	1.00	140,000,000.00	140,000,000.00	1.20
	16010153	RED CONTRA INCENDIO	GL	1.00	769,092,000.00	769,092,000.00	6.59
	16010379	SISTEMA DE CCTV SEGURIDAD AUTOMATIZACION	GL	1.00	200,000,000.00	200,000,000.00	1.71
OBRAS EXTERIORES Y VARIOS						120,623,002.50	1.03
2	VARIOS					120,623,002.50	1.03
	17020467	ASEO	UN	7,667.00	7,507.50	57,560,002.50	.49
	17020500	ASEO DURANTE LA OBRA	ME	20.00	2,402,400.00	48,048,000.00	.41
	17020015	BOTADA DE ESCOMBROS	M3	500.00	30,030.00	15,015,000.00	.13
EQUIPOS Y VARIOS						544,216,080.00	4.66
1	EQUIPOS COMPRA					58,452,400.00	.50
	18010252	EQUIPO COMPRA	GL	1.00	58,452,400.00	58,452,400.00	.50
2	EQUIPOS EN ALQUILER					282,297,600.00	2.42
	18020016	EQUIPO EN ALQUILER	GL	1.00	65,000,000.00	65,000,000.00	.56
	18020322	TORRE GRUA	GL	1.00	217,297,600.00	217,297,600.00	1.86
3	HERRAMIENTA Y OTROS					100,466,080.00	.86
	18030111	HERRAMIENTAS Y OTROS	GL	1.00	100,466,080.00	100,466,080.00	.86
5	INSUMOS SEGURIDAD INDUSTRIAL					103,000,000.00	.88
	18050015	SEGURIDAD INDUSTRIAL	GL	1.00	103,000,000.00	103,000,000.00	.88
OBRAS PROVISIONALES						221,270,400.00	1.90
1	DEMOLICIONES					5,010,000.00	.04
	19010063	DEMOLICIONES EXISTENTES	GL	1.00	5,010,000.00	5,010,000.00	.04
2	OBRAS PROVISIONALES					196,260,400.00	1.68
	19020204	ADECUACION PATIOS Y ACCESOS	M2	20.00	800,000.00	16,000,000.00	.14
	19020001	CAMPAMENTO PROVISIONAL	GL	300.00	300,868.00	90,260,400.00	.77
	19020188	CERRAMIENTO PROVISIONAL	GL	1.00	10,000,000.00	10,000,000.00	.09
	19020007	INSTALACION ELECTRICA PROVISIONAL	GL	1.00	45,000,000.00	45,000,000.00	.39
	19020187	INSTALACION HIDRAULICA PROVISIONAL	GL	1.00	20,000,000.00	20,000,000.00	.17

	1902000 8	ZARAN PROTECCION EDIFICIO	M2	1.00	15,000,000.00	15,000,000.00	.13
6	TOPOGRAFIA					20,000,000.00	.17
	1906000 1	TOPOGRAFIA	DI	50.00	400,000.00	20,000,000.00	.17
REDES AGUAS NEGRAS Y LLUVIAS						30,000,000.00	7.38
1	REDES DE ALCANTARILLADO					30,000,000.00	7.38
	2201023 1	RED AGUAS LLUVIAS	GL	1.00	15,000,000.00	15,000,000.00	3.69
	2201001 7	RED AR	GL	1.00	15,000,000.00	15,000,000.00	3.69
ACUEDUCTO						30,000,000.00	7.38
1	ACUEDUCTO					30,000,000.00	7.38
	2401008 2	RED ACUEDUCTO	GL	1.00	30,000,000.00	30,000,000.00	7.38
VIAS Y ANDENES						199,695,183.67	49.1 4
1	VIAS ANDENES Y CORDONES					199,695,183.67	49.1 4
	2501042 7	ADOQUIN VEHICULAR SOBRE LOSA	M2	390.28	81,880.16	31,956,190.16	7.86
	2501042 6	ANDEN	M2	137.52	110,661.72	15,218,200.19	3.74
	2501033 0	CORDONES EN CONCRETO	ML	152.51	67,866.67	10,350,345.24	2.55
	2501023 8	LOSA AEREA ACCESO	M2	213.34	552,284.60	117,824,395.54	28.99
	2501007 0	VIA SOBRE TERRENO	M2	208.13	116,975.22	24,346,052.54	5.99
REDES						20,000,000.00	4.92
1	REDES ELECTRICAS EXTERIORES					20,000,000.00	4.92
	2601004 4	RED DE ALUMBRADO PUBLICO	GL	1.00	20,000,000.00	20,000,000.00	4.92
OBRAS COMPLEMENTARIAS						116,488,746.97	28.6 6
1	AMOBILIAMIENTO URBANO					116,488,746.97	28.6 6
	2701059 4	CERRAMIENTO ENTREGA LOCALES	M2	711.22	60,060.00	42,715,873.20	10.51
	2701056 3	GRAMA	M2	566.90	14,053.30	7,966,815.77	1.96
	2701058 1	NOMENCLATURA OFICINAS, BODEGAS Y LOCALES	UN	54.00	33,033.00	1,783,782.00	.44
	2701058 0	NOMENCLATURA PROYECTO	GL	1.00	8,008,000.00	8,008,000.00	1.97
	2701011 3	PAISAJISMO	GL	1.00	20,020,000.00	20,020,000.00	4.93
	2701059 7	PASAMANOS METALICO EXTERIOR	ML	91.38	200,200.00	18,294,276.00	4.50
	2701055 0	PUERTA VEHICULAR	UN	1.00	17,700,000.00	17,700,000.00	4.36
PRELIMINARES						10,200,000.00	2.51
1	PRELIMINARES					10,200,000.00	2.51

	2901007 7	TALA Y TRANSPLANTE DE ARBOLES	GL	12.00	850,000.00	10,200,000.00	2.51
GASTOS GENERALES						1,489,133,094.6 0	96.7 5
1	PERSONAL POR ADMON Y NOMINA					1,273,480,094.6 0	82.7 4
	3001046 0	ALMACENISTA	ME	17.00	3,060,000.00	52,020,000.00	3.38
	3001022 2	AUXILIAR ADMINISTRATIVO	ME	17.00	2,384,700.80	40,539,913.60	2.63
	3001046 5	AUXILIAR ALMACENISTA	ME	15.00	1,623,500.00	24,352,500.00	1.58
	3001028 7	AUXILIAR RESIDENTE	ME	10.00	3,400,000.00	34,000,000.00	2.21
	3001019 8	AYUDANTE LLAVERO	ME	7.00	1,740,000.00	12,180,000.00	.79
	3001011 3	AYUDANTES POR ADMON	ME	19.00	6,948,160.00	132,015,040.00	8.58
	3001020 1	COORDINADOR DE OBRA	ME	19.00	4,500,000.00	85,500,000.00	5.56
	3001043 1	DIRECTOR DE OBRA	ME	19.50	10,850,000.00	211,575,000.00	13.75
	3001008 2	HORAS EXTRAS	GL	1.00	50,000,000.00	50,000,000.00	3.25
	3001000 3	MAESTRO PRIMERO	ME	15.50	3,255,000.00	50,452,500.00	3.28
	3001016 4	OFICIALES POR ADMINISTRACION	ME	19.00	7,038,000.00	133,722,000.00	8.69
	3001014 2	OPERADORES VARIOS	ME	28.00	2,335,000.00	65,380,000.00	4.25
	3001079 0	RESIDENTES	ME	17.00	7,482,000.00	127,194,000.00	8.26
	3001038 8	SALUD OCUPACIONAL	ME	16.00	5,060,000.00	80,960,000.00	5.26
	3001037 6	SECRETARIA	ME	13.50	1,884,000.00	25,434,000.00	1.65
	3001013 9	VIGILANCIA	ME	19.00	7,797,639.00	148,155,141.00	9.63
2	GASTOS GENERALES VARIOS					117,213,000.00	7.62
	3002013 4	CAFETERIA	ME	19.00	636,000.00	12,084,000.00	.79
	3002000 9	CAJA MENOR	ME	19.00	1,060,000.00	20,140,000.00	1.31
	3002029 9	COMIDAS POR TRABAJOS NOCTURNOS	GL	1.00	12,000,000.00	12,000,000.00	.78
	3002014 6	DOTACION OFICINA	GL	1.00	9,371,000.00	9,371,000.00	.61
	3002000 1	DOTACION PERSONAL	GL	1.00	8,480,000.00	8,480,000.00	.55
	3002001 0	ENSAYOS DE LABORATORIO	ME	19.00	1,100,000.00	20,900,000.00	1.36
	3002006 1	MANTENIMIENTO DE COMPUTADORES	GL	19.00	1,060,000.00	20,140,000.00	1.31

	3002006 7	PAGO CELULAR OBRA	GL	19.00	212,000.00	4,028,000.00	.26
	3002000 8	PAPELERIA	ME	19.00	530,000.00	10,070,000.00	.65
4	SERVICIOS PÚBLICOS					98,440,000.00	6.40
	3004001 6	INTERNET	ME	19.00	160,000.00	3,040,000.00	.20
	3004000 4	SERVICIOS PUBLICOS	ME	20.00	4,770,000.00	95,400,000.00	6.20
	IMPREVISTOS					30,000,000.00	1.95
1	IMPREVISTOS					30,000,000.00	1.95
	4001000 1	IMPREVISTOS	GL	1.00	30,000,000.00	30,000,000.00	1.95
	MATERIAL DESCUENTO CONTRATISTAS					20,000,000.00	1.30
1	DESCUENTO MATERIAL					20,000,000.00	1.30
	4101082 7	DESCUENTOS AZAEL MENDOZA	GL	1.00	10,000,000.00	10,000,000.00	.65
	4101082 8	HERNANDO SUCERQUIA	GL	1.00	10,000,000.00	10,000,000.00	.65

Comparación de las fechas iniciales y finales del proyecto

Comparación de fechas iniciales y fechas arrojadas por el modelo.						
Task Name	Duración	Comienzo	Fin	Retraso	Inicio con retraso	Fin con retraso
MALL INTERMEDIA PLAZA	576	16/09/2019	14/04/2021	115		
CONTENCION PERIMETRAL	103	21/10/2019	1/02/2020	34,5	21/10/2019	21/04/2020
FUNDACIONES	114	2/12/2019	25/03/2020	34,5	5/01/2020	2/06/2020
ESTRUCTURA	170	7/01/2020	25/06/2020	14,26	10/02/2020	18/09/2020
OBRA NEGRA	155	20/05/2020	22/10/2020	11,5	3/06/2020	16/11/2020
MAMPOSTERIA	57	20/05/2020	16/07/2020	11,5	25/06/2020	28/10/2020
REDES (tubería y caja)	130	29/05/2020	6/10/2020	11,5	9/06/2020	29/10/2020
INSTALACION ELECTRICA	54	29/05/2020	22/07/2020	11,5	9/06/2020	14/08/2020
INSTALACION HIDROSANITARIA(Abasto+Desague+Verticales)	56	29/05/2020	24/07/2020	11,5	9/06/2020	16/08/2020
INST. GAS (Interior)	44	27/06/2020	10/08/2020	11,5	8/07/2020	2/09/2020
RCI en torre	110	18/06/2020	6/10/2020	11,5	29/06/2020	29/10/2020
REVOQUES Y RESANES	50	16/07/2020	4/09/2020	11,5	27/07/2020	27/09/2020
MORTEROS DE PISO (incl pto fijo)	87	27/07/2020	22/10/2020	11,5	7/08/2020	14/11/2020
IMPERMEABILIZACIONES (inc pruebas)	65	20/01/2021	26/03/2021	11,5	28/07/2020	6/11/2020
OBRA BLANCA EDIFICIO	205	5/08/2020	26/02/2021	3,45	27/09/2020	12/03/2021
ENCHAPES	63	5/08/2020	7/10/2020	3,45	8/08/2020	13/10/2020
PASAMANOS	65	13/08/2020	17/10/2020	3,45	6/08/2020	23/10/2020
DRYWALL (E+P+1M)	57	5/08/2020	1/10/2020	3,45	8/08/2020	7/10/2020

ESTUCOS Y FONDEO	58	27/07/2020	23/09/2020	3,45	2/08/2020	26/09/2020
PISOS (PORCELANATO O LAMINADO y TABLETAS)	406	16/09/2019	26/10/2020	3,45	19/09/2019	1/11/2020
PINTURA SEGUNDA	378	25/09/2019	7/10/2020	3,45	28/09/2019	13/10/2020
CARPINTERÍA	427	4/10/2019	4/12/2020	3,45	7/10/2019	10/12/2020
CARPINTERIA METALICA	91	4/09/2020	4/12/2020	3,45	7/09/2020	10/12/2020
MARCO + PUERTAS + CERRADURAS	374	4/10/2019	12/10/2020	3,45	1/10/2020	1/10/2020
MUEBLES WC Y COCINA	47	19/08/2020	5/10/2020	3,45	22/08/2020	11/10/2020
ZÓCALOS	63	15/08/2020	17/10/2020	3,45	18/08/2020	23/10/2020
MESONES	48	28/08/2020	15/10/2020	3,45	31/08/2020	21/10/2020
APARATOS ELÉCTRICOS	47	7/09/2020	24/10/2020	3,45	10/09/2020	30/10/2020
PRIMER ASEO	58	16/09/2020	13/11/2020	3,45	19/09/2020	19/11/2020
DOTACIÓN SANITARIA (GRIF+PORCELA)	58	30/09/2020	27/11/2020	3,45	3/10/2020	3/12/2020
ESPEJOS	50	27/10/2020	16/12/2020	3,45	30/10/2020	22/12/2020
ACABADO FINAL PINTURA	56	15/10/2020	10/12/2020	3,45	18/10/2020	16/12/2020
REDES EXTERNAS	68	25/06/2020	1/09/2020	3,45	28/06/2020	7/09/2020
VIA INTERNA	59	1/09/2020	30/10/2020	3,45	4/09/2020	2/11/2020