

Aplicación de la Teoría de Restricciones para mejorar la eficiencia temporal en proyectos con enfoque predictivo: desarrollo de un modelo conceptual basado en evidencia experimental.



Aplicación de la Teoría de Restricciones para mejorar la eficiencia temporal en proyectos con enfoque predictivo: desarrollo de un modelo conceptual basado en evidencia experimental

Camilo Andrés Serrano Talero

Universidad Ean

Facultad de Ingeniería

Maestría en Gerencia de Proyectos

Bogotá D.C, Colombia

14/09/2026

Aplicación de la Teoría de Restricciones para mejorar la eficiencia temporal en proyectos con enfoque predictivo: desarrollo de un modelo conceptual basado en evidencia experimental.

Aplicación de la Teoría de Restricciones para mejorar la eficiencia temporal en proyectos con enfoque predictivo: desarrollo de un modelo conceptual basado en evidencia experimental

Camilo Andrés Serrano Talero

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Magister en Gerencia de Proyectos

Director:

Nelson Antonio Moreno Monsalve, PhD.

Modalidad:

Monografía

Universidad Ean

Facultad de Ingeniería

Maestría en Gerencia de Proyectos

Bogotá D.C, Colombia

14/09/2026

Aplicación de la Teoría de Restricciones para mejorar la eficiencia temporal en proyectos con enfoque predictivo: desarrollo de un modelo conceptual basado en evidencia experimental.

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

Firma del director del trabajo de grado

Bogotá, 14/09/2026

Aplicación de la Teoría de Restricciones para mejorar la eficiencia temporal en proyectos con enfoque predictivo: desarrollo de un modelo conceptual basado en evidencia experimental.

Dedicatoria

A Dios que me permitió llegar hasta este punto y me da muchas fuerzas, ánimo y fe para cumplir mis metas y objetivos y seguir adelante.

A mi padre que, aunque ya no está con nosotros me enseñó con su ejemplo que la disciplina y la perseverancia son los valores más importantes para lograr las metas y objetivos personales.

A mi madre que con esfuerzo hizo de mí una persona educada, con muchos valores y que me ha acompañado en cada momento de mi crecimiento personal y profesional.

Solo la paciencia infinita produce resultados inmediatos.

Wayne Dyer.

Aplicación de la Teoría de Restricciones para mejorar la eficiencia temporal en proyectos con enfoque predictivo: desarrollo de un modelo conceptual basado en evidencia experimental.

Agradecimientos

Quiero agradecer personalmente a la universidad EAN y especialmente a la facultad de ingeniería quienes me dieron la oportunidad de estudiar la Maestría en Gerencia de Proyectos, así como también al PhD Nelson Antonio Moreno Monsalve, docente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad EAN y director de la tesis, por su paciencia y colaboración en la asesoría y realización de la misma y por todo lo que me enseñó mientras estuve en la universidad, al PhD Miguel Ángel González Curbelo también docente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad EAN cuyos aportes y conocimientos en la materia Seminario de Investigación fueron fundamentales para la formulación de este proyecto de investigación. Finalmente quiero agradecer a todas las demás personas que aportaron su pequeño grano de arena a la realización de este proyecto.

Resumen

La gestión del tiempo sigue siendo uno de los principales desafíos en proyectos con enfoque predictivo ya que, aunque herramientas como CPM y PERT son ampliamente utilizadas, numerosos proyectos de esta naturaleza continúan presentando retrasos, sobrecostos y baja confiabilidad en el cumplimiento de sus cronogramas. Diversos estudios indican que parte del problema se relaciona con la dificultad de estos enfoques tradicionales para gestionar restricciones sistémicas, cuellos de botella y variabilidad operativa. En este contexto, la Teoría de Restricciones (TOC) y su aplicación mediante *Critical Chain Project Management* (CCPM) han mostrado resultados prometedores e innovadores, aunque la evidencia permanece dispersa y no existe un modelo procedimental integrado y validado empíricamente para proyectos predictivos. El propósito de esta investigación es desarrollar y validar un modelo conceptual-procedimental de aplicación de TOC mediante CCPM para mejorar la eficiencia temporal de este tipo de proyectos, usando una metodología que combina revisión y sistematización documental, análisis estadístico de evidencia empírica publicada y formulación del modelo. Los resultados obtenidos evidenciaron mejoras asociadas con la aplicación de CCPM en la reducción de los tiempos de ejecución y permitieron analizar aspectos relacionados con la confiabilidad del cronograma y la gestión de buffers. Asimismo, se formuló y validó una propuesta metodológica aplicable a contextos de gerencia de proyectos con enfoque predictivo. Las pruebas estadísticas aplicadas a los datasets de Araszkiewicz (2017) y Shurrab (2015) identificaron diferencias estadísticamente significativas en la duración entre los métodos de programación analizados, aportando evidencia favorable al desempeño temporal de las alternativas basadas en CCPM dentro de estos conjuntos de datos. A partir de la integración de los hallazgos teóricos, documentales y empíricos se desarrolló un modelo conceptual-procedimental que estructura la aplicación de TOC mediante CCPM dentro del ciclo de vida de proyectos con enfoque predictivo. Su validación tuvo alcance conceptual y se complementó mediante su aplicación

Aplicación de la Teoría de Restricciones para mejorar la eficiencia temporal en proyectos con enfoque predictivo: desarrollo de un modelo conceptual basado en evidencia experimental.

a un caso de estudio ficticio, permitiendo verificar la coherencia y el funcionamiento lógico del procedimiento, sin constituir una validación empírica en un proyecto real. En conjunto, los resultados indican que TOC mediante CCPM constituye una alternativa metodológica con potencial para contribuir al mejoramiento de la eficiencia temporal de proyectos con enfoque predictivo, dentro del alcance y las limitaciones de la evidencia analizada.

Abstract

Time management remains one of the main challenges in predictive projects. Although CPM and PERT are widely used, many projects still experience delays, cost overruns, and poor schedule reliability. Several studies suggest that part of the problem is related to the limited ability of traditional approaches to manage systemic constraints, bottlenecks, and operational variability. In this context, the Theory of Constraints (TOC) and its application through Critical Chain Project Management (CCPM) have shown promising results, but the available evidence is fragmented and there is no empirically validated procedural model for predictive projects. The purpose of this research is to develop and validate a conceptual-procedural model for applying TOC through CCPM in order to improve temporal efficiency in predictive projects. The methodology combines documentary review and systematization, statistical analysis of published empirical evidence, and model formulation. The results provided evidence of improvements associated with the application of CCPM in reducing project execution times and made it possible to analyze aspects related to schedule reliability and buffer management. The statistical tests applied to the datasets from Araszkievicz (2017) and Shurrab (2015) identified statistically significant differences in project duration among the scheduling methods analyzed, providing evidence favorable to the temporal performance of CCPM-based alternatives within these datasets. Based on the integration of theoretical, documentary, and empirical findings, a conceptual-procedural model was developed to structure the application of TOC through CCPM throughout the life cycle of predictive projects. The model underwent conceptual validation, complemented by its application to a fictitious case study, which allowed its coherence and logical functioning to be assessed without constituting empirical validation in a real project. Overall, the findings indicate that TOC through CCPM represents a methodological alternative with the potential to contribute to improving temporal efficiency in predictive projects, within the scope and limitations of the evidence analyzed.

Tabla de Contenido

Resumen.....	6
Abstract	7
Tabla de Contenido	8
1 Introducción.....	13
1.1 Pregunta de investigación.....	16
1.1.1 Pregunta de investigación principal.....	16
1.1.2 Preguntas derivadas de investigación	16
2 Objetivos	18
2.1 Objetivo general	18
2.2 Objetivos específicos	18
3 Justificación	20
4 Marco Teórico.....	23
4.1 Teoría de Restricciones	23
4.1.1 Fundamentos filosóficos y sistémicos de la TOC.....	24
4.1.2 Tipología de restricciones	24
4.1.3 El proceso de mejora continua POOGI (Process of Ongoing Improvement)	26
4.1.4 Mecanismos de control Drum, Rope y Buffer en TOC.....	29
4.2 Critical Chain Project Management (CCPM)-Aplicación de la Teoría de Restricciones TOC a la gerencia de proyectos.....	31
4.2.1 Cadena Crítica (CCPM) versus Ruta o Camino Crítico (CPM).....	32

Aplicación de la Teoría de Restricciones para mejorar la eficiencia temporal en proyectos con enfoque predictivo: desarrollo de un modelo conceptual basado en evidencia experimental.	
4.2.2	Dimensionamiento de buffers33
4.2.3	Eliminación de multitarea y comportamiento humano35
4.3	Gestión del tiempo en proyectos predictivos35
4.4	Restricciones, variabilidad y cuellos de botella en proyectos.....37
4.5	Indicadores de eficiencia temporal (KPIs) en proyectos predictivos en donde se implementa TOC/CCPM.....37
4.6	Estado del Arte sobre la aplicación de TOC y CCPM en proyectos con enfoque predictivo 38
4.6.1	Evidencia empírica comparativa entre CPM y CCPM39
4.6.2	Confiabilidad del cronograma, buffers y variabilidad40
4.6.3	Aportes críticos y advertencias metodológicas41
4.6.4	Fragmentación de la literatura y necesidad de integración.....42
4.6.5	Tendencias actuales de investigación sobre TOC y CCPM43
4.6.6	Síntesis crítica y posicionamiento de la presente investigación44
4.7	Brecha de investigación identificada45
5	Hipótesis..... 46
5.1	Hipótesis General e Hipótesis Nula.....46
5.2	Subhipótesis Específicas.....46
5.3	Proposición metodológica del estudio47
6	Variables..... 48
6.1	Justificación metodológica de elección de variables para esta investigación53
7	Diseño Metodológico 54
7.1	Enfoque, alcance y limitaciones del estudio.....54

Aplicación de la Teoría de Restricciones para mejorar la eficiencia temporal en proyectos con enfoque predictivo: desarrollo de un modelo conceptual basado en evidencia experimental.

7.2	Tipo y diseño metodológico	55
7.3	Población, muestra e instrumentos	57
7.4	Trabajo empírico con fuentes secundarias	68
8	Aplicación de la metodología de la investigación y resultados	71
8.1	Desarrollo del procedimiento de recolección y análisis de datos de ejecución de proyectos con enfoque predictivo con enfoques CPM y CCPM.	71
8.1.1	Identificar y seleccionar literatura relevante	71
8.1.2	Seleccionar estudios comparativos y casos aplicados	72
8.1.3	Extraer información mediante matriz documental	73
8.1.4	Clasificar hallazgos y tipos de evidencia	76
8.1.5	Consolidar datos para análisis estadístico	76
8.2	Síntesis del artículo de investigación Application of Critical Chain Management in Construction Projects Schedules in a Multi-Project Environment: a Case Study de Araszkievicz (2017). 76	
8.2.1	Principales conclusiones del estudio	78
8.2.2	Evaluación de hipótesis mediante estadística inferencial y análisis de datos del artículo de investigación Application of Critical Chain Management in Construction Projects Schedules in a Multi-Project Environment: a Case Study de Araszkievicz (2017).	79
8.3	Análisis de datos del artículo de investigación Traditional Critical Path Method versus Critical Chain Project Management: A Comparative View de Shurrah (2015).	88
8.3.1	Resumen del articulo.....	88
8.3.2	¿Qué significan SSQ y C&PM dentro de CCPM?	89
8.3.3	Justificación del uso de ANOVA de medias repetidas para las pruebas de hipótesis de esta	

Aplicación de la Teoría de Restricciones para mejorar la eficiencia temporal en proyectos con enfoque predictivo: desarrollo de un modelo conceptual basado en evidencia experimental.

8.3.4	ANOVA y formulación de hipótesis para la variable Duración	91
8.3.5	ANOVA de medias repetidas para la variable Duración (días)	91
8.3.6	Conclusión del ANOVA de medias repetidas para la variable Duración medida en días	103
8.4	Verificación de supuestos y decisión de robustez no paramétrica.....	104
8.4.1	Prueba de Friedman aplicada a la variable duración	105
8.4.2	ANOVA de medias repetidas para la variable Costo (JD)	107
8.4.3	Prueba de Friedman aplicada a la variable costo	107
8.4.4	Tabla de resumen resultados ANOVA de medias repetidas	109
8.4.5	Conclusión del ANOVA y relación con la hipótesis de investigación	109
9	Modelo de aplicación procedimental de la TOC mediante la metodología CCPM, aplicado a proyectos con enfoque predictivo propuesto y ejemplo de su aplicación.	111
9.1	Procedimiento usado para la elaboración y formulación del modelo conceptual- procedimental de la investigación.....	111
9.1.1	Sistematizar literatura científica sobre TOC y CCPM	111
9.1.2	Identificar principios, técnicas y algoritmos recurrentes	116
9.1.3	Seleccionar técnicas aplicables al modelo propuesto	116
9.1.4	Analizar aplicabilidad y limitaciones de los enfoques	116
9.1.5	Integrar metodológicamente técnicas y algoritmos	117
9.1.6	Definir etapas del modelo conceptual-procedimental	117
9.1.7	Definir entradas y salidas del modelo	117
9.1.8	Definir reglas de decisión del modelo	118
9.1.9	Estructurar el modelo conceptual-procedimental final	118
9.1.10	Validar conceptualmente el modelo propuesto	118
9.2	Modelo conceptual procedimental de aplicación de la TOC mediante la metodología CCPM, aplicado a proyectos con enfoque predictivo.....	119

Aplicación de la Teoría de Restricciones para mejorar la eficiencia temporal en proyectos con enfoque predictivo: desarrollo de un modelo conceptual basado en evidencia experimental.

9.2.1	Idea central del modelo	119
9.2.2	Condiciones de entrada y supuestos del modelo	120
9.2.3	Diagnóstico TOC: identificación de la restricción del sistema o proyecto	121
9.2.4	Construcción de la red CPM base	121
9.2.5	Estimación de duraciones y eliminación de la seguridad local	123
9.2.6	Restricción ligera de recursos	123
9.2.7	Identificación de la cadena crítica	124
9.2.8	Programación CCPM con lógica late start y buffers visibles	127
9.2.9	Tipo de buffers del modelo y su aplicación	129
9.2.10	Duración protegida del proyecto	134
9.2.11	Gantt CCPM con buffers visibles	134
9.2.12	Ejecución y control mediante Fever Chart	135
9.2.13	Capa de control dinámico moderado	137
9.2.14	Simulación ligera de variabilidad	139
9.2.15	Reglas de decisión del modelo	141
9.2.16	Mejora continua bajo TOC	142
9.2.17	Diagrama de Flujo del Modelo	142
9.2.18	Correspondencia entre la secuencia operativa y los componentes del modelo propuesto	144
10	Validación conceptual del modelo propuesto	145
11	Discusión	148
12	Conclusiones y Trabajo Futuro	153
12.1	Trabajo futuro	159
13	Referencias	160
14	Anexos	165

Aplicación de la Teoría de Restricciones para mejorar la eficiencia temporal en proyectos con enfoque predictivo: desarrollo de un modelo conceptual basado en evidencia experimental.

Lista de Figuras

FIGURA 1 CICLO DE MEJORA CONTINUA POOGI APLICADO POR LA TOC.....	28
FIGURA 2. CARACTERÍSTICAS DE CPM VERSUS CARACTERÍSTICAS DE CCPM	33
FIGURA 3. CLÚSTERES TEMÁTICOS IDENTIFICADOS EN LA LITERATURA SOBRE TOC Y CCPM	59
FIGURA 4. DIAGRAMA DE FLUJO PROCEDIMIENTO DE RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	64
FIGURA 5. DIAGRAMA DE PROCEDIMIENTO DE ELABORACIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL-PROCEDIMENTAL.....	65
FIGURA 6. DATOS DE LA DURACIÓN DE LOS 10 PROYECTOS DEL ARTÍCULO DE ARASZKIEWICZ(2017) EN DÍAS BAJO EL ENFOQUE CPM Y EL ENFOQUE CCPM EN DÍAS Y TAMAÑO DE LOS BUFFERS DE LOS PROYECTOS EN DÍAS.....	78
FIGURA 7. RESULTADOS T TEST PAREADA SOBRE LA DIFERENCIA EN DURACIÓN (Δ DURATION) REALIZADOS EN EL SOFTWARE ESTADÍSTICO MINITAB.....	83
FIGURA 8. RESULTADOS T TEST PAREADA SOBRE EL PORCENTAJE DE REDUCCIÓN EN DURACIÓN (% OF REDUCTION) REALIZADOS EN EL SOFTWARE ESTADÍSTICO MINITAB.	85
FIGURA 9. DIAGRAMA DE FLUJO MODELO CONCEPTUAL-PROCEDIMENTAL DE IMPLEMENTACIÓN DE LA TOC POR MEDIO DE LA METODOLOGÍA CCPM A PROYECTOS CON ENFOQUE PREDICTIVO PROPUESTO	143

Lista de Tablas

TABLA 1. VARIABLES DE INVESTIGACIÓN TITULADA: APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE RESTRICCIONES PARA MEJORAR LA EFICIENCIA TEMPORAL EN PROYECTOS CON ENFOQUE PREDICTIVO: DESARROLLO DE UN MODELO CONCEPTUAL BASADO EN EVIDENCIA EXPERIMENTAL.	50
TABLA 2. MATRIZ EXTRACCIÓN DOCUMENTAL DE ARTÍCULOS Y ESTUDIOS APLICADOS RELACIONADOS CON LA TEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN.....	74
TABLA 3. DATASET DE LA DURACIÓN DE LOS 10 PROYECTOS DEL ARTÍCULO DE ARASZKIEWICZ(2017) EN DÍAS BAJO EL ENFOQUE CPM Y EL ENFOQUE CCPM EN DÍAS CALCULANDO LAS VARIABLES DELTA DURATION Y % OF REDUCTION	81
TABLA 4. TABLA RESUMEN DE LOS 2 T-TESTS REALIZADOS SOBRE LAS VARIABLES DE DURACIÓN Y PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE LA DURACIÓN.	88
TABLA 5. DATASET DATOS ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN TRADITIONAL CRITICAL PATH METHOD VERSUS CRITICAL CHAIN PROJECT MANAGEMENT: A COMPARATIVE VIEW (SHURRAB, 2015) PARA ELABORACIÓN DE ANOVA DE MEDIAS REPETIDAS.	93
TABLA 6. CÁLCULO DE LA SUMA DE CUADRADOS PARA LA VARIABLE DURACIÓN (DÍAS)	99
TABLA 7. GRADOS DE LIBERTAD ANOVA DE MEDIAS REPETIDAS	101
TABLA 8. CÁLCULO DEL ESTADÍSTICO CHI-SQUARE DE FRIEDMAN PARA LA VARIABLE DURACIÓN (DÍAS)	105
TABLA 9. CÁLCULO DEL ESTADÍSTICO HOLMED P AJUSTADO PARA COMPARACIÓN DE LA VARIABLE DURACIÓN DE LOS TRES MÉTODOS DE PROGRAMACIÓN	106
TABLA 10. ANÁLISIS DE RESULTADOS ANÁLISIS POST-HOC NO PARAMÉTRICO PARA LA VARIABLE	107
TABLA 11. CÁLCULO DE LA SUMA DE CUADRADOS PARA LA VARIABLE COSTO (JD).....	107
TABLA 12. CÁLCULO DEL ESTADÍSTICO CHI-SQUARE DE FRIEDMAN PARA LA VARIABLE COSTO (JORDAN DINARS)	108
TABLA 13. CÁLCULO DEL ESTADÍSTICO HOLMED P AJUSTADO PARA COMPARACIÓN DE LA VARIABLE COSTO DE LOS TRES MÉTODOS DE PROGRAMACIÓN	109
TABLA 14. RESULTADOS DEL ANOVA DE MEDIDAS REPETIDAS Y PRUEBA DE FRIEDMAN (DURACIÓN Y COSTO)	109
TABLA 15. MATRIZ EXTRACCIÓN DOCUMENTAL DE ARTÍCULOS Y ESTUDIOS APLICADOS RELACIONADOS CON LA ELABORACIÓN Y FORMULACIÓN DEL MODELO PRODUCTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	112
TABLA 16. DATOS MÍNIMOS PARA LA APLICACIÓN DEL MODELO PROPUESTO	120
TABLA 17. TIPOS DE DURACIONES DE LAS ACTIVIDADES DE LOS PROYECTOS EN EL MODELO PROPUESTO	123

Aplicación de la Teoría de Restricciones para mejorar la eficiencia temporal en proyectos con enfoque predictivo: desarrollo de un modelo conceptual basado en evidencia experimental.	12
--	----

TABLA 18. ESTRUCTURA MÍNIMA DE UN DIAGRAMA DE GANTT CCPM	129
TABLA 19. ESTRUCTURA RECOMENDADA DEL DIAGRAMA DE GANTT DEL MODELO CCPM PROPUESTO	135
TABLA 20. TABLA MÍNIMA DE CONTROL MEDIANTE FEVER CHARTS.....	136
TABLA 21. ESTADOS DEL PROYECTO EN EL FEVER CHART	137
TABLA 22. DESCRIPCIÓN DE ESCENARIOS DE SIMULACIÓN LIGERA DE VARIABILIDAD PROPUESTOS EN EL MODELO	140
TABLA 23. REGLAS DE DECISIÓN CONCRETAS ASOCIADAS AL CONSUMO DE BUFFERS, DISPONIBILIDAD DE RECURSOS Y COMPORTAMIENTO DE LA CADENA CRITICA REMANENTE DEL MODELO PROPUESTO	141
TABLA 24. CORRESPONDENCIA ENTRE LA SECUENCIA OPERATIVA Y LOS COMPONENTES DEL MODELO PROPUESTO	144
TABLA 25. VALIDACIÓN CONCEPTUAL DEL MODELO PROPUESTO	147
TABLA 26. CONCLUSIONES DERIVADAS DEL COMPORTAMIENTO DE CADA UNA DE LAS VARIABLES DE INVESTIGACIÓN	157

1 Introducción

La gestión del tiempo constituye uno de los factores más críticos en proyectos con enfoque predictivo especialmente en sectores como ingeniería, construcción, manufactura y tecnologías de la información (White & Fortune, 2002). A pesar de que técnicas como PERT (*Program Evaluation and Review Technique*) y CMP (*Critical Path Method*) y el desarrollo de técnicas y modelos avanzados de planeación, los estudios y resultados de ejecución de diversos tipos de proyectos en diferentes sectores de la economía siguen mostrando grandes desviaciones entre los tiempos programados y planificados en fases de planeación del ciclo de vida del proyecto y los tiempos reales de ejecución permitiéndonos validar la criticidad del tiempo como elemento de planeación en gerencia de proyectos (Ahuja & Thiruvengadam, 2004; Anastasiu et al., 2023; Herroelen & Leus, 2004).

Según informes de referencia en dirección de proyectos, el cumplimiento estricto del cronograma no es común ni es la norma en proyectos con diferentes enfoques. De acuerdo con el Project Management Institute (2018), en organizaciones con niveles medios o bajos de madurez en gestión de proyectos, solo alrededor del 52 % de los proyectos formulados, gestionados y ejecutados logra completarse exitosamente dentro del tiempo planificado, lo que indica que cerca de la mitad de los proyectos presenta retrasos significativos y no cumplen con los cronogramas establecidos en la fase de planeación. De la misma manera, PMI también reporta que solo aproximadamente el 44 % de los proyectos se ejecuta dentro del presupuesto originalmente aprobado, lo cual evidencia que las desviaciones de tiempo y de costo tienden a manifestarse de manera conjunta y a reforzarse mutuamente en diversos tipos de proyectos.

Esta situación también se refleja en el contexto colombiano. Rodríguez & Pineda (2018) muestran que un número importante de obras de infraestructura y proyectos de construcción en el país no se finalizan o presentan retrasos prolongados, lo que evidencia una brecha persistente entre lo planificado

en los cronogramas y lo realmente ejecutado. Aunque su estudio no presenta un indicador porcentual específico sobre proyectos con incumplimiento del cronograma, el alto número de obras detenidas o no finalizadas por problemas de planeación indica que las desviaciones temporales son frecuentes en Colombia. Estos hallazgos muestran que el incumplimiento de los cronogramas es un problema recurrente en proyectos con enfoque predictivo, con efectos negativos directos sobre la gestión y los resultados de los proyectos.

Estas desviaciones representan un aspecto negativo en la gerencia de proyectos ya que se traducen en retrasos en la ejecución de tareas críticas, sobrecostos con respecto a los presupuestos planificados, baja confiabilidad en los cronogramas planificados, aumento de materialización de riesgos relacionados con el incumplimiento de la entrega de los productos o servicios dentro del alcance, costo, tiempo y calidad planificados, así como también la disminución de la satisfacción del cliente.

Investigaciones como las desarrolladas por Herroelen y Leus (2004), Long y Ohsato (2008) y Ghaffari y Emsley (2015) han señalado que parte de las ineficiencias y desviaciones temporales observadas en los proyectos no se relaciona únicamente con la rigurosidad de la planificación del cronograma, sino también con las limitaciones de los métodos tradicionales para gestionar restricciones de recursos, cuellos de botella, incertidumbre, variabilidad y otros factores que afectan el flujo de ejecución del proyecto.

La teoría de restricciones (TOC) y su aplicación específica en la gerencia de proyectos de diferentes tipos bajo el enfoque *Critical Chain Project Management* (CCPM) propone una solución a este problema relacionado con la gestión del tiempo de los proyectos, enfocada en la identificación y explotación del recurso o actividad que represente el cuello de botella o *Bottleneck* que limita el desempeño global del proyecto, el uso estratégico de buffers y la sincronización del flujo de los proyectos usando los mismos principios de esta teoría cuando se aplica a procesos productivos de manufactura pero esta vez aplicados a la gerencia de proyectos (Cox & Schleier, 2010; Goldratt, 1997).

Aunque múltiples estudios e investigaciones empíricas han documentado mejoras considerables en los tiempos de ejecución de proyectos cuando se aplican los principios de la TOC a la ejecución de estos específicamente en su programación temporal con reducciones entre el 15% y el 50% en la duración total del proyecto (Ahuja & Thiruvengadam, 2004; Goldratt, 1997; Herroelen & Leus, 2004; Leach, 1999), la evidencia se encuentra dispersa en diferentes industrias y metodologías. De igual manera, Ghaffari y Emsley (2015), Long y Ohsato (2008) y, más recientemente, De Oliveira Martins et al. (2025) muestran que la literatura sobre CCPM continúa presentando desarrollos metodológicos dispersos y aproximaciones particulares, sin que exista un modelo conceptual-procedimental unificado que explique de forma clara, aplicable y precisa cómo integrar los principios de la TOC dentro de la gerencia y el ciclo de vida de proyectos de naturaleza predictiva.

Por todo lo anterior, el **problema que aborda esta investigación** se centra en la falta de un modelo procedimental, aplicado y validado empíricamente, que permita a los gerentes de proyecto mejorar la eficiencia temporal de proyectos con enfoque predictivo mediante la aplicación de la TOC a través del enfoque CCPM.

El documento se encuentra organizado en doce capítulos principales. Después de esta introducción se presentan los objetivos y la justificación de la investigación. Posteriormente, se desarrolla el marco teórico relacionado con la Teoría de Restricciones, CCPM y la gestión del tiempo en proyectos con enfoque predictivo, seguido de las hipótesis, las variables y el diseño metodológico. A continuación, se presentan la aplicación de la metodología y los resultados del análisis estadístico, la formulación del modelo conceptual-procedimental y su validación conceptual. Finalmente, se desarrollan la discusión, las conclusiones, las oportunidades de trabajo futuro y las referencias y anexos que soportan la investigación.

1.1 Pregunta de investigación

1.1.1 Pregunta de investigación principal

¿Cómo y en qué medida contribuye la aplicación de la TOC por medio del enfoque CCPM a la mejora de la eficiencia temporal de proyectos con enfoque predictivo y bajo qué modelo conceptual-procedimental puede integrarse esta teoría en el ciclo de vida de este tipo de proyectos para optimizar sus tiempos de ejecución?

1.1.2 Preguntas derivadas de investigación

- ❖ ¿Qué fundamentos conceptuales de la TOC y de la gestión del tiempo de proyectos con enfoque predictivo permiten construir un modelo aplicable al ciclo de vida de este tipo de proyectos para mejorar su eficiencia temporal?
- ❖ ¿Qué evidencia empírica existe en investigaciones previamente realizadas relacionadas con el impacto de TOC y CCPM en la reducción de la duración de los proyectos con enfoque predictivo y la mejora en el desempeño de su cronograma?
- ❖ ¿Qué indicadores de gestión (KPIs) son más adecuados para medir la eficiencia temporal de proyectos con enfoque predictivo y cómo estos se ven afectados por la implementación de TOC?
- ❖ ¿Cómo puede integrarse TOC mediante el enfoque CCPM dentro de las fases del ciclo de vida de proyectos con enfoque predictivo para optimizar su planificación, ejecución y control de su cronograma?
- ❖ ¿Qué tan consistente es la evidencia estadística disponible para sustentar la hipótesis de que la aplicación de TOC mediante el enfoque CCPM a proyectos con enfoque predictivo mejora significativamente sus tiempos de ejecución?

Estas preguntas delimitan el análisis de la investigación a proyectos con enfoque predictivo y orientan tanto la revisión teórica y documental como el análisis estadístico y la construcción del modelo propuesto. Sus respuestas se desarrollan a lo largo de los capítulos posteriores a partir de la evidencia

disponible en la literatura seleccionada, por lo que las conclusiones obtenidas se interpretan dentro del alcance y las limitaciones metodológicas definidas para el estudio.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Desarrollar un modelo de aplicación procedimental de la TOC mediante la metodología *CCPM*, aplicado a proyectos con enfoque predictivo, a partir del análisis de evidencia empírica y bibliográfica, con el fin de determinar su impacto en la eficiencia de los tiempos de ejecución de este tipo de proyectos.

2.2 Objetivos específicos

- ❖ Analizar los fundamentos teóricos de la TOC y su relación con la gestión de proyectos con enfoque predictivo, así como su aplicación a través de la metodología *CCPM*, con el propósito de identificar los factores críticos que influyen en la eficiencia temporal de estos proyectos.
- ❖ Revisar estudios previos, tanto cualitativos como cuantitativos, en los que se haya aplicado la TOC mediante la metodología *CCPM* en proyectos con enfoque predictivo, con el fin de identificar los resultados obtenidos y las mejoras en los tiempos de ejecución tras su implementación.
- ❖ Aplicar técnicas estadísticas y de análisis de datos a un conjunto de proyectos con enfoque predictivo, con y sin implementación de la TOC mediante *CCPM*, con el propósito de evaluar su impacto en los tiempos de ejecución.
- ❖ Desarrollar un modelo conceptual de implementación de la TOC por medio de la metodología *CCPM* para proyectos con enfoque predictivo, soportado en los hallazgos teóricos y empíricos de la investigación.
- ❖ Validar el modelo conceptual-procedimental propuesto mediante la integración de los hallazgos teóricos, la evidencia empírica disponible, los resultados del análisis estadístico y su aplicación

Aplicación de la Teoría de Restricciones para mejorar la eficiencia temporal en proyectos con enfoque predictivo: desarrollo de un modelo conceptual basado en evidencia experimental.

19

a un caso de estudio de un proyecto con enfoque predictivo, con el fin de verificar su consistencia, funcionamiento y aplicabilidad en la gestión de este tipo de proyectos.

3 Justificación

La gestión del tiempo es uno de los factores más críticos de éxito en los proyectos con enfoque predictivo. En la práctica y en el ejercicio profesional de la gerencia de proyectos, varias investigaciones y reportes de desempeño evidencian que la mayoría de los proyectos, que se gestionan incluso con metodologías determinísticas tradicionales como CPM, muestran desviaciones significativas en su ejecución con respecto a sus cronogramas iniciales. Estas desviaciones no solo afectan la duración total del proyecto, sino que también generan sobrecostos de varias actividades, retrasos contractuales, pérdida de oportunidades estratégicas y disminución de la satisfacción de los *stakeholders* relacionados con el proyecto (Herroelen & Leus, 2004; White & Fortune, 2002).

La literatura especializada en el tema ha señalado de manera consistente que una parte importante de los problemas que se presentan en la gestión de proyectos está asociada a las limitaciones de los métodos tradicionales de programación del cronograma. En particular, estos enfoques suelen mostrar dificultades para gestionar de forma adecuada las restricciones sistémicas, los cuellos de botella (*bottlenecks*) y la variabilidad propia del flujo de trabajo del sistema que se intenta controlar (Ghaffari & Emsley, 2015; Herroelen & Leus, 2004; Long & Ohsato, 2008).

En este contexto, la TOC y su aplicación al entorno de gerencia de proyectos mediante el enfoque CCPM plantean una alternativa conceptual y operativa orientada a mejorar la eficiencia temporal de proyectos con enfoque predictivo. Esta propuesta se enfoca especialmente en reconocer el recurso o restricción que condiciona el desempeño del sistema, sincronizar el flujo de trabajo en torno a dicha restricción y administrar de manera estratégica los buffers en puntos clave de la cadena del proyecto que se considera como un todo (Goldratt, 1997; Leach, 1999; Newbold, 1998).

A pesar de su potencial, la adopción de TOC en proyectos con enfoque predictivo sigue siendo limitada por las siguientes tres razones (Ghaffari & Emsley, 2015; Herroelen & Leus, 2004; Long & Ohsato, 2008):

- ❖ La evidencia empírica está dispersa en varias investigaciones y no ha sido sistematizada.
- ❖ No existe un modelo conceptual y procedimental unificado que explique la integración de TOC a través de CCPM en el ciclo de vida de proyectos con enfoque predictivo.
- ❖ Los gerentes de proyecto (*project managers*) no cuentan con una guía argumentada académicamente que demuestre la aplicación de la efectividad de la aplicación de TOC por medio de CCPM a proyectos con enfoque predictivo en términos estadísticos.

Esta investigación contribuye al conocimiento científico al sintetizar la evidencia empírica disponible sobre el impacto de la aplicación de la TOC mediante la metodología CCPM en la reducción del tiempo de ejecución de proyectos con enfoque predictivo. Asimismo, aporta un modelo conceptual aplicado, construido a partir de técnicas y recomendaciones derivadas de diversas investigaciones y diseñado específicamente para este tipo de proyectos, aspecto que aún se encuentra poco desarrollado en la literatura especializada. Adicionalmente, ofrece sustento estadístico, basado en investigaciones previas, que respalda la hipótesis de que la aplicación de TOC mediante CCPM mejora significativamente la eficiencia temporal de proyectos con enfoque predictivo. Finalmente, posee un valor práctico al proporcionar a los gerentes de proyecto herramientas conceptuales y analíticas que pueden servir de apoyo para optimizar la ejecución y mejorar el desempeño de sus cronogramas.

Desde el ámbito institucional, la presente investigación se inscribe en el campo de investigación Emprendimiento y Gerencia de la Universidad EAN, dentro del grupo de investigación Gestión de Proyectos y, específicamente, en la línea de investigación Modelos, Metodologías y Sistemas de Gestión para la Gerencia de Proyectos. Esta vinculación se fundamenta en que el estudio aborda el análisis y desarrollo de un modelo conceptual-procedimental orientado a la gestión de proyectos, mediante la

integración de los principios de la TOC y la metodología CCPM para mejorar la eficiencia temporal de proyectos con enfoque predictivo.

En conjunto con todos los elementos expuestos anteriormente, la presente investigación ayuda a cerrar la brecha entre teoría y práctica permitiendo que la TOC mediante CCPM se convierta en una alternativa viable para el desempeño temporal de proyectos con enfoque predictivo.

4 Marco Teórico

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos que sustentan la investigación. Se abordan los principales conceptos relacionados con la TOC, la metodología CCPM, la gestión del tiempo en proyectos con enfoque predictivo y los demás elementos conceptuales que sirven de base para el desarrollo del modelo propuesto.

4.1 Teoría de Restricciones

La TOC, desarrollada por Eliyahu M. Goldratt (1990), expone que el desempeño de cualquier sistema está condicionado por uno o pocos elementos que limitan su capacidad global, los cuales se denominan restricciones. Según lo anterior, el rendimiento no depende de la eficiencia individual de cada componente del sistema, sino de la manera en que se gestiona la restricción que impone el mayor límite al mismo.

Este enfoque representa un cambio frente a la lógica tradicional de optimización local usada en enfoques como CPM. En lugar de mejorar cada parte por separado, la TOC propone coordinar el flujo completo del sistema en función de su restricción principal detectada previamente. Goldratt (1990) establece que un sistema no puede avanzar más rápido que su restricción, por lo que cualquier mejora individual fuera de esta restricción tiene un impacto limitado en el resultado global y en el desempeño del sistema.

Esta lógica es bastante relevante en el área de la gerencia de proyectos debido a que los proyectos están conformados por actividades interdependientes que compiten por recursos, aprobaciones y coordinación. Es por lo anterior que las restricciones, ya sean recursos críticos, secuencias obligatorias o procesos externos, terminan determinando el comportamiento real del cronograma debido a que los retrasos tienden a concentrarse en estos puntos, afectando el desempeño temporal del proyecto en su conjunto, como señalan Herroelen & Leus (2004).

4.1.1 Fundamentos filosóficos y sistémicos de la TOC

La TOC concibe las organizaciones como sistemas interdependientes sujetos a variabilidad. Bajo esta perspectiva:

- i. No todas las actividades tienen la misma importancia para el rendimiento global del sistema como un todo.
- ii. La eficiencia local del sistema no garantiza necesariamente eficiencia sistémica.
- iii. El trabajo en curso excesivo genera congestión, colas y demoras en el sistema productivo, administrativo o en los proyectos.

Debido a los aspectos anteriores, el objetivo no es maximizar la utilización de todos los recursos, sino asegurar que el flujo avance de manera estable a través de la restricción del sistema, lo cual implica reducir interrupciones, evitar multitarea innecesaria y limitar la acumulación de trabajo.

Este cambio de enfoque de eficiencia local a gestión del flujo constituye uno de los aportes más importantes de la TOC y explica su relevancia en entornos complejos como lo son los proyectos con enfoque predictivo.

4.1.2 Tipología de restricciones

Goldratt (1990) clasifica las restricciones en cuatro categorías principales, las cuales son:

❖ *Restricciones físicas*

Las restricciones físicas corresponden a limitaciones reales de capacidad dentro del sistema, como la falta de equipos suficientes, el uso compartido de herramientas especializadas o la disponibilidad limitada de personal clave. En proyectos de ingeniería y construcción, este tipo de restricción suele concentrarse en recursos altamente especializados, como ingenieros senior, revisores técnicos o equipos críticos que deben atender múltiples frentes de trabajo.

Cuando un mismo recurso es requerido por varias actividades en paralelo, se generan colas, tiempos de espera y reprogramaciones constantes. Goldratt (1997) identifica esta situación como una de las principales causas de retrasos en proyectos, ya que la saturación del recurso crítico termina marcando el ritmo real del sistema, independientemente de que otras áreas tengan capacidad disponible.

❖ *Restricciones de políticas*

Este tipo de restricciones se refieren a normas internas que, aun sin proponérselo, frenan el flujo del sistema respectivo. Esto incluye procesos burocráticos, indicadores de gestión (KPIs) que promueven la eficiencia individual por encima del flujo global, o decisiones de priorización que inducen a los equipos a cambiar de tarea constantemente. Goldratt, (1990) establece que estas restricciones son incluso más problemáticas que las físicas porque suelen pasar desapercibidas y son difíciles de identificar y gestionar.

❖ *Restricciones de mercado*

Las restricciones de mercado aparecen cuando el límite principal del sistema no está dentro de la planta o del proceso (máquinas, personas, métodos), sino fuera de él, es decir, el mercado es el que impone el techo del desempeño. En otras palabras, aunque la organización tenga capacidad instalada suficiente para producir más, no puede vender o despachar más porque la demanda real no es suficiente, porque el cliente compra menos, porque hay estacionalidad o porque existen condiciones comerciales que frenan los pedidos.

En sistemas de manufactura, esto se ve con claridad, por ejemplo, una planta puede tener líneas que podrían operar más horas o a mayor velocidad, pero si no hay órdenes suficientes, el sistema termina con capacidad ociosa. En ese escenario, el Cuello de Botella (*Bottle Neck*) o Restricción no es una máquina lenta, más bien es el hecho de que el flujo de pedidos no alimenta el sistema con el volumen necesario. Por esta razón, la TOC considera que la prioridad deja de ser aumentar capacidad y

pasa a ser aumentar ventas o aumentar el flujo de órdenes, ya que la restricción real está directamente relacionada con la demanda de productos y servicios producidos por el sistema.

En gerencia de proyectos, la analogía es similar, aunque el mercado se manifieste distinto. Por ejemplo, en este caso podemos encontrar factores como plazos contractuales, disponibilidad del cliente para aprobar, ventanas regulatorias y decisiones externas que condicionan el ritmo. Cuando un cliente demora una aprobación o una entidad reguladora retrasa un permiso, el proyecto puede tener recursos disponibles, pero el flujo se detiene porque la restricción está afuera.

❖ *Restricciones de Comportamiento*

Las restricciones de comportamiento surgen cuando la forma en que las personas reaccionan ante la presión, la incertidumbre o las políticas internas termina afectando el desempeño del proyecto. Estas no se tratan de fallas técnicas, sino de respuestas humanas previsibles frente al riesgo y a los sistemas de control.

Leach (1999) señala que uno de los comportamientos más comunes es inflar las estimaciones (*Padding*) como mecanismo de protección personal. A esto se suma la tendencia a postergar el inicio de las tareas cuando se percibe que existe holgura suficiente para ejecutarlas, lo que reduce el margen real de maniobra. También es frecuente que los equipos eviten reportar avances parciales para no generar expectativas adicionales o para no quedar expuestos a nuevas exigencias. Finalmente, la multitarea inducida por cambios constantes de prioridad fragmenta la atención del recurso y aumenta los tiempos de ejecución, aun cuando la carga de trabajo total no haya cambiado.

4.1.3 El proceso de mejora continua POOGI (Process of Ongoing Improvement)

El *Process of Ongoing Improvement (POOGI)* es el mecanismo central mediante el cual la Teoría de Restricciones propone mejorar el desempeño de un sistema de manera progresiva. Su lógica parte de la idea de que las organizaciones no mejoran de forma sostenible cuando intentan intervenir todos los

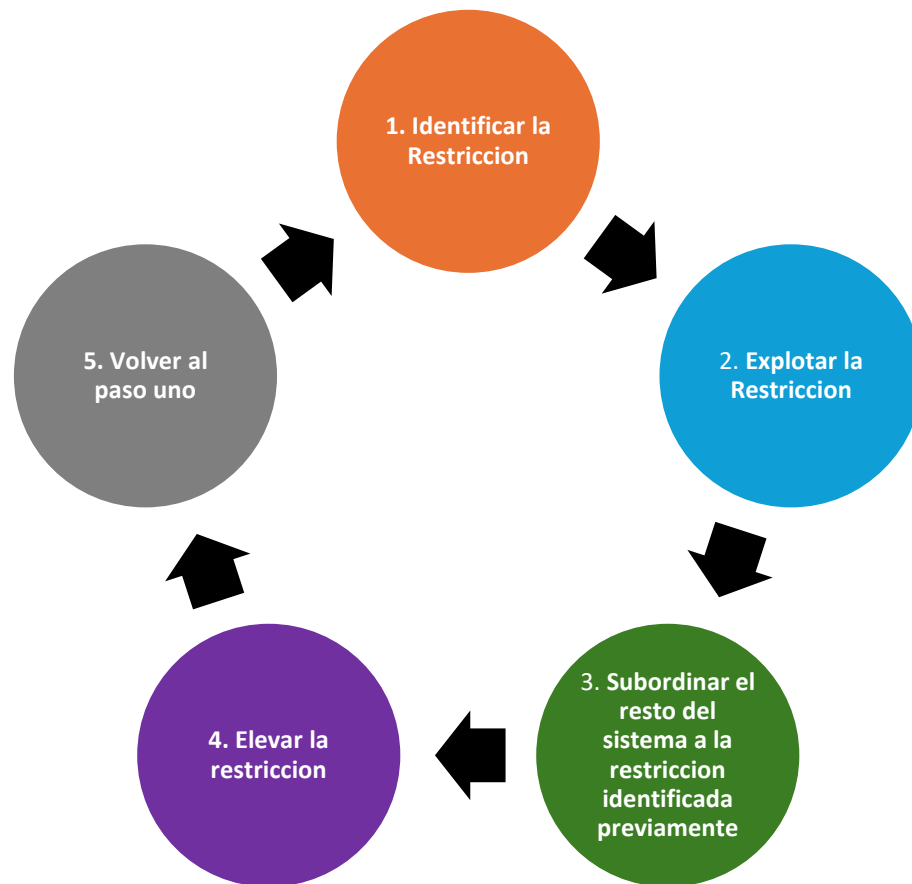
elementos de los sistemas involucrados al mismo tiempo, sino cuando concentran sus esfuerzos en el punto que realmente limita el resultado global, es decir, en la restricción identificada.

A diferencia de otras herramientas de mejora continua, que suelen impulsar cambios paralelos en varias áreas, POOGI plantea un método más gradual y ordenado para mejorar el desempeño de los sistemas productivos, administrativos o de proyectos. Primero se identifica la restricción, luego se actúa sobre ella y, solo después de estabilizar el sistema, se avanza hacia nuevos puntos de mejora, es decir, la mejora continua se materializa paso a paso. De esta manera, las acciones realizadas sobre la restricción tienen un efecto directo sobre el desempeño total del sistema una vez se implementan, lo que permite que las mejoras se mantengan en el tiempo y no se diluyan entre múltiples iniciativas desconectadas que muchas veces se realizan por el deseo de mejorar el desempeño de los sistemas de manera muy rápida.

El proceso se compone de cinco pasos que se ejecutan en forma cíclica de la siguiente manera: Identificar la restricción; Explotar la restricción; Subordinar el resto del sistema a la restricción identificada previamente; Elevar la restricción; Volver al paso uno. El ciclo POOGI se puede observar en la Figura 1.

Figura 1

Ciclo de mejora continua POOGI aplicado por la TOC



Nota. Elaboración propia a partir de Theory of Constraints Institute (s. f.). *Five focusing steps, a process of on-going improvement.*

Este enfoque obliga a la organización a resistir la tentación de mejorar todos los componentes del sistema al mismo tiempo en la cual la mayoría de organizaciones cae, y en su lugar conlleva a concentrar esfuerzos donde realmente se genera impacto, es decir, en la restricción identificada. Goldratt enfatiza que muchos intentos de mejora fracasan porque se dispersan recursos en áreas que no influyen en el desempeño global, lo cual genera un desperdicio de tiempo y esfuerzo que puede ser utilizado en la explotación, subordinación y elevación de la restricción determinada.

4.1.4 Mecanismos de control Drum, Rope y Buffer en TOC

Con el objetivo de gestionar la variabilidad y mantener el flujo del sistema alineado con la restricción identificada previamente, la Teoría de Restricciones TOC introduce tres mecanismos de control conocidos como *Drum*, *Rope* y *Buffer*. Estos mecanismos no operan de forma aislada, sino de forma coordinada, y lo hacen con el objetivo de coordinar el ritmo de trabajo del sistema, regular la ejecución y liberación de actividades y proteger al sistema frente a la incertidumbre propia de los procesos productivos y de los proyectos de diferentes tipos.

❖ *Drum (Tambor)*

El *Drum* hace referencia al ritmo real al que el sistema puede trabajar, y ese ritmo lo marca directamente la restricción del sistema identificada previamente. La idea del tambor es bastante intuitiva: así como en una marcha el paso lo impone el tambor y no cada persona por separado, en un sistema el avance viene condicionado por aquello que más limita su capacidad. Por eso, el Drum no debe entenderse como una meta ideal o deseada, sino más bien como una referencia práctica, basada en lo que el punto limitante puede sostener de forma estable.

En el caso de los proyectos, este ritmo suele estar definido por un recurso clave, como un profesional con alta especialización o experiencia, o por un pequeño grupo de actividades de las que dependen muchas otras y que en la mayoría de las ocasiones se encuentran dentro de la ruta crítica del proyecto. Cuando este ritmo no se reconoce previamente de manera explícita y clara, el proyecto tiende a desordenarse, lo que genera que algunas áreas avancen más rápido de lo que el sistema puede absorber o asimilar, mientras que otras quedan detenidas esperando. Esto genera acumulaciones de trabajo, retrabajos y ajustes constantes.

❖ *Rope (Cuerda)*

La *Rope* o cuerda en español es un mecanismo que ayuda a sincronizar el sistema que regula y determina cuándo y cuánta carga de trabajo se libera hacia la restricción del sistema identificada previamente. Su objetivo es bastante concreto y es evitar que al punto limitante o restricción lleguen más tareas de las que realmente puede procesar bajo su capacidad identificada. Cuando esto no se gestiona y controla, aparecen colas, acumulaciones de inventario o trabajo, urgencias artificiales y una sensación permanente de estar apagando incendios porque el sistema supuestamente no trabaja como debería.

En la práctica, *Rope* actúa como una señal que conecta el inicio de nuevas actividades con la disponibilidad real del recurso crítico o la restricción identificada en el sistema en estudio. En gerencia de proyectos, esto se traduce en decisiones cotidianas, como no enviar entregables a revisión si el revisor ya está saturado, o no iniciar tareas aguas arriba cuando se sabe que el recurso clave no podrá atenderlas en el corto plazo, lo anterior genera sobresaturamiento del recurso crítico y acumulación de trabajo.

❖ *Buffers (Amortiguadores)*

Los *buffers* o amortiguadores son mecanismos de protección diseñados para absorber la variabilidad propia del sistema. A diferencia de los enfoques o sistemas tradicionales, donde cada actividad incorpora su propio margen de seguridad, TOC concentra la protección en puntos estratégicos, lo que permite una gestión más transparente y efectiva del riesgo temporal que se puede presentar en cualquier momento.

La TOC clasifica los buffers en tres categorías de la siguiente manera:

- i. Project Buffer: Este buffer está ubicado al final del cronograma, cuya función es proteger la fecha de finalización del proyecto frente a desviaciones acumuladas.

- ii. Feeding Buffers: Este tipo de buffers se establecen en las rutas que alimentan la cadena crítica, con el fin de evitar que retrasos externos afecten el flujo principal evitando que el recurso que fue identificado como restricción se detenga por falta de insumos para su operación continua.
- iii. Resource Buffers: Este tipo de buffers son utilizados como alertas anticipadas para asegurar que el recurso crítico cuente con todo lo necesario antes de iniciar una actividad.

Es importante resaltar que los buffers no representan un permiso para atrasarse, por el contrario, su consumo actúa como un indicador temprano de alerta que permite tomar acciones correctivas antes de que el impacto en el sistema sea irreversible. En este sentido, los buffers facilitan una gestión más proactiva del cronograma.

4.2 Critical Chain Project Management (CCPM)-Aplicación de la Teoría de Restricciones TOC a la gerencia de proyectos

La CCPM surge como una aplicación directa de la TOC al campo de la gerencia de proyectos. Este enfoque fue propuesto por Eliyahu M. Goldratt en su libro *Critical Chain*, publicado en 1997, donde el autor cuestiona de manera abierta la forma tradicional en que se planifican y programan los proyectos.

Goldratt indica que metodologías ampliamente utilizadas para planificar proyectos como PERT y CPM se apoyan en supuestos que en la práctica rara vez se cumplen. Dentro de estos supuestos se encuentran la idea de que las duraciones de las actividades pueden definirse con precisión (Duraciones Determinísticas), que los recursos están siempre disponibles cuando se requieren durante el proyecto y que las personas actúan de manera completamente racional y predecible. En proyectos reales, estos supuestos son superados por la realidad y la variabilidad inherente a los mismos, la escasez de recursos que se puede presentar en cualquier momento y los comportamientos humanos que influyen en la forma en que se ejecuta el trabajo. Es a partir de estas limitaciones que CCPM propone un enfoque alternativo que busca alinearse mejor con la realidad operativa de los proyectos.

Según lo anteriormente expuesto, CCPM no concibe el cronograma como una simple red de actividades y precedencias, sino como un sistema dinámico afectado por variabilidad, conflictos de recursos, acumulación de trabajo en curso y comportamientos organizacionales que distorsionan la ejecución. Esta diferencia conceptual marca un cambio importante, el cual se fundamenta en que el foco deja de estar en cumplir fechas individuales de tareas y se traslada a proteger el flujo global del proyecto y la fecha final comprometida.

Diversos autores coinciden en que CCPM se sostiene sobre cuatro pilares fundamentales, los cuales son los siguientes:

- i. Identificación de la cadena crítica como secuencia de actividades condicionada por recursos.
- ii. Eliminación o reducción significativa de la multitarea.
- iii. Retirada de la seguridad inflada de las actividades individuales, y
- iv. Protección del proyecto mediante buffers agregados.

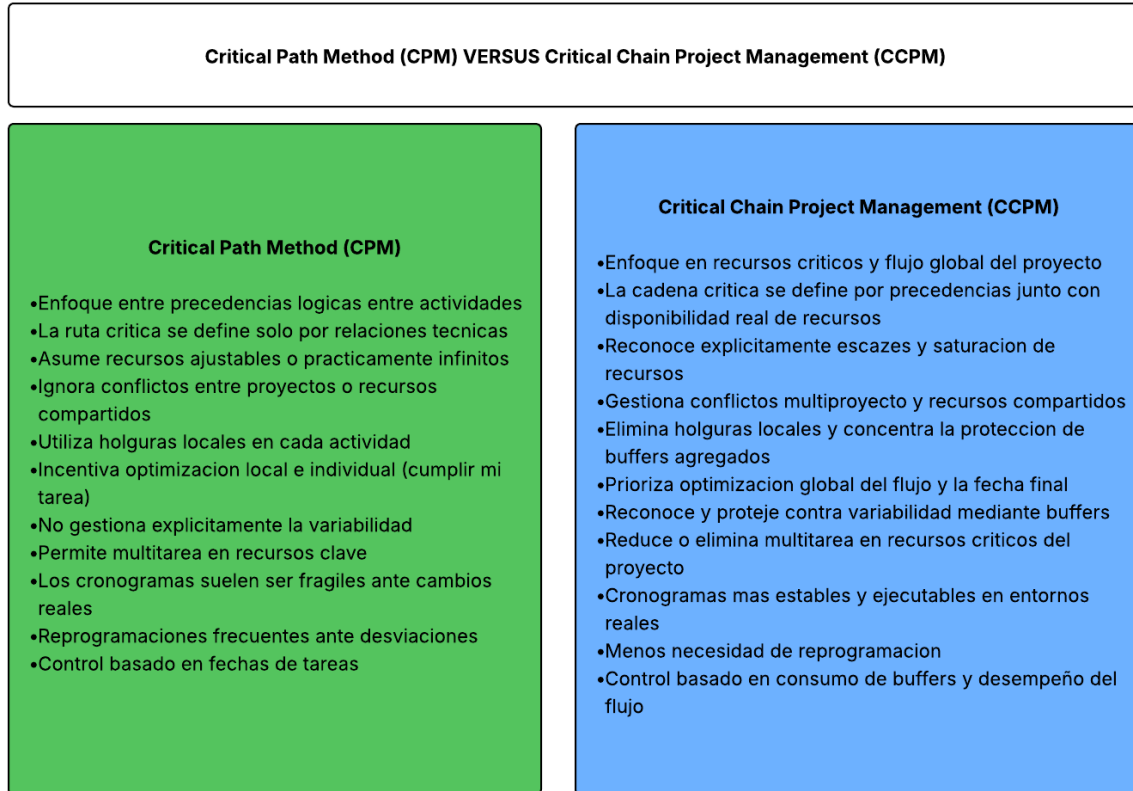
Estos principios están ampliamente documentados en la literatura especializada y se pueden encontrar en artículos de investigación relacionados con el tema.

4.2.1 Cadena Crítica (CCPM) versus Ruta o Camino Crítico (CPM)

Las principales diferencias entre CPM y CCPM se pueden observar en la Figura 2.

Figura 2

Características de CPM versus características de CCPM



Nota. Elaboración propia con base en Herroelen & Leus (2004). *Critical chain project scheduling: Do not oversimplify.* Goldratt (1997). *Critical Chain.* North River Press. Theory of Constraints Institute. (s. f.). *Five focusing steps – a process of ongoing improvement.* Leach (1999). *Critical Chain Project Management.* Artech House.

4.2.2 Dimensionamiento de buffers

En su formulación original, Goldratt propone una regla simple y práctica para dimensionar los buffers que es conocida comúnmente como la regla del 50 %. Bajo este enfoque, si se parte de estimaciones seguras de duración de las actividades, el buffer del proyecto se calcula como

aproximadamente la mitad de la suma de las protecciones eliminadas de la cadena crítica (Goldratt, 1997; Newbold, 1998).

De manera simplificada, si D_i^{safe} representa la duración segura de la actividad i y D_i^{aggr} su duración agresiva (o sin protección), entonces la protección removida es:

$$S_i = D_i^{safe} - D_i^{aggr} \quad (1)$$

El Project Buffer (PB) bajo la regla del 50 % puede expresarse como:

$$PB = 0,5 * \sum_{i \in CC} S_i \quad (2)$$

donde CC es el conjunto de actividades de la cadena crítica.

Los Feeding Buffers (FB) se calculan como:

$$FB_j = 0,5 * \sum_{i \in Chain_j} S_i \quad (3)$$

donde $Chain_j$ representa cada cadena que alimenta la cadena crítica.

Este enfoque es conocido en la literatura como SSQ (*Single Scheduling Queue*) o regla heurística de dimensionamiento simple, y ha sido ampliamente difundido por su facilidad de aplicación práctica en gerencia de proyectos (Leach, 1999; Newbold, 1998).

No obstante, diversos autores han señalado que esta regla puede resultar demasiado simplificada en contextos con alta variabilidad o con estructuras de red complejas (Herroelen & Leus, 2004). Como alternativa, se han propuesto métodos basados en principios estadísticos, en particular aquellos que consideran la raíz cuadrada de la suma de las varianzas de las actividades de la cadena:

$$PB = z * \sqrt{\sum_{i \in CC} \sigma_i^2} \quad (4)$$

donde σ_i es la desviación estándar de la duración de la actividad i y z es un factor asociado al nivel de servicio o confiabilidad deseada del cronograma (Ghaffari & Emsley, 2015; Herroelen & Leus, 2004).

Un planteamiento similar se utiliza para los *feeding buffers*.

Estos enfoques buscan ofrecer una base más rigurosa para el dimensionamiento de los buffers, especialmente en proyectos donde la incertidumbre es significativa y donde una simple regla porcentual puede no reflejar adecuadamente el riesgo real del cronograma.

4.2.3 Eliminación de multitarea y comportamiento humano

Otro aporte importante de CCPM es la idea de que la multitarea en recursos críticos tiene efectos altamente negativos sobre el tiempo de ejecución de los proyectos. Goldratt sostiene que la práctica de repartir el tiempo de un recurso clave entre múltiples tareas para que nadie espere conduce como sucede en la mayoría de proyectos, conduce paradójicamente a un aumento global en los plazos debido a interrupciones, tiempos de cambio de contexto y prolongación de las colas de espera.

4.3 Gestión del tiempo en proyectos predictivos

En los últimos años, la gerencia de proyectos ha evolucionado desde una visión centrada principalmente en el control técnico del alcance, el costo y el tiempo hacia un enfoque más amplio que incorpora elementos estratégicos, organizacionales y de creación de valor (Moreno-Monsalve et al., 2020). Bajo esta perspectiva, la gestión de proyectos deja de entenderse únicamente como la aplicación de metodologías y herramientas de planificación para convertirse en una disciplina que integra factores técnicos, humanos y organizacionales orientados al logro efectivo de los objetivos del proyecto y al fortalecimiento de la competitividad de las organizaciones (Moreno-Monsalve et al., 2020). En este contexto, la capacidad de aprendizaje organizacional, el trabajo colaborativo, el pensamiento sistémico y la gestión del conocimiento se reconocen como factores que contribuyen positivamente a la efectividad de los proyectos y al mejoramiento de su desempeño (Delgado-Ortiz & Moreno-Monsalve, 2023). De manera complementaria, diversos autores destacan que el desempeño de los proyectos depende no solo de la aplicación de metodologías de gestión, sino también del desarrollo de competencias organizacionales, del liderazgo, del trabajo en equipos de alto desempeño y de la

alineación estratégica de los proyectos con los objetivos de la organización (Moreno-Monsalve et al., 2020). Estas consideraciones permiten comprender que la evolución de la gerencia de proyectos ha abierto el camino para el desarrollo de metodologías que, además de optimizar la planificación tradicional, buscan mejorar el desempeño integral del proyecto mediante una visión sistémica, contexto en el cual se enmarca la aplicación de la TOC y la metodología CCPM.

En los proyectos con enfoque predictivo, la gestión del tiempo se basa en una planificación detallada de actividades, secuencias y duraciones. Sin embargo, varios estudios han evidenciado que existe una brecha significativa entre la planificación y la ejecución real de estos proyectos.

Metodologías como CPM y PERT presentan limitaciones en la práctica, especialmente en la gestión de la variabilidad y los recursos, aunque son conceptualmente robustas y son bastante usadas. Esto ha motivado el desarrollo de enfoques como CCPM, que integran estos elementos de manera explícita.

La gestión del tiempo comprende el conjunto de procesos orientados a planificar, secuenciar, estimar, desarrollar y controlar el cronograma del proyecto con el propósito de asegurar el cumplimiento de las fechas comprometidas. En los proyectos con enfoque predictivo, estas actividades se realizan desde las etapas iniciales de planificación y sirven como base para coordinar recursos, controlar el avance del proyecto y realizar seguimiento al desempeño temporal durante todo su ciclo de vida Project Management Institute. (2021).

No obstante, diversos estudios muestran que, aun cuando los cronogramas son elaborados utilizando técnicas ampliamente aceptadas, la incertidumbre inherente a la ejecución, las restricciones de recursos, la variabilidad de las actividades y las interrupciones operativas generan diferencias entre la planificación inicial y el comportamiento real del proyecto (Ghaffari & Emsley, 2015; Herroelen & Leus, 2004).

4.4 Restricciones, variabilidad y cuellos de botella en proyectos

Desde la perspectiva de la TOC, todo sistema posee al menos una restricción que limita su capacidad de alcanzar un mayor nivel de desempeño. En el contexto de la gestión de proyectos, esta restricción puede corresponder a un recurso crítico, una actividad, una dependencia tecnológica o cualquier elemento cuya capacidad resulte insuficiente para satisfacer la demanda del proyecto (Goldratt, 1990).

La combinación de recursos limitados, interdependencias y variabilidad genera cuellos de botella que condicionan la duración del proyecto. La TOC establece que el tiempo total está determinado por la restricción principal, por lo que su adecuada gestión es clave para mejorar el desempeño del sistema en su totalidad. Además de la variabilidad técnica, existen factores como la multitarea, las interrupciones y el exceso de trabajo en curso que incrementan la incertidumbre y afectan el flujo del proyecto.

En consecuencia, el objetivo no consiste en optimizar cada actividad de manera independiente, sino en administrar la restricción de forma que el flujo completo del proyecto se mantenga estable. Este principio constituye uno de los principales elementos diferenciadores entre CCPM y los enfoques tradicionales de programación, los cuales tienden a optimizar las actividades de manera individual sin considerar suficientemente el comportamiento global del sistema (Cox & Schleier, 2010; Goldratt, 1997).

4.5 Indicadores de eficiencia temporal (KPIs) en proyectos predictivos en donde se implementa

TOC/CCPM

La evaluación empírica de la eficiencia temporal en proyectos de carácter predictivo exige el uso de indicadores de desempeño (KPIs) que sean ampliamente reconocidos dentro del campo de la gerencia de proyectos. Según lo anterior, el *Earned Value Management (EVM)* se ha consolidado como uno de los marcos más utilizados para analizar el comportamiento del cronograma debido a que permite contrastar lo que se había planificado con lo que efectivamente se va ejecutando a lo largo del tiempo.

Dentro de la técnica de EVM se utilizan métricas clásicas como el *Planned Value (PV)*, el *Earned Value (EV)*, el *Schedule Variance (SV = EV – PV)* y el *Schedule Performance Index (SPI = EV/PV)*.

Aunque el EVM proporciona indicadores ampliamente utilizados para controlar el desempeño del cronograma, la presente investigación emplea como variable principal de análisis la eficiencia temporal del proyecto, entendida como la relación entre el tiempo planificado y el tiempo real de ejecución. Esta medida permite comparar de forma homogénea proyectos de distinta naturaleza y constituye una variable adecuada para evaluar el impacto de la aplicación de la TOC mediante CCPM sobre el desempeño temporal de proyectos con enfoque predictivo.

En consecuencia, los análisis estadísticos desarrollados en esta investigación toman como referencia indicadores derivados de la duración planificada y la duración real de los proyectos reportados en la literatura científica, permitiendo cuantificar objetivamente las diferencias observadas entre proyectos gestionados mediante metodologías tradicionales y aquellos en los que se implementó TOC a través de CCPM.

4.6 Estado del Arte sobre la aplicación de TOC y CCPM en proyectos con enfoque predictivo

Desde hace varias décadas, la gestión del tiempo en proyectos con enfoque predictivo ha sido uno de los temas más relevantes dentro de la gerencia de proyectos, debido a que, a pesar del uso extendido del método CPM como herramienta estándar de planificación, la evidencia empírica acumulada muestra que una proporción importante de este tipo de proyectos continúa presentando retrasos, desviaciones frente a lo planificado y dificultades para cumplir de forma confiable con las fechas de entrega. Esta situación ha impulsado la búsqueda de enfoques alternativos que permitan gestionar de mejor manera la incertidumbre, los recursos críticos y la protección temporal del cronograma. Dentro de estos modelos se destaca la aplicación de la TOC a la gestión de proyectos mediante el enfoque Critical Chain Project Management (CCPM), cuyos fundamentos se apoyan en los desarrollos de (Goldratt, 1990, 1997) y en su evolución hacia aplicaciones prácticas en proyectos

(Goldratt & Cox, 2004; Newbold, 1998), lo cual ha sido ampliamente documentado tanto en literatura académica como en fuentes aplicadas y de divulgación especializada (Cox & Schleier, 2010; Theory of Constraints Institute, s.f.).

Desde los años noventa hasta la actualidad, diversas investigaciones han comparado CPM y CCPM desde perspectivas cuantitativas, descriptivas, aplicadas y metodológicas, con el propósito de evaluar si principios como la centralización de la protección temporal mediante buffers, la reducción de la multitarea perjudicial y la gestión explícita de restricciones y variabilidad se traducen en mejoras del desempeño temporal de los proyectos con enfoque predictivo. En este sentido, revisiones teóricas han mostrado que TOC ha evolucionado como un marco de gestión orientado al control de sistemas complejos y al manejo de restricciones como elemento central del desempeño (Gupta & Boyd, 2008; Şimşit et al., 2014). A continuación, se sintetizan los principales estudios que sustentan esta investigación.

4.6.1 Evidencia empírica comparativa entre CPM y CCPM

Uno de los antecedentes empíricos más directos es el estudio de Araszkievicz (2017), quien analiza un conjunto de proyectos reales de construcción (programa) que pertenecen a un mismo programa de inversión y compara la duración obtenida mediante CPM con la duración resultante tras aplicar CCPM para cada uno de estos. Los resultados muestran reducciones consistentes en la duración total de los proyectos, lo cual constituye un cimientito bastante valioso para esta tesis, debido a que los datos pueden analizarse estadísticamente mediante observaciones emparejadas. Es así como el trabajo de Araszkievicz(2017) aporta evidencia concreta de que la lógica de protección centralizada mediante buffers y la reorganización del flujo de trabajo propuesta por CCPM deriva en mejoras reales del desempeño temporal, en línea con otros estudios que analizan la programación de proyectos bajo restricciones de recursos (Herroelen & Leus, 2004).

En la misma medida, Shurrab (2015) extiende el análisis al comparar tres métodos de programación: CPM, CCPM-SSQ y CCPM-C&PM, aplicados a un conjunto de 30 proyectos, cuyo aporte es importante porque permite al mismo tiempo contrastar CCPM frente a CPM y analizar diferencias entre variantes del enfoque de Cadena Crítica. Los resultados reportados muestran que, en general, las variantes de CCPM tienden a producir cronogramas más eficientes tanto en términos de tiempo como de costo. Desde el punto de vista metodológico, este estudio también resulta especialmente útil para esta investigación porque permite justificar el uso de técnicas estadísticas más robustas como el Análisis de Varianza ANOVA de medidas repetidas o pruebas no paramétricas como Friedman, al evaluar un mismo conjunto de proyectos bajo distintos métodos. Estos resultados son consistentes con estudios sobre programación y monitoreo de proyectos que destacan las limitaciones de los enfoques tradicionales (Ahuja & Thiruvengadam, 2004).

4.6.2 Confiabilidad del cronograma, buffers y variabilidad

Mientras Araszkievicz y Shurrab se enfocan principalmente en duración y costo, Kim et al (2021) amplían el análisis al incorporar la confiabilidad del cronograma. Este estudio combina encuestas a profesionales del sector construcción con simulaciones Monte Carlo aplicadas a redes de actividades en donde se compara CPM, que es un esquema clásico de *Critical Chain Scheduling*, y una versión adaptada de CCPM. Los resultados indican que algunos enfoques pueden reducir la duración planificada sin mejorar necesariamente la probabilidad de terminar a tiempo. Por el contrario, la variante de CCPM propuesta por los autores logra mantener duraciones competitivas, pero con niveles considerablemente más altos de confiabilidad, alcanzando probabilidades de finalización oportuna superiores al 90% en los escenarios simulados. Esto refuerza la idea de que la eficiencia temporal debe medirse tanto por la compresión del cronograma como por la capacidad del sistema para absorber variabilidad sin comprometer la fecha de entrega. Este enfoque ha sido complementado por estudios sobre dimensionamiento de buffers orientados a mejorar la robustez del cronograma (Chen et al, 2020).

Desde un enfoque más práctico, Anastasiu et al. (2023) presentan un estudio de caso en construcción residencial donde comparan la planificación tradicional basada en CPM con la ejecución real del proyecto con CCPM. Estos resultados muestran una reducción de la duración total del proyecto desde 187 días hasta 151 días, lo que equivale a una mejora cercana al 20% y a un consumo del buffer inferior al inicialmente planeado. Este trabajo es valioso para esta investigación más allá de la reducción cuantitativa porque muestra cómo el seguimiento del buffer y el uso de herramientas como el *Fever Chart* permiten controlar el proyecto desde una lógica sistémica que se basa en el comportamiento global del cronograma y no únicamente en tareas individuales.

4.6.3 Aportes críticos y advertencias metodológicas

Aunque la evidencia empírica es favorable en varios casos, la literatura también aclara que CCPM no debe entenderse como una solución simple o universal. Es por esto por lo que la investigación de Herroelen & Leus (2004) representa un aporte crítico fundamental para esta investigación debido a que cuestiona las aplicaciones bastante simplificadas del enfoque. Estos autores reconocen la importancia de incorporar restricciones de recursos y cuestionar la lógica tradicional de CPM, pero advierten que la determinación de la cadena crítica y la gestión de buffers exitosa dependen de problemas complejos de programación de proyectos con recursos limitados. Este planteamiento es relevante para esta tesis porque permite entender que las mejoras observadas con CCPM no son automáticas ni garantizadas, sino que dependen de una modelación correcta del proyecto, de la adecuada identificación de restricciones y de la coherencia entre la lógica de planificación y las condiciones reales de ejecución.

En términos más prácticos, Leach (1999) propone que uno de los principales aportes de CCPM es cambiar la forma en que se gestiona el cronograma. Según este autor, gran parte de la ineficiencia en proyectos tradicionales se presenta debido a la dispersión de la seguridad dentro de cada actividad, lo que favorece la aparición de prácticas negativas como la procrastinación, la multitarea y la expansión innecesaria del trabajo. Frente a esto, el autor propone concentrar la protección temporal en buffers

gestionados a nivel global del sistema, desplazando la gestión desde el control de tareas individuales hacia el control del flujo global del proyecto. Esta idea resulta importante porque ayuda a entender que CCPM no es solo una técnica de programación, sino una forma distinta de gestionar el tiempo del proyecto. Esta visión está alineada con los principios sistémicos de TOC (Goldratt, 1997) y su aplicación práctica en entornos organizacionales (Lean Production, s.f.; Ma et al., 2019).

De forma complementaria, Robinson & Richards (2010) resaltan que la implementación de CCPM implica también un cambio de paradigma organizacional, es decir, el valor del enfoque no se limita a la técnica de planificación, sino que incluye una redefinición de prioridades, criterios de control y formas de medir el avance de los proyectos. Esto explica por qué varios estudios positivos sobre CCPM también resaltan la necesidad de capacitación, cambio cultural y alineación organizacional para que sus beneficios puedan materializarse de manera constante.

4.6.4 Fragmentación de la literatura y necesidad de integración

Adicionalmente a los estudios comparativos y aplicados descritos anteriormente, la literatura más reciente ha evidenciado que la investigación sobre CCPM no se ha desarrollado de manera completamente uniforme, sino más bien de forma dispersa. En este contexto, Ghaffari & Emsley (2015), a partir de una revisión sistemática, indican que la producción académica en torno a CCPM ha ido evolucionando mediante aproximaciones de tipo introductorio, crítico, empírico y metodológico; sin embargo, el enfoque ha sido abordado desde distintas perspectivas, lo que ha dificultado su consolidación como un esquema integrado de gestión de proyectos. Esto resulta relevante, ya que permite entender que, a pesar de existir una base empírica favorable, la literatura todavía no ofrece con suficiente claridad un modelo conceptual y procedimental que permita integrar estos principios dentro del ciclo de vida de proyectos con enfoque predictivo. En otras palabras, se cuenta con evidencia sobre sus beneficios, pero no siempre con una guía estructurada para su aplicación.

Por su parte, Long & Ohsato (2008) muestran que varios desarrollos metodológicos asociados a CCPM han surgido como respuesta a limitaciones específicas del enfoque. Esto se observa especialmente en escenarios con incertidumbre, restricciones de recursos y necesidad de controlar el cronograma de forma más dinámica. Su propuesta de programación difusa evidencia que aún predominan soluciones parciales o especializadas, más que un modelo único y ampliamente aplicable. En la práctica, esto sugiere que, aunque la teoría ha avanzado y se ha ido ajustando con el tiempo, todavía persiste una necesidad clara de integrar estos desarrollos dentro de un marco metodológico más consistente. En la misma línea, revisiones recientes confirman que la investigación continúa expandiéndose sin una integración metodológica completa (De Oliveira Martins et al., 2025).

4.6.5 Tendencias actuales de investigación sobre TOC y CCPM

De manera transversal, la revisión de la literatura permite observar que la investigación sobre TOC y CCPM ha evolucionado desde el desarrollo de sus fundamentos conceptuales y los primeros métodos de programación hacia líneas que buscan responder a condiciones más complejas de la gestión de proyectos. Entre estas tendencias se encuentran el desarrollo de nuevos métodos para el dimensionamiento y gestión de buffers, la incorporación de restricciones de recursos e incertidumbre en la programación, el análisis de la robustez de los cronogramas, la gestión de entornos multiproyecto y la búsqueda de una mayor integración de CCPM con herramientas y prácticas contemporáneas de gestión de proyectos. Asimismo, investigaciones recientes muestran un interés creciente por analizar las aplicaciones empíricas de CCPM, sus condiciones de implementación y las brechas que todavía existen entre su desarrollo conceptual y su adopción práctica (Ghaffari & Emsley, 2015; Kim et al., 2021; Anastasiu et al., 2023; De Oliveira Martins et al., 2025). Estas tendencias muestran que el desarrollo actual de CCPM no se limita a los principios originalmente formulados por Goldratt, sino que continúa evolucionando hacia enfoques orientados a mejorar la robustez, adaptabilidad y aplicación práctica de la gestión temporal de los proyectos.

4.6.6 Síntesis crítica y posicionamiento de la presente investigación

En conjunto, los estudios revisados convergen en un punto central, el cual es básicamente que la aplicación de los principios de TOC y CCPM se asocia, en diferentes contextos y mediante distintas metodologías, con mejoras en el desempeño temporal de los proyectos con enfoque predictivo. La evidencia disponible muestra reducciones de duración, mejoras en la confiabilidad del cronograma, mejor uso de buffers y una lógica de control más orientada al flujo del sistema. Sin embargo, la literatura también deja claro que estos beneficios no deben interpretarse de forma automática ni simplista y que su efectividad depende de la correcta identificación de restricciones, de la calidad del modelado del proyecto, del manejo adecuado de recursos y de la disciplina organizacional necesaria para mantener el enfoque en la práctica.

Adicionalmente, aunque múltiples estudios empíricos han documentado mejoras en los tiempos de ejecución de proyectos cuando se aplican los principios de TOC y CCPM, se observa a partir del análisis de la literatura especializada que la investigación sobre esta teoría y este enfoque ha evolucionado a través de aproximaciones introductorias, críticas, empíricas y metodológicas (De Oliveira Martins et al., 2025; Ghaffari & Emsley, 2015), pero aún no se ha consolidado plenamente un modelo conceptual-procedimental unificado que permita integrar de forma aplicable estos principios dentro del ciclo de vida de proyectos con enfoque predictivo. Asimismo, aunque existen aportes empíricos y metodológicos importantes, la evidencia disponible sigue dispersa, lo cual dificulta su análisis bajo un marco común de validación comparativa y estadística, lo cual ha sido también abordado en literatura aplicada y técnica (Long & Ohsato, 2008; Zhang et al., 2016).

Es en este contexto que la presente investigación se posiciona como un esfuerzo por articular dos dimensiones complementarias. Por un lado, busca aportar evidencia cuantitativa rigurosa basada en pruebas de hipótesis y análisis estadístico que permita comparar el desempeño de CPM y distintas variantes de CCPM. Por otro lado, propone un modelo conceptual-procedimental que permite integrar

de forma estructurada los principios de TOC mediante el enfoque CCPM dentro del ciclo de vida de proyectos con enfoque predictivo. De este modo, esta investigación no solo pretende demostrar si existen mejoras significativas en términos de tiempo, sino también explicar bajo qué condiciones, con qué supuestos y mediante qué lógica de aplicación dichas mejoras pueden llevarse de forma coherente a la práctica en proyectos con enfoque predictivo, en coherencia con los fundamentos teóricos de TOC (Goldratt, 1990; Cox & Schleier, 2010).

4.7 Brecha de investigación identificada

A partir del análisis anterior, se identifican tres brechas principales en la literatura. La primera es una brecha metodológica, ya que no se encuentra suficientemente consolidado un modelo conceptual y procedimental que explique de forma clara, estructurada y aplicable cómo integrar los principios de TOC y CCPM dentro del ciclo de vida de proyectos con enfoque predictivo. La segunda es una brecha empírica, dado que, aunque existen múltiples estudios con resultados favorables, la evidencia sigue dispersa entre distintos sectores, contextos y diseños metodológicos, lo que dificulta su integración y comparación bajo un mismo marco analítico. Finalmente, también se observa una brecha conceptual o teórico-aplicada, porque CCPM ha sido tratado en la literatura unas veces como técnica de programación, otras como filosofía de gestión y otras como herramienta operativa, sin una articulación suficientemente integrada con los fundamentos sistémicos de la Teoría de Restricciones en el contexto específico de proyectos predictivos.

Estas limitaciones han sido señaladas también en estudios sobre prácticas de gestión de proyectos (White & Fortune, 2002). Por esta razón, la presente investigación busca contribuir al cierre de estas brechas mediante la formulación de un modelo conceptual-procedimental aplicado, verificado a partir de evidencia empírica proveniente de la literatura especializada.

5 Hipótesis

En esta investigación se plantean una hipótesis general, una hipótesis nula y tres sub hipótesis específicas, las cuales se formularon en base al marco teórico de la investigación y se describen enseguida.

5.1 Hipótesis General e Hipótesis Nula

❖ Hipótesis General (H1)

La aplicación de la TOC, operacionalizada mediante el enfoque CCPM, mejora significativamente la eficiencia temporal de proyectos con enfoque predictivo en comparación con metodologías tradicionales de planificación y control del cronograma, como el CPM.

❖ Hipótesis Nula (H0)

La aplicación de la TOC, mediante el enfoque CCPM, no produce mejoras significativas en la eficiencia temporal de proyectos con enfoque predictivo en comparación con metodologías tradicionales como CPM.

5.2 Subhipótesis Específicas

H1a: Los proyectos con enfoque predictivo gestionados mediante TOC-CCPM presentan una reducción estadísticamente significativa en la duración total de ejecución en comparación con proyectos equivalentes planificados mediante CPM.

Para efectos de la contrastación estadística de la hipótesis de investigación, se formularon las siguientes hipótesis estadísticas de acuerdo con las características de los conjuntos de datos analizados.

Para el conjunto de datos del artículo de investigación de Araszkiewicz (2017), se plantea una hipótesis direccional basada en diferencias pareadas:

$$H_{01}: \mu(\Delta Duracion) = 0 \quad (5)$$

$$H_{11}: \mu(\Delta Duracion) > 0 \quad (6)$$

En donde:

$$\Delta Duracion = Duracion CPM - Duracion CCPM \quad (7)$$

Para los datos del artículo de investigación de Shurrab (2015), dado que se comparan tres métodos (CPM, CCPM-SSQ, CCPM-C&PM), se formula una hipótesis global para ANOVA (*Analysis of Variance*) de medidas repetidas:

$$H_{02}: \mu(CPM) = \mu(CCPM - SSQ) = \mu(CCPM - C\&PM) \quad (8)$$

$$H_{12}: \text{Al menos una media difiere (Existe efecto del metodo de programación sobre la duracion)} \quad (9)$$

Es decir, si el ANOVA resulta significativo, el análisis *post-hoc* permite precisar si las diferencias ocurren principalmente entre CPM y las variantes CCPM y si existe diferencia entre las dos variantes.

5.3 Proposición metodológica del estudio

Es posible estructurar un modelo conceptual-procedimental basado en los principios de la TOC y su aplicación mediante CCPM, que permita integrar de forma clara, sistemática y aplicable estos principios dentro del ciclo de vida de proyectos con enfoque predictivo para optimizar su desempeño temporal.

6 Variables

De acuerdo con el problema de investigación, los objetivos planteados y las hipótesis formuladas, y para conectar el marco teórico de esta investigación con evidencia y de acuerdo a las hipótesis formuladas fue necesario definir un conjunto de variables que permitieran establecer la relación entre la aplicación de la TOC mediante la metodología CCPM y la eficiencia temporal de proyectos con enfoque predictivo. Estas variables fueron definidas a partir de la literatura especializada en gerencia de proyectos, TOC y CCPM, así como de las características de los estudios empíricos seleccionados para el análisis estadístico.

En este contexto, la variable independiente corresponde al método de programación del proyecto, representado por los enfoques tradicionales de programación y por la metodología CCPM. Como variable dependiente principal se estableció la eficiencia temporal del proyecto, la cual se analiza mediante indicadores relacionados con la duración de los proyectos, la diferencia entre métodos de programación y la reducción porcentual del tiempo de ejecución. De manera complementaria, se incorporaron variables asociadas con la confiabilidad del cronograma, la gestión de buffers, la presión por recursos compartidos y el nivel de incertidumbre o variabilidad esperada, con el propósito de aportar elementos que permitieran interpretar de forma integral los resultados obtenidos.

Las variables definidas en la investigación tuvieron tratamientos diferenciados de acuerdo con la disponibilidad y naturaleza de los datos. Algunas fueron utilizadas directamente en los análisis estadísticos inferenciales, mientras que otras cumplieron una función descriptiva, interpretativa o de apoyo para la estructuración del modelo conceptual-procedimental. Esta diferenciación se presenta en la Tabla 1.

La identificación de estas variables permitió definir los indicadores, técnicas e instrumentos empleados durante la investigación, así como establecer la correspondencia entre el marco teórico, las

hipótesis planteadas y el análisis estadístico desarrollado. La caracterización completa de cada una de las variables se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1.

Variables de investigación titulada: Aplicación de la Teoría de Restricciones para mejorar la eficiencia temporal en proyectos con enfoque predictivo: desarrollo de un modelo conceptual basado en evidencia experimental.

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Tipo	Función	Dimensiones	Indicadores	Técnica	Instrumento	Tratamiento en la investigación
Método de programación del proyecto	Enfoque técnico utilizado para planificar, secuenciar, ejecutar y controlar temporalmente las actividades del proyecto (PMI, 2021).	Se clasifica según el método reportado en cada estudio: CPM, CCPM, CCPM-SSQ y CCPM-C&PM.	Cualitativa nominal	Independiente	Enfoque tradicional / Enfoque TOC–CCPM	Método de programación empleado (CPM, CCPM, CCPM-SSQ, CCPM-C&PM)	Análisis documental comparativo	Matriz de extracción documental	Variable independiente utilizada para la conformación de los grupos o condiciones de comparación (CPM, CCPM, CCPM-SSQ y CCPM-C&PM) en los análisis estadísticos.
Eficiencia temporal del proyecto	Grado en que un proyecto logra ejecutarse en menor tiempo, con mayor estabilidad y confiabilidad del cronograma (Goldratt, 1997; Kim et al., 2021).	Se evalúa mediante duración total, diferencia de duración, reducción porcentual del tiempo y, cuando sea posible, indicadores de robustez y confiabilidad.	Cuantitativa continua	Dependiente principal	Rapidez de ejecución / Mejora comparativa / Confiabilidad temporal	Duración total, ΔDuración, % reducción del tiempo, evidencia de confiabilidad	Análisis estadístico de datos secundarios (t pareada, ANOVA y análisis descriptivo)	Matriz documental y tablas comparativas	Variable dependiente principal evaluada mediante los indicadores cuantitativos disponibles y complementada mediante análisis documental de indicadores de desempeño temporal.
Duración total del proyecto	Tiempo requerido para completar todas las actividades del proyecto desde su inicio hasta su terminación.	Número de días reportados para cada proyecto o red bajo cada método de programación.	Cuantitativa continua	Dependiente específica	No aplica	Duración total (días)	Extracción documental y comparación de medias relacionadas	Tabla de sistematización numérica	Sometida a contraste estadístico inferencial mediante t-test para muestras relacionadas y ANOVA de medidas repetidas, según la estructura de los datos analizados.
Diferencia de duración (ΔDuración)	Cambio absoluto en la duración del proyecto entre dos métodos de	ΔDuración = Duración CPM – Duración CCPM.	Cuantitativa continua	Dependiente específica	No aplica	Diferencia en días entre ambos métodos	Cálculo derivado y prueba t para muestras pareadas	Hoja de cálculo analítica	Calculada y analizada estadísticamente como medida de la

Aplicación de la Teoría de Restricciones para mejorar la eficiencia temporal en proyectos con enfoque predictivo: desarrollo de un modelo conceptual basado en evidencia experimental.

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Tipo	Función	Dimensiones	Indicadores	Técnica	Instrumento	Tratamiento en la investigación
	programación aplicados al mismo caso.								diferencia temporal entre los métodos comparados, particularmente en el análisis de muestras relacionadas. Utilizada principalmente para el análisis descriptivo e interpretación de la magnitud relativa de las diferencias observadas entre los métodos de programación.
Reducción porcentual del tiempo de ejecución	Magnitud relativa de la mejora temporal obtenida mediante CCPM respecto a CPM.	% Reducción = [(Duración CPM – Duración CCPM) / Duración CPM] × 100.	Cuantitativa continua	Dependiente específica	No aplica	% de reducción del tiempo de ejecución	Cálculo porcentual y estadística descriptiva	Tabla comparativa de indicadores	Utilizada como variable complementaria para el análisis documental, interpretación de resultados y sustentación del modelo; no fue sometida a contraste estadístico inferencial unificado.
Confiabilidad del cronograma o robustez temporal	Grado en que el cronograma mantiene estabilidad y probabilidad de cumplimiento frente a la incertidumbre.	Se identifica mediante evidencia reportada sobre robustez, cumplimiento de plazos o estabilidad del cronograma.	Mixta	Dependiente complementaria	Cumplimiento del plazo / Robustez / Estabilidad	Probabilidad de finalizar a tiempo, robustez reportada, estabilidad del cronograma	Análisis documental comparativo	Matriz de extracción documental	Utilizada como variable complementaria para el análisis documental y la estructuración del modelo conceptual-procedimental; no fue sometida a contraste estadístico inferencial.
Consumo y gestión de buffers	Uso de los buffers para absorber incertidumbre y proteger la fecha de finalización del proyecto.	Se registra cuando los estudios reportan tamaño, consumo o comportamiento de buffers.	Mixta	Dependiente complementaria	Project Buffer / Feeding Buffer / Buffer Management	Tamaño del buffer, consumo del buffer, evidencia de buffer management	Análisis documental descriptivo	Matriz de extracción documental	Utilizada como variable complementaria para el análisis documental y la estructuración del modelo conceptual-procedimental; no fue sometida a contraste estadístico inferencial.

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Tipo	Función	Dimensiones	Indicadores	Técnica	Instrumento	Tratamiento en la investigación
Presión por recursos compartidos	Grado en que múltiples actividades compiten por recursos limitados dentro del proyecto.	Se identifica mediante evidencia de recursos compartidos, multitarea o entornos multiproyecto.	Cualitativa ordinal/contextual	Variable de control o moderadora	Escasez de recursos / Interdependencia / Multitarea	Shared resources, drum resource, multi-project environment	Análisis de contenido documental	Matriz de sistematización	Utilizada como variable contextual o moderadora para interpretar los estudios analizados y estructurar el modelo; no fue sometida a contraste estadístico inferencial.
Nivel de incertidumbre o variabilidad esperada	Grado de exposición del cronograma a variaciones, perturbaciones y eventos inciertos.	Se identifica mediante referencias documentales a incertidumbre, variación de duraciones o necesidad de buffers.	Cualitativa ordinal/contextual	Variable de control o moderadora	Variación de duraciones / Riesgo temporal	Uncertainty, duration variation, necesidad de buffers	Análisis documental temático	Matriz de sistematización	Utilizada como variable contextual o moderadora para la interpretación documental y estructuración del modelo; no fue sometida a contraste estadístico inferencial.

Nota. Elaboración propia con base en las fuentes descritas en la descripción de las variables.

6.1 Justificación metodológica de elección de variables para esta investigación

La elección de estas variables está bien justificada porque responde directamente a la lógica causal de esta tesis, debido a que el método de programación es la intervención o condición comparada; la eficiencia temporal es el resultado de interés; y los indicadores derivados como duración, Δ Duración y % Reducción permiten medir ese resultado de forma objetiva, comparable y compatible con datos secundarios. Además, la literatura de CCPM apoya que el desempeño temporal no solo se refleja en menor duración, sino también en mayor confiabilidad, protección de la fecha final y gestión de buffers frente a incertidumbre y restricciones de recursos en proyectos con enfoque predictivo.

7 Diseño Metodológico

En este capítulo se presenta la metodología que orientó el desarrollo de la investigación. Se describen el enfoque del estudio, su alcance y limitaciones, el tipo de diseño metodológico, la población y muestra, los instrumentos utilizados y su validación y los procedimientos aplicados para la recolección, el análisis de la información y la validación del modelo propuesto.

7.1 Enfoque, alcance y limitaciones del estudio

Este estudio puede describirse como una investigación cuantitativa con apoyo cualitativo, es decir, mixta, basada en análisis secundario de datos. Es cuantitativa porque utiliza datos numéricos publicados para contrastar hipótesis mediante pruebas inferenciales como lo son t-test pareado y ANOVA de medidas repetidas, mientras que es cualitativa-descriptiva ya que permite interpretar los hallazgos empíricos a la luz de la Teoría de Restricciones, identificar patrones conceptuales y formular un modelo conceptual-procedimental coherente con la literatura y con la práctica de la gerencia de proyectos. Este tipo de enfoque ha sido ampliamente documentado en investigaciones que combinan análisis cuantitativo con interpretación cualitativa a partir de datos existentes (Creswell & Plano Clark, 2011; Heaton, 2004). El diseño se aproxima a un diseño comparativo ya que compara el desempeño temporal bajo CPM frente a enfoques CCPM en contextos donde la comparación es explícita.

El alcance de esta investigación se centra en la construcción de un modelo conceptual-procedimental que permita integrar los principios de la Teoría de Restricciones y del enfoque CCPM dentro de la gestión de proyectos con enfoque predictivo. Para su desarrollo se parte de la revisión crítica de literatura científica especializada y del análisis estadístico de resultados publicados en investigaciones previas, con el propósito de reunir evidencia suficiente que permita sustentar la propuesta planteada. El interés principal del estudio es comprender cómo la aplicación de estos principios influye sobre la eficiencia temporal de los proyectos y, a partir de ello, estructurar un modelo que pueda servir como guía para su aplicación en contextos similares. Debido a la naturaleza de la

investigación, el trabajo se apoya exclusivamente en información secundaria obtenida de artículos científicos, estudios de caso, tesis y otros documentos académicos especializados, por lo que no contempla la recolección de datos mediante trabajo de campo ni la aplicación directa del modelo en múltiples proyectos reales. En consecuencia, los resultados y conclusiones se limitan a proyectos con enfoque predictivo y al análisis de su desempeño temporal, sin abordar de manera específica otras dimensiones de la gestión de proyectos, como el alcance, el costo o la calidad, salvo cuando estas aportan elementos necesarios para interpretar la evidencia revisada.

En relación con la validación del modelo conceptual-procedimental, el alcance de esta investigación se limita a una validación conceptual y procedimental. Esta se realizó mediante el contraste del modelo con los principios de la TOC y la metodología CCPM, la evidencia empírica identificada en la literatura, los resultados del análisis estadístico y su aplicación a un caso de estudio ficticio de un proyecto con enfoque predictivo. En consecuencia, la validación desarrollada permite establecer la coherencia interna, el funcionamiento lógico y la aplicabilidad procedimental del modelo en un escenario simulado, pero no constituye una validación empírica de su efectividad en proyectos reales ni una validación externa mediante paneles de expertos. Estas formas de validación se consideran oportunidades para investigaciones posteriores.

7.2 Tipo y diseño metodológico

Esta investigación corresponde a un estudio de tipo aplicado, analítico y no experimental, con diseño documental-comparativo y de integración teórico-empírica. La investigación es aplicada porque busca generar un modelo útil para la práctica profesional de la gerencia de proyectos; es analítica porque compara críticamente enfoques y resultados; y es no experimental porque no manipula variables en un entorno real y controlado, sino que analiza datos secundarios ya existentes en la literatura científica.

Las variables definidas en la investigación se articulan con el diseño metodológico principalmente durante la fase de análisis estadístico de la evidencia empírica y, de manera complementaria, durante la síntesis documental y la formulación del modelo conceptual-procedimental. La variable independiente, método de programación del proyecto, toma como valores las categorías CPM, CCPM, CCPM-SSQ y CCPM-C&PM, de acuerdo con los métodos reportados en los estudios analizados. Las variables cuantitativas asociadas con la eficiencia temporal toman valores expresados principalmente en días de duración, diferencias de duración (Δ Duración) y porcentajes de reducción del tiempo de ejecución. Estas variables permiten realizar las comparaciones estadísticas entre los métodos de programación mediante las técnicas definidas para cada conjunto de datos. Por su parte, las variables complementarias relacionadas con confiabilidad del cronograma, gestión de buffers, presión por recursos compartidos e incertidumbre se utilizan principalmente para la interpretación de la evidencia documental y como soporte para la estructuración del modelo propuesto, de acuerdo con la información disponible en las fuentes analizadas.

El diseño metodológico combina tres fases, las cuales son como siguen:

- i. Fase de revisión y sistematización del estado del arte.
- ii. Fase de análisis estadístico de evidencia empírica disponible en artículos científicos.
- iii. Fase final de formulación y validación conceptual del modelo propuesto.

Este diseño es coherente con la naturaleza del problema investigado y con el objetivo de construir una propuesta metodológica sustentada tanto teóricamente como empíricamente. Desde el punto de vista temporal, el estudio es de corte transversal, ya que analiza información disponible en la literatura en un momento determinado, sin realizar seguimiento longitudinal de los casos. Este tipo de aproximación metodológica es consistente con investigaciones que utilizan revisión estructurada de literatura y análisis de evidencia para la construcción de conocimiento aplicado (Kitchenham, 2004; Tranfield et al., 2003).

7.3 Población, muestra e instrumentos

Población documental: Para efectos de esta investigación, la población de interés estuvo constituida por la literatura científica y técnica relacionada con la gestión temporal de proyectos con enfoque predictivo y, particularmente, con la aplicación de CPM, CCPM y la TOC. Debido a la naturaleza abierta y dinámica de la producción científica, este universo documental no corresponde a una población finita previamente conocida. Por esta razón, metodológicamente se trabajó con el corpus documental recuperado mediante la estrategia de búsqueda definida para la investigación.

La aplicación de las ecuaciones de búsqueda en las fuentes académicas seleccionadas permitió identificar inicialmente 241 registros, que constituyeron el corpus documental inicial. Después de eliminar 67 registros duplicados, se obtuvieron 174 publicaciones únicas, las cuales fueron sometidas a revisión de títulos y resúmenes. Posteriormente, 74 documentos fueron evaluados a texto completo y, después de aplicar los criterios de inclusión y exclusión establecidos, 32 estudios conformaron la muestra documental final de la investigación. De estos, los estudios de Shurrab (2015) y Araszkievicz (2017) proporcionaron datos cuantitativos con las características necesarias para los análisis estadísticos inferenciales.

La identificación de esta población documental se realizó mediante búsquedas sistemáticas en bases de datos científicas y académicas especializadas, empleando ecuaciones de búsqueda construidas a partir de operadores booleanos y de los principales conceptos asociados con el objeto de estudio. La ecuación general utilizada fue la siguiente:

("Theory of Constraints" OR TOC) AND ("Critical Chain Project Management" OR CCPM) AND ("Project Management" OR "Project Scheduling") AND ("Critical Path Method" OR CPM)

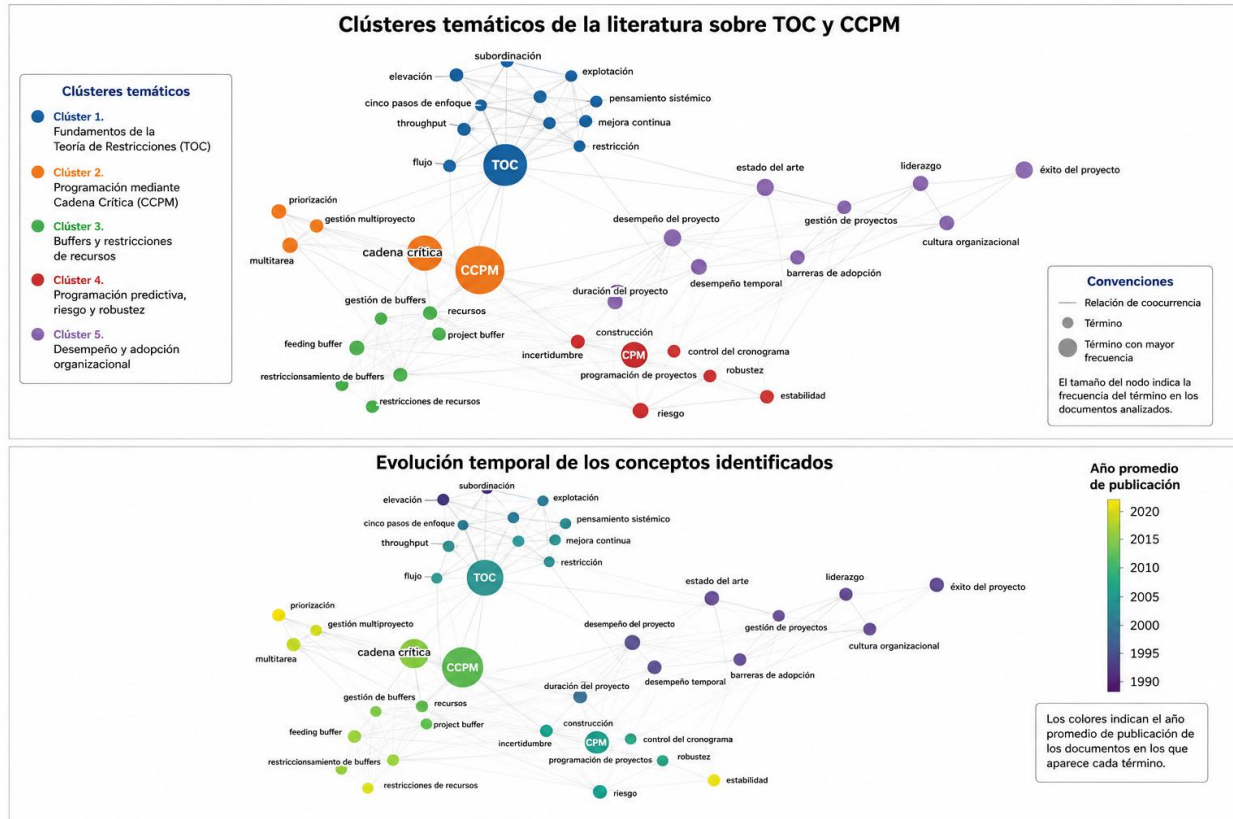
Complementariamente, durante el proceso de búsqueda se emplearon variaciones de esta ecuación utilizando términos como *buffer management*, *project performance* y *resource constrained project scheduling*, con el propósito de ampliar la cobertura de la literatura relevante.

Como resultado de la aplicación de la estrategia de búsqueda en las bases de datos científicas seleccionadas se identificaron inicialmente 241 publicaciones potencialmente relacionadas con el objeto de estudio. Posteriormente, luego de eliminar 67 registros duplicados, la población documental quedó conformada por 174 publicaciones únicas. Estas fueron sometidas a un proceso de revisión de títulos y resúmenes mediante la aplicación de los criterios de inclusión y exclusión establecidos para la investigación, obteniéndose 74 documentos para evaluación a texto completo. Después del análisis detallado de cada publicación, 32 estudios cumplieron los criterios metodológicos definidos para la investigación y conformaron la muestra final del estudio. Estas investigaciones constituyeron el soporte teórico, metodológico y empírico de la investigación. De ellas, únicamente los estudios desarrollados por Shurrab (2015) y Araszkievicz (2017) proporcionaron la información cuantitativa necesaria para la realización de los análisis estadísticos inferenciales mediante pruebas t para muestras relacionadas y ANOVA de medidas repetidas.

Con el propósito de complementar el análisis documental y facilitar la comprensión de la estructura conceptual de la literatura seleccionada, se realizó un análisis de coocurrencia temática a partir de los principales conceptos identificados durante la extracción y codificación de la información de los 32 documentos que conformaron la muestra final. Este análisis permitió identificar cinco clústeres temáticos que representan las principales líneas de investigación relacionadas con la aplicación de la TOC y la metodología CCPM en la gestión de proyectos. Los resultados de este análisis se observan en la figura 3.

Figura 3

Clústeres temáticos identificados en la literatura sobre TOC y CCPM



Nota. Elaboración propia con el software VOSviewer

Como se observa en la Figura 3, el análisis de coocurrencia temática permitió identificar cinco clústeres principales que reflejan la estructura conceptual de la literatura sobre la TOC y la metodología CCPM. Estos agrupan los fundamentos de TOC, la programación mediante CCPM, la gestión de buffers y restricciones de recursos, la programación predictiva con énfasis en el riesgo y la robustez, y el desempeño organizacional en la gestión de proyectos. Adicionalmente, la representación temporal de los conceptos evidencia la evolución de estas líneas de investigación a lo largo del tiempo, mostrando la transición desde estudios centrados en los fundamentos teóricos hacia investigaciones orientadas a su aplicación práctica y al mejoramiento del desempeño de los proyectos. En conjunto, ambos análisis

permiten visualizar de manera clara la organización temática y la evolución del conocimiento científico sobre el objeto de estudio.

Muestra y procedimiento de selección: La muestra documental final estuvo conformada por los 32 estudios que cumplieron los criterios de inclusión y exclusión establecidos después del proceso de identificación, depuración, revisión de títulos y resúmenes y evaluación a texto completo. La selección tuvo carácter intencional y no probabilístico, debido a que la inclusión de los documentos respondió a su pertinencia frente al problema y los objetivos de investigación, su aporte teórico o empírico y la disponibilidad de información útil para el análisis documental y, cuando correspondió, estadístico (Palinkas et al., 2015; Patton, 2002). Dentro de esta muestra, únicamente los estudios que proporcionaron datos cuantitativos comparables fueron utilizados para las pruebas inferenciales, mientras que el conjunto de los 32 estudios sirvió como base para la síntesis documental y la construcción del modelo conceptual-procedimental.

La búsqueda y selección de los documentos se llevó a cabo consultando diferentes bases de datos y fuentes académicas relacionadas con gerencia de proyectos, ingeniería y administración, entre ellas Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, SAGE Journals, Google Scholar, ResearchGate y algunas bibliotecas digitales universitarias. Durante este proceso se utilizaron diferentes combinaciones de palabras clave asociadas con la Teoría de Restricciones y el enfoque CCPM, por ejemplo, *Theory of Constraints*, *Critical Chain Project Management*, *CCPM*, *project scheduling*, *buffer management*, *project performance* y *resource constrained project scheduling*. Dependiendo del tipo de búsqueda, los términos fueron combinados mediante operadores como AND y OR para obtener resultados más relacionados con el tema estudiado. Además de artículos científicos, también se revisaron libros, revisiones de literatura y algunos documentos técnicos que aporten información útil para el análisis teórico, metodológico y empírico de la investigación.

Instrumento de recolección: Los principales instrumentos de recolección fueron dos matrices de extracción y sistematización documental diseñadas por el investigador tanto para las pruebas de hipótesis y análisis de datos de la investigación como para la formulación de modelo conceptual-procedimental de la investigación, las cuales permitieron registrar información bibliográfica, objetivos de cada estudio, enfoque metodológico, contexto de aplicación, variables analizadas, resultados empíricos, técnicas estadísticas utilizadas, aportes teóricos, hallazgos relevantes, limitaciones y contribuciones al modelo propuesto (Arksey & O'Malley, 2005). Adicionalmente, se utilizaron tablas comparativas para organizar datos numéricos provenientes de investigaciones previas y facilitar su análisis estadístico y su interpretación dentro del marco conceptual de la tesis.

Diseño y criterios de consistencia del instrumento: Las matrices de extracción y sistematización documental fueron diseñadas en función de los objetivos, variables y necesidades de información definidas para la investigación. Su estructura permitió organizar de manera homogénea la información extraída de los estudios seleccionados, incluyendo aspectos bibliográficos, metodológicos, conceptuales y empíricos necesarios para el análisis. Los campos incorporados se definieron tomando como referencia procedimientos utilizados en revisiones sistemáticas y análisis documentales, buscando mantener correspondencia entre la información recopilada y los objetivos del estudio. En consecuencia, las matrices fueron utilizadas como instrumentos de organización y sistematización documental y no fueron sometidas a un proceso de validación externa mediante juicio de expertos; su consistencia se estableció a partir de su alineación con las variables, categorías de análisis y procedimientos metodológicos definidos en la investigación.

Criterios de validez del proceso metodológico: La validez del proceso de recolección y análisis se sustenta en varios criterios. El primero de ellos es que se procuró fortalecer la pertinencia y consistencia del contenido mediante la selección de literatura científica relevante reconocida y directamente relacionada con el problema de investigación. El segundo es que se aplicó triangulación teórico-

metodológica, contrastando hallazgos conceptuales, evidencia cuantitativa y aplicaciones prácticas. El tercer criterio es que la coherencia interna entre problema, objetivos, hipótesis, variables, evidencia empírica y modelo propuesto funcione como criterio de consistencia metodológica. Finalmente, la revisión crítica de estudios con diferentes enfoques permitió fortalecer la robustez del análisis y la construcción del modelo conceptual.

Procedimientos de recolección y análisis de la información y de elaboración del modelo

conceptual: El procedimiento de recolección se desarrolló en varias etapas, las cuales son como siguen:

- i. Identificar y seleccionar la literatura científica relevante en función de su pertinencia con el problema investigado.
- ii. Leer cada documento de manera analítica y sistemática para extraer información conceptual, metodológica y empírica mediante la matriz de sistematización diseñada.
- iii. Clasificar los hallazgos por categorías temáticas, enfoques metodológicos, tipos de evidencia y resultados obtenidos.
- iv. Consolidar los datos cuantitativos disponibles en tablas comparativas para su análisis estadístico mediante pruebas t de dos colas y mediante ANOVA de medias repetidas.
- v. Contrastar las hipótesis planteadas en la investigación mediante las técnicas de estadística inferencial definidas de acuerdo con la estructura de los datos secundarios disponibles.

De manera complementaria, con la información recopilada se realizó un proceso de análisis e integración orientado a la construcción del modelo conceptual-procedimental. Para ello, se revisaron los elementos que aparecen de forma recurrente en la aplicación de la TOC y del enfoque CCPM, identificando prácticas, recomendaciones y algoritmos que han sido utilizados en distintos estudios para la programación de proyectos, la gestión de buffers y el control del cronograma. A partir de esta revisión, se organizaron estos aportes dentro de las diferentes fases del ciclo de vida de proyectos con enfoque predictivo, buscando que el modelo refleje una lógica clara y aplicable. Este proceso permitió

estructurar el modelo definiendo sus etapas, los elementos que intervienen en cada una y los criterios que orientan la toma de decisiones, procurando que todo esté alineado con la evidencia encontrada en la literatura.

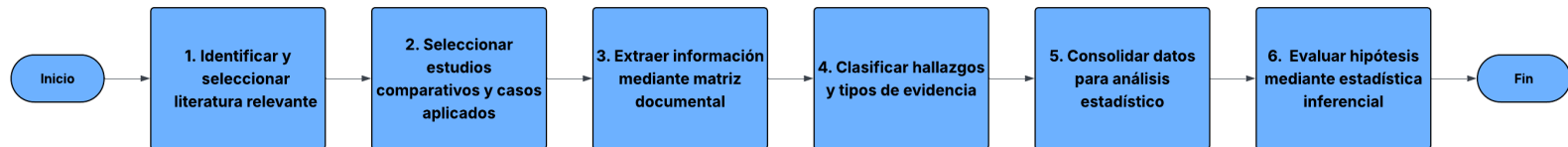
La validación del modelo propuesto se hizo revisando varios aspectos que permitan determinar si realmente tiene sentido tanto desde la teoría como desde su posible aplicación práctica. Inicialmente, se analizó si la lógica general del modelo mantiene coherencia con los principios de la TOC y con los elementos centrales del enfoque CCPM, especialmente en aspectos relacionados con restricciones, buffers y control del flujo del proyecto. Después, se comparó el comportamiento esperado del modelo con resultados encontrados en investigaciones previas, buscando identificar si las mejoras planteadas coinciden con lo que otros estudios han reportado en proyectos similares. Además de esto, se realizó una aplicación del modelo sobre un caso de estudio con tiempos, actividades y precedencias definidas, con el propósito de observar cómo se comporta el procedimiento propuesto en un escenario cercano a la realidad. Más que demostrar que el modelo es perfecto, lo que se busca es verificar que tenga coherencia, que pueda aplicarse de manera lógica y que sus resultados sean consistentes con la evidencia encontrada en la literatura revisada.

Finalmente, la información recolectada sirvió como base tanto para la elaboración de la síntesis crítica del estado del arte como para la formulación y sustentación del modelo propuesto, procurando que este mantenga coherencia interna y pueda ser comprendido y utilizado en contextos reales de gestión de proyectos.

El resumen de los procedimientos descritos anteriormente se puede observar en los diagramas de flujo de las figuras 4 y 5.

Figura 4

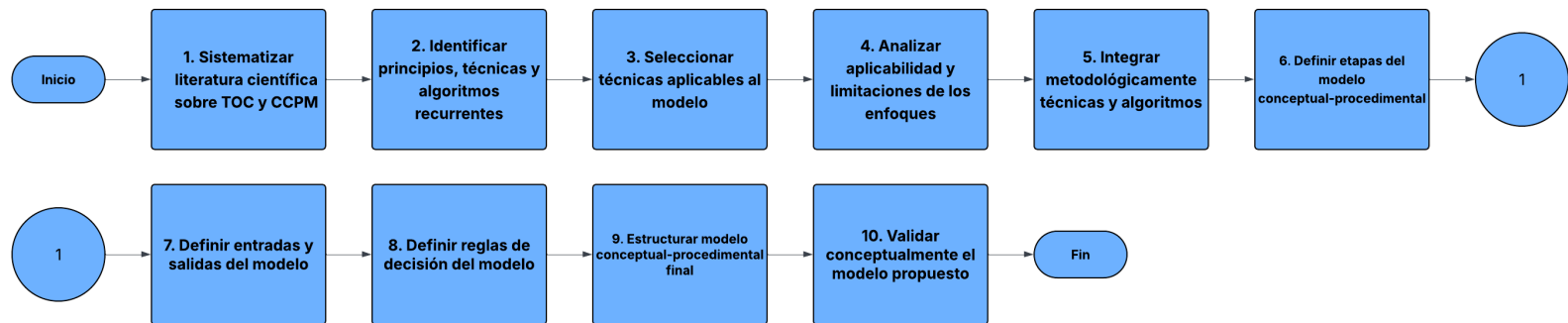
Diagrama de flujo procedimiento de recolección y análisis de la información



Nota. Elaboración propia

Figura 5

Diagrama de procedimiento de elaboración del modelo conceptual-procedimental



Nota. Elaboración Propia

1. Sistematizar literatura científica sobre TOC y CCPM

En esta etapa se realizó la búsqueda, identificación y organización de literatura científica relacionada con la aplicación de la Teoría de Restricciones y el enfoque CCPM en proyectos con enfoque predictivo. Para ello se consultaron bases de datos como Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, SAGE Journals, Google Scholar y ResearchGate. Las búsquedas se hicieron utilizando combinaciones de términos como *Theory of Constraints*, *Critical Chain Project Management*, *CCPM*, *project scheduling*, *buffer management* y *predictive projects*, usando operadores booleanos AND y OR según la necesidad de cada búsqueda. La información recopilada fue organizada en una matriz de sistematización documental.

2. Identificar principios, técnicas y algoritmos recurrentes

Después de organizar la literatura, se revisaron los estudios seleccionados para identificar elementos que aparezcan de manera repetida en la aplicación de TOC y CCPM. Esto incluye prácticas de programación, gestión de buffers, control del cronograma, manejo de restricciones, algoritmos de programación y enfoques de seguimiento utilizados por distintos autores.

3. Seleccionar técnicas aplicables al modelo

A partir de los elementos identificados previamente, se escogieron las técnicas y enfoques que presenten mayor coherencia con proyectos de naturaleza predictiva y con los objetivos de la investigación. La selección tuvo en cuenta aspectos como aplicabilidad, claridad metodológica, soporte empírico y posibilidad de integración dentro del modelo propuesto.

4. Analizar aplicabilidad y limitaciones de los enfoques

En esta fase se analizaron con mayor detalle las técnicas seleccionadas, evaluando sus ventajas, limitaciones y condiciones de aplicación. También se revisó cómo han sido implementadas en investigaciones previas y cuáles resultados han mostrado en diferentes contextos de proyectos.

5. Integrar metodológicamente técnicas y algoritmos

Las técnicas, principios y algoritmos seleccionados fueron organizados dentro de una lógica metodológica común. El objetivo de esta etapa es lograr que el modelo mantenga coherencia entre las diferentes fases del ciclo de vida del proyecto y que su estructura pueda aplicarse de manera práctica.

6. Definir etapas del modelo conceptual-procedimental

Posteriormente se establecieron las etapas generales que conformaron el modelo propuesto. Estas etapas representaron la secuencia lógica de aplicación de TOC y CCPM dentro de proyectos con enfoque predictivo.

7. Definir entradas y salidas del modelo

En esta etapa se identificaron los elementos necesarios para ejecutar cada fase del modelo, incluyendo información de entrada, resultados esperados y relaciones entre procesos.

8. Definir reglas de decisión del modelo

Se establecieron criterios y reglas de decisión que permitieron orientar la aplicación práctica del modelo, especialmente en aspectos relacionados con restricciones, buffers y control del cronograma.

9. Estructurar modelo conceptual-procedimental final

Con toda la información anterior se consolidó la versión final del modelo, integrando etapas, relaciones, entradas, salidas y reglas metodológicas dentro de una estructura coherente y aplicable.

10. Validar conceptualmente el modelo propuesto

Finalmente, el modelo fue contrastado con la evidencia empírica encontrada en la literatura y con los fundamentos teóricos de TOC y CCPM. Además, se revisó su coherencia lógica y su posible aplicabilidad en proyectos con enfoque predictivo.

Técnicas de análisis: Las técnicas de análisis combinaron procedimientos cualitativos y cuantitativos. En los procedimientos cualitativos se utilizaron análisis documental, categorización temática, síntesis crítica e interpretación teórica de la literatura especializada. En las técnicas cuantitativas se aplicaron técnicas de estadística inferencial y análisis comparativo de datos secundarios provenientes de estudios previos, incluyendo pruebas de hipótesis para muestras relacionadas, análisis de diferencias entre métodos de programación y, cuando sea pertinente, ANOVA de medidas repetidas o pruebas no paramétricas como Friedman. Adicionalmente, se utilizó análisis descriptivo de indicadores de desempeño temporal y comparación de métricas como duración total, confiabilidad del cronograma, uso de buffers y KPIs de control temporal. La investigación uso hoja de cálculo para la aplicación de estadística inferencial y análisis comparativo de datos en softwares como Microsoft Excel o Google Sheets complementándolos cuando aplique con software estadístico especializado como Minitab o SPSS.

7.4 Trabajo empírico con fuentes secundarias

La presente investigación no incluyó trabajo de campo primario ni recolección directa de información mediante encuestas, entrevistas, observaciones o experimentos realizados por el investigador. El componente empírico se desarrolló mediante el análisis secundario de datos cuantitativos publicados en investigaciones científicas previamente seleccionadas. Dentro de la muestra documental final de 32 estudios, únicamente los trabajos de Araszkiewicz (2017) y Shurrab (2015) proporcionaron información cuantitativa con el nivel de detalle y la estructura necesarios para realizar los análisis estadísticos inferenciales planteados en esta investigación.

El procedimiento comenzó con la extracción de los datos numéricos reportados en ambos estudios y su registro en las matrices de sistematización diseñadas para la investigación.

Posteriormente, los datos fueron revisados y depurados con el propósito de verificar su correspondencia con las condiciones de programación analizadas, identificar la estructura de las observaciones y conservar la relación entre cada dato y su fuente original. Para garantizar la trazabilidad, los valores utilizados en los análisis se mantuvieron vinculados con el artículo, caso, proyecto o red de procedencia y con el método de programación bajo el cual fueron reportados. A partir de estos datos se calcularon, cuando correspondió, indicadores derivados como la diferencia de duración (Δ Duración) y el porcentaje de reducción del tiempo de ejecución, sin modificar los valores originales reportados por los autores.

La selección de las técnicas estadísticas respondió a la estructura de los datos disponibles y no a la ejecución de un diseño experimental propio. En los datos de Araszkiewicz (2017), las duraciones bajo CPM y CCPM corresponden a observaciones relacionadas sobre los mismos casos, razón por la cual se utilizó una prueba t para muestras relacionadas. Para su aplicación se consideraron los supuestos asociados con la naturaleza cuantitativa de la variable, la correspondencia entre las observaciones emparejadas y la distribución de las diferencias entre pares. En el conjunto de datos de Shurrab (2015), los mismos casos fueron evaluados bajo tres condiciones de programación CPM, CCPM-SSQ y CCPM-C&PM, por lo que se utilizó ANOVA de medidas repetidas para evaluar diferencias globales entre las condiciones relacionadas. Cuando los supuestos requeridos para la prueba paramétrica no pudieron sostenerse adecuadamente, se utilizó la prueba de Friedman como alternativa no paramétrica para datos relacionados.

La comparabilidad de los datos se estableció dentro de cada conjunto de datos y no mediante la combinación directa de los estudios de Araszkiewicz (2017) y Shurrab (2015). Cada análisis conservó la estructura, unidad de análisis y condiciones metodológicas del estudio del cual procedían los datos. Por esta razón, los resultados obtenidos permiten evaluar estadísticamente las diferencias entre métodos de

programación dentro de los conjuntos de datos analizados, pero no deben interpretarse como una estimación experimental propia ni como evidencia directamente generalizable a todos los proyectos con enfoque predictivo.

Finalmente, el análisis secundario presenta limitaciones derivadas de trabajar con información generada bajo diseños desarrollados por otros investigadores. No fue posible controlar las condiciones originales de obtención de los datos, modificar las variables consideradas por los estudios, estandarizar completamente sus contextos de aplicación ni incorporar indicadores que no hubieran sido reportados por las fuentes originales. En consecuencia, los análisis estadísticos realizados en esta investigación corresponden a una reanálisis de evidencia empírica publicada y sus resultados fueron interpretados conjuntamente con la síntesis documental de los demás estudios de la muestra, reconociendo expresamente estas limitaciones.

8 Aplicación de la metodología de la investigación y resultados

En este capítulo se describe la aplicación de la metodología planteada para la investigación, mostrando el desarrollo de cada una de sus etapas y los principales resultados obtenidos a partir del análisis de la evidencia recopilada y de la construcción del modelo propuesto.

8.1 Desarrollo del procedimiento de recolección y análisis de datos de ejecución de proyectos con enfoque predictivo con enfoques CPM y CCPM.

8.1.1 Identificar y seleccionar literatura relevante

Se realizó una búsqueda sistemática de literatura científica relacionada con la Teoría de Restricciones (TOC), la metodología Critical Chain Project Management (CCPM), la programación de proyectos mediante Critical Path Method (CPM), la gestión de buffers y la eficiencia temporal en proyectos de carácter predictivo. La consulta se efectuó en bases de datos académicas reconocidas como Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, Taylor & Francis, MDPI, IEEE Xplore y Google Scholar, con el propósito de identificar investigaciones de alta calidad metodológica y relevancia para los objetivos de la investigación.

Para garantizar la trazabilidad y reproducibilidad del proceso de búsqueda, se emplearon combinaciones de palabras clave y operadores booleanos, entre las cuales tenemos:

- Theory of Constraints AND Critical Chain Project Management
- TOC AND CCPM
- Critical Chain Project Management AND Construction
- Critical Chain Project Management AND Project Scheduling
- Critical Chain AND Project Performance
- CPM AND CCPM AND Comparison
- Critical Path Method AND Critical Chain Project Management

- CPM vs CCPM
- Project Scheduling AND Resource Constraints
- Buffer Management AND CCPM
- Theory of Constraints AND Construction Projects
- Predictive Projects AND TOC AND CCPM
- Construction Project Management AND Critical Chain
- Project Duration Reduction AND CCPM
- Resource-Constrained Project Scheduling AND CCPM

La selección de documentos se realizó considerando criterios de inclusión relacionados con la pertinencia temática, el rigor metodológico, la actualidad de la publicación, el reconocimiento científico de la fuente y la disponibilidad de resultados aplicables al análisis de la investigación. Como resultado de este proceso se identificaron artículos científicos, estudios empíricos, revisiones sistemáticas y casos aplicados que permitieron construir el marco conceptual y empírico de la investigación.

8.1.2 Seleccionar estudios comparativos y casos aplicados

Una vez identificada la literatura relevante, se seleccionaron aquellos estudios que presentaban comparaciones directas entre el método tradicional Critical Path Method (CPM) y la metodología Critical Chain Project Management (CCPM), así como también investigaciones que reportaran aplicaciones prácticas de la Teoría de Restricciones en proyectos con enfoque predictivo reales, especialmente en el sector de la construcción y en entornos con restricciones de recursos.

La revisión permitió clasificar los documentos en dos grupos principales, de los cuales el primero de ellos correspondió a investigaciones de carácter conceptual y metodológico, utilizadas para sustentar los fundamentos teóricos de TOC, CCPM, la gestión de buffers y la programación de proyectos, mientras que el segundo grupo estuvo conformado por estudios empíricos que reportaban resultados

cuantificables asociados a la implementación de CCPM, incluyendo indicadores de duración, costo y desempeño del proyecto.

La selección de estos estudios respondió a su capacidad para proporcionar evidencia cuantitativa directamente relacionada con las hipótesis de investigación, permitiendo evaluar de forma objetiva el efecto de la aplicación de TOC y CCPM sobre la eficiencia temporal de proyectos con enfoque predictivo.

8.1.3 Extraer información mediante matriz documental

Después de identificar y seleccionar la literatura relevante y seleccionar los estudios comparativos y estudios aplicados relacionados con la temática de esta investigación como se describe en los dos numerales anteriores, se obtuvo la matriz documental en la tabla 2.

Tabla 2.

Matriz extracción documental de artículos y estudios aplicados relacionados con la temática de la investigación.

Artículo	Tipo de estudio	Aporte al tema TOC/CCPM	Datos disponibles para análisis estadístico	Utilidad para la investigación
AlNasseri (2015)	Tesis doctoral empírica sobre planeación y programación en construcción	Ayuda a contextualizar la importancia de la planificación y programación en proyectos de construcción.	No presenta comparación directa CPM vs CCPM.	Útil para marco contextual, no para t-test/ANOVA.
Anastasiu et al. (2023)	Estudio aplicado/experimental en construcción	Evidencia práctica de reducción de tiempo mediante CCPM en actividades de acabados de construcción.	Reporta comparación general de duración CPM/CCPM, pero no una muestra suficiente de pares independientes para inferencia robusta.	Muy útil como evidencia empírica complementaria, no como base principal de pruebas.
Araszkiewicz (2017)	Estudio de caso multiproyecto en construcción	Compara cronogramas CPM y CCPM en diez proyectos de construcción con recursos compartidos.	Sí. Presenta duración CPM y duración CCPM para 10 proyectos.	Artículo óptimo para t-test pareado, porque cada proyecto se evalúa bajo dos métodos comparables.
Ahuja & Thiruvengadam (2004)	Revisión del estado de investigación sobre programación y monitoreo	Sitúa el problema de la programación de proyectos y la necesidad de mejores métodos de control.	No ofrece base numérica CPM vs CCPM.	Útil para antecedentes, no para hipótesis estadísticas.
Chen et al. (2020)	Estudio metodológico sobre buffers CCPM	Propone un método de dimensionamiento de buffers mediante descomposición de redes.	Puede incluir modelación, pero no una matriz comparativa simple CPM/CCPM lista para t-test o ANOVA.	Útil para sustentar buffers, no como dataset principal.
De Oliveira Martins et al. (2025)	Revisión sistemática de literatura	Sintetiza aplicaciones empíricas y tendencias recientes de CCPM.	No genera datos primarios comparables CPM/CCPM.	Muy útil para justificar brecha investigativa y estado del arte.
Ghaffari & Emsley (2015)	Revisión crítica del estado de CCPM	Explica avances, limitaciones y potencial futuro de CCPM.	No contiene datos experimentales reutilizables para pruebas de hipótesis.	Útil para marco teórico y discusión.
Gupta & Boyd (2008)	Artículo teórico sobre TOC en operaciones	Fundamenta TOC como teoría de gestión de operaciones.	No contiene datos de duración de proyectos.	Útil para sustento conceptual de TOC, no para análisis estadístico.
Herroelen & Leus (2004)	Revisión sobre programación robusta y reactiva	Aporta base sobre incertidumbre, robustez y necesidad de buffers.	No presenta comparación cuantitativa CPM/CCPM aplicable.	Útil para justificar incertidumbre y variabilidad.
Kim et al. (2021)	Estudio metodológico/aplicado sobre scheduling robusto CCPM	Propone programación crítica robusta mediante extracción de buffers.	Puede contener resultados de validación, pero no una estructura directa de pares CPM/CCPM comparable para la hipótesis central.	Útil como soporte técnico sobre buffers.
Leach (1999)	Artículo aplicado sobre desempeño CCPM	Sostiene que CCPM mejora el desempeño del proyecto.	No ofrece matriz de datos amplia y reutilizable.	Útil como antecedente clásico de CCPM.
Long & Ohsato (2008)	Artículo metodológico con enfoque fuzzy CCPM	Desarrolla CCPM bajo restricciones de recursos e incertidumbre.	No es ideal para t-test/ANOVA porque el foco es modelación fuzzy.	Útil para ampliar discusión metodológica.
Ma et al. (2019)	Artículo sobre cronogramas con escenarios de retrabajo	Aporta al análisis de incertidumbre y reprogramación en construcción.	No ofrece comparación directa CPM/CCPM alineada con tus hipótesis.	Útil como evidencia sobre variabilidad y retrabajo.

Artículo	Tipo de estudio	Aporte al tema TOC/CCPM	Datos disponibles para análisis estadístico	Utilidad para la investigación
Robinson & Richards (2010)	Artículo/conferencia de motivación y overview de CCPM	Explica fundamentos y ventajas de CCPM.	No contiene dataset empírico suficiente.	Útil para marco conceptual.
Shurrab (2015)	Estudio comparativo CPM vs CCPM	Compara CPM, CCPM-SSQ y CCPM-C&PM en múltiples redes/proyectos.	Sí. Presenta duración y costo bajo tres métodos para las mismas redes.	Artículo óptimo para ANOVA de medidas repetidas, porque cada red se analiza bajo tres condiciones.
Şimşit et al. (2014)	Revisión de literatura sobre TOC	Organiza aplicaciones y evolución de TOC.	No contiene datos comparativos CPM/CCPM.	Útil para marco teórico.
White & Fortune (2002)	Estudio empírico sobre práctica en gestión de proyectos	Muestra prácticas reales de gestión de proyectos.	No compara CPM y CCPM.	Útil para justificar problemas prácticos de gestión.
Zhang et al. (2016)	Artículo metodológico sobre tamaño de buffer	Propone dimensionamiento de buffer con base en restricción de recursos.	No entrega dataset directo CPM/CCPM para pruebas.	Útil para fundamentar el componente técnico de buffers.

Nota. Elaboración propia con base en artículos obtenidos en la búsqueda correspondiente.

8.1.4 Clasificar hallazgos y tipos de evidencia

Después de revisar la literatura científica seleccionada, se identificó que la mayoría de los artículos aportan principalmente al sustento teórico, conceptual y metodológico de la investigación, especialmente en relación con la TOC, la gestión de buffers, la incertidumbre en la programación y las diferencias entre CPM y CCPM. Sin embargo, no todos los estudios contienen datos cuantitativos directamente reutilizables para probar las hipótesis mediante estadística inferencial. En este sentido, los artículos de Araszkiewicz (2017) y Shurrab (2015) son los únicos que ofrecen una estructura de datos suficientemente clara y comparable. El primero de estos artículos permite aplicar una prueba t pareada al comparar la duración de los mismos proyectos bajo CPM y CCPM, mientras que el segundo permite desarrollar un ANOVA de medidas repetidas al evaluar las mismas redes bajo tres métodos de programación. Por esta razón, estos dos estudios constituyen la base empírica principal para comprobar las hipótesis de la investigación. La clasificación de hallazgos y de los tipos de evidencia se realizó en la matriz de extracción documental de la tabla 2.

8.1.5 Consolidar datos para análisis estadístico

El proceso de consolidación de los datos inició con la revisión y síntesis del estudio de Araszkiewicz (2017), con el propósito de identificar y organizar la información cuantitativa requerida para el desarrollo de los análisis estadísticos planteados en la investigación.

8.2 Síntesis del artículo de investigación Application of Critical Chain Management in Construction Projects Schedules in a Multi-Project Environment: a Case Study de Araszkiewicz (2017).

El artículo de Araszkiewicz (2017) presenta un estudio de caso aplicado al sector de la construcción, cuyo objetivo principal es comparar el desempeño de la programación tradicional basada en el Método Critical Path (CPM) con la programación basada en Critical Chain Project Management (CCPM), en un entorno multiproyecto. El análisis se realiza sobre un programa real de inversión que

incluye diez proyectos de construcción de marinas ubicadas en el noroeste de Polonia, los cuales comparten recursos críticos y se ejecutan de manera parcialmente simultánea.

La autora reconstruye los cronogramas originales de los diez proyectos del programa en estudio utilizando el enfoque CPM y posteriormente los reprograma conforme a los principios de la Teoría de Restricciones a través de la metodología CCPM. El proceso que realizaron los autores incluye la identificación de recursos críticos, la eliminación de reservas locales en las actividades, la introducción de buffers de proyecto y la sincronización de los proyectos alrededor del recurso limitante o restricción. El análisis se realiza en la fase de planeación, con el objetivo de evaluar el impacto potencial de CCPM sobre la duración de los proyectos y del programa completo.

Los resultados del estudio muestran, para cada uno de los diez proyectos, la duración total estimada bajo CPM y la duración estimada tras la aplicación de CCPM, así como el tamaño del buffer de proyecto asignado como se muestra en la figura 6.

Figura 6

Datos de la duración de los 10 proyectos del artículo de Araszkiewicz(2017) en días bajo el enfoque CPM y el enfoque CCPM en días y tamaño de los Buffers de los proyectos en días.

Krystyna Araszkiewicz / Procedia Engineering 182 (2017) 33 – 41

Table 1. Modification of projects schedules.

Project	Duration of project CPM (<i>days</i>)	Duration of project CCPM (<i>days</i>)	Project buffer size (<i>days</i>)
Project 1	181	117	39
Project 2	100	88.5	29
Project 3	496	413	135
Project 4	320	240	80
Project 5	327	256	85.5
Project 6	375	279	93
Project 7	310	232.5	77.5
Project 8	102	75	26
Project 9	275	208.5	69.5
Project 10	240	172	58

Nota. Datos tomados del artículo: Araszkiewicz, K. (2017). Application of Critical Chain Management in construction projects schedules in a multi-project environment: A case study. *Procedia Engineering*, 182, 33–41.

8.2.1 Principales conclusiones del estudio

A partir del análisis comparativo, Araszkiewicz (2017) concluye que la aplicación de CCPM en un entorno multiproyecto de construcción permite una reducción significativa de los tiempos de ejecución, tanto a nivel de proyectos individuales como del programa en su conjunto. Se puede observar

fácilmente que los cronogramas basados en CCPM presentan duraciones menores que aquellos desarrollados con CPM, aun considerando la incorporación explícita de buffers de protección.

El estudio destaca que estas mejoras se deben principalmente a una mejor sincronización del uso de los recursos críticos, a la reducción de la multitarea y a una gestión más estructurada de la incertidumbre mediante buffers centralizados. Asimismo, la autora indica que CCPM facilita una visión integrada del programa, permitiendo priorizar proyectos y reducir conflictos por recursos compartidos, lo cual resulta especialmente relevante en contextos de construcción donde los retrasos tienen consecuencias financieras y contractuales significativas como es bien conocido.

8.2.2 Evaluación de hipótesis mediante estadística inferencial y análisis de datos del artículo de investigación Application of Critical Chain Management in Construction Projects Schedules in a Multi-Project Environment: a Case Study de Araszkiewicz (2017).

En este apartado se analiza el estudio de Araszkiewicz (2017) con el propósito de verificar la pertinencia de los datos reportados para su utilización en el análisis estadístico de la investigación, particularmente mediante la aplicación de una prueba t para muestras relacionadas.

❖ Pertinencia de los datos del artículo de Krystyna Araszkiewicz (2017) para la aplicación de un t-test pareado

Los datos presentados por Araszkiewicz (2017) son particularmente adecuados para la aplicación de una prueba t pareada en el contexto de esta investigación por varias razones metodológicas fundamentales. La primera de ellas es que cada proyecto constituye una misma unidad de análisis evaluada bajo dos condiciones distintas, las cuales son programación mediante CPM y programación mediante CCPM. Esto genera pares naturales de observaciones directamente comparables, donde la variabilidad propia de cada proyecto queda controlada al analizar la diferencia entre ambos métodos.

En segundo lugar, la variable de interés que es la diferencia en la duración del proyecto ($\Delta = \text{CPM} - \text{CCPM}$) es una variable cuantitativa continua medida en días, lo cual cumple con los requisitos básicos para la aplicación de un test t de Student. Además, el tamaño de la muestra ($n = 10$) es consistente con el uso de una prueba t pareada, especialmente cuando el objetivo es evaluar si la reducción promedio es significativamente mayor que cero, como se plantea en la hipótesis que se va a usar en esta tesis.

Finalmente, el planteamiento teórico que sustenta esta investigación que está basado en la Teoría de Restricciones establece una expectativa direccional clara que es como sigue: La aplicación de CCPM debería reducir los tiempos de ejecución en comparación con CPM. Lo anterior justifica el uso de una prueba de hipótesis unilateral mediante la alineación de la formulación estadística con la teoría de TOC y CCPM y los objetivos de la investigación. En este sentido, los datos de Araszkiewicz (2017) no solo permiten realizar un análisis descriptivo, sino que proporcionan una base empírica sólida para la aplicación de inferencia estadística mediante un t-test pareado unilateral, reforzando la validez de los resultados obtenidos y permitiendo validar las hipótesis formuladas.

❖ **t-test pareado sobre la diferencia en duración de los proyectos en estudio con los enfoques CMP y CCPM (Δ Duración)**

Para realizar los t test con los datos del artículo de investigación de Araszkiewicz (2017) se tiene la tabla 3 con los datos de la figura 6 y en la cual se calculan la diferencia neta y porcentual de las duraciones usando los dos métodos de programación para los 10 proyectos del programa del artículo de investigación.

Tabla 3.

Dataset de la duración de los 10 proyectos del artículo de Araszkieicz(2017) en días bajo el enfoque CPM

y el enfoque CCPM en días calculando las variables delta duration y % of reduction

Modification of Project Schedules Article: Application of Critical Chain Management in Construction Projects Schedules in a Multi-Project Environment: a Case Study by Krystyna Araszkieicz (2017).				
Project	Duration of project CPM (Days)	Duration of project CCPM (Days)	$\Delta\text{Duration} = \text{CMP Duration} - \text{CCPM Duration}$	% of Reduction
Project 1	181	117	64	35,36%
Project 2	100	88,5	11,5	11,50%
Project 3	496	413	83	16,73%
Project 4	320	240	80	25,00%
Project 5	327	256	71	21,71%
Project 6	375	279	96	25,60%
Project 7	310	232,5	77,5	25,00%
Project 8	102	75	27	26,47%
Project 9	275	208,5	66,5	24,18%
Project 10	240	172	68	28,33%
AVERAGES			64,45	23,99%
STANDARD DEVIATIONS			25,86	6,44%

Nota. Elaboración propia con base en datos del artículo correspondiente de Araszkieicz (2017).

❖ **T test pareada sobre la diferencia en duración ($\Delta\text{Duration}$)**

La variable número uno de análisis se define de la siguiente manera

$$\Delta_i = \text{CMP}_i - \text{CCPM}_i \text{ (Dias)} \quad (11)$$

Hipótesis para verificar

$$H_0 : \mu_{\Delta} = 0 \text{ (CCPM no reduce la duración de los proyectos en promedio)} \quad (12)$$

$$H_1 : \mu_{\Delta} > 0 \text{ (CCPM reduce la duración de los proyectos en promedio)} \quad (13)$$

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Estadísticos de la duración en días de los 10 proyectos

$$\bar{\Delta} = 64,45 \text{ días}$$

$$S_{\Delta} = 25,86 \text{ días}$$

$$n = 10$$

Cálculo del estadístico t

$$t = \frac{\bar{\Delta} - 0}{\frac{s_{\Delta}}{\sqrt{n}}} = \frac{64,45}{\frac{25,86}{\sqrt{10}}} \approx 7,88$$

Los grados de libertad son como siguen

$$\nu = n - 1 = 9$$

El valor P(Unilateral) en tablas de valores críticos de la distribución t, con un t de 7,88 y 9 grados de libertad corresponde a 0,00001246

Al ejecutar la misma prueba t test en el software estadístico Minitab se obtuvo el resultado que se muestra en la figura 7

Figura 7.

Resultados T test pareada sobre la diferencia en duración (Δ Duration) realizados en el software estadístico Minitab.

Descriptive Statistics

	N	Mean	StDev	SE Mean	95% Lower Bound for μ
Δ Duration	10	64,45	25,86	8,18	49,46

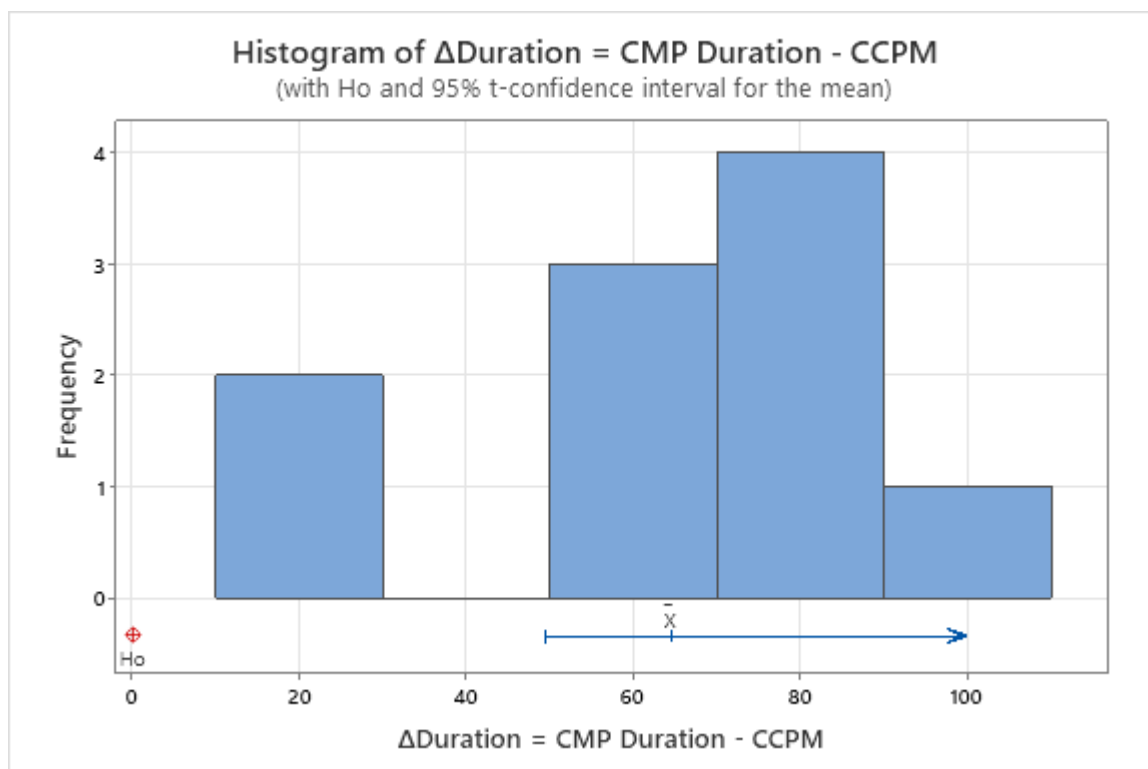
μ : population mean of Δ Duration = CMP Duration - CCPM

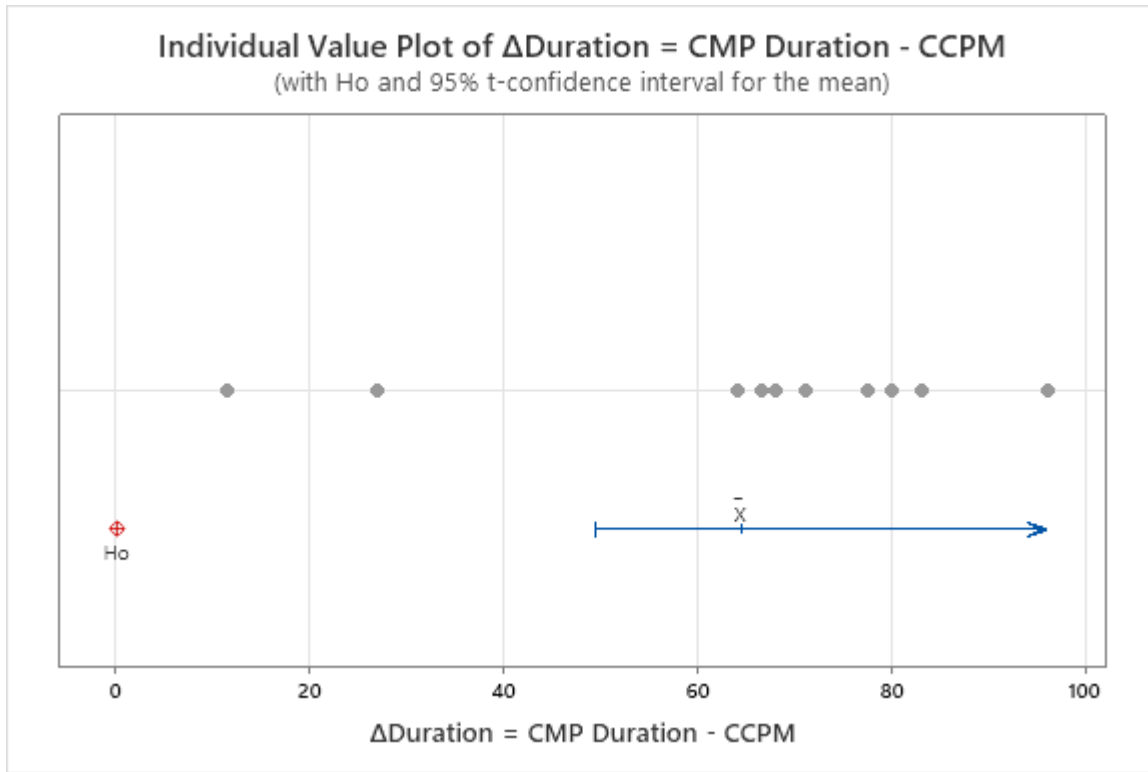
Test

Null hypothesis $H_0: \mu = 0$

Alternative hypothesis $H_1: \mu > 0$

T-Value	P-Value
7,88	0,00001246





Nota. Elaboración propia en software estadístico Minitab con base en datos del artículo correspondiente de Araszkievicz (2017).

Conclusión: se rechaza H_0 . La evidencia indica que CCPM reduce significativamente la duración promedio frente a CPM en estos 10 proyectos.

❖ **T test pareada sobre el porcentaje de reducción en duración (% of Reduction)**

La variable 2 de análisis se define de la siguiente manera

$$R_i = \frac{CPM_i - CCPM_i}{CPM_i} * 100 \quad (14)$$

Hipótesis para verificar

$$H_0 : \mu_R = 0 \text{ (CCPM no reduce la duración de los proyectos en promedio)} \quad (15)$$

$$H_1 : \mu_R > 0 \text{ (CCPM reduce la duración de los proyectos en promedio)} \quad (16)$$

Para determinar los estadísticos de la reducción del tiempo de los 10 proyectos en días también se utilizaron los datos de la tabla 3. Los estadísticos son los siguientes:

$$\bar{R} = 23,99\%$$

$$s_R = 6,44\%$$

$$n = 10$$

Cálculo del **estadístico t**

$$t = \frac{\bar{R}-0}{\frac{s_R}{\sqrt{n}}} = \frac{23,99}{\frac{6,44}{\sqrt{10}}} \approx 11,79$$

Los grados de libertad son como siguen

$$v = n - 1 = 9$$

El valor P(Unilateral) en tablas de valores críticos de la distribución t, con un t de 11,79 y 9 grados de libertad corresponde a 0,0000004483

Al ejecutar la misma prueba t test en el software estadístico Minitab se obtuvo el resultado que se muestra en la figura 8

Figura 8.

Resultados T test pareada sobre el porcentaje de reducción en duración (% of Reduction) realizados en el software estadístico Minitab.

Descriptive Statistics

N	Mean	StDev	SE Mean	95% Lower Bound
				for μ
10	0,2399	0,0644	0,0204	0,2026

μ : population mean of % of Reduction

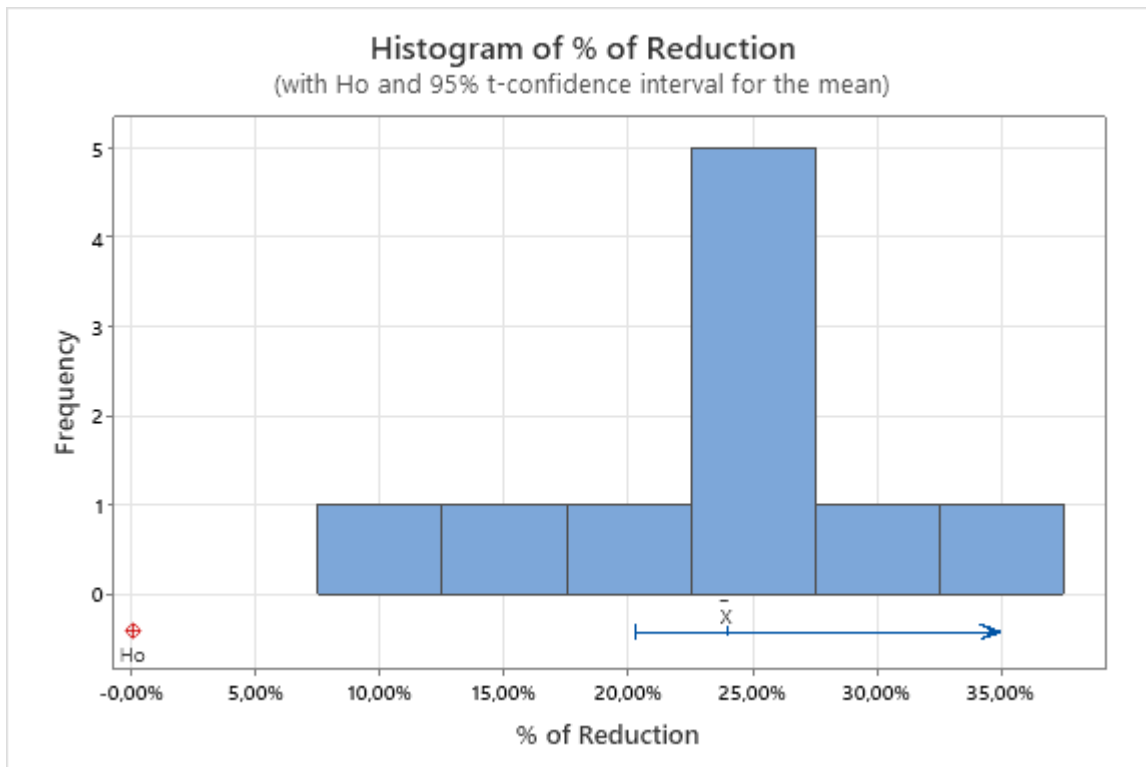
Test

Null hypothesis $H_0: \mu = 0$

Alternative hypothesis $H_1: \mu > 0$

T-Value P-Value

11,79 0,0000004483





Nota. Elaboración propia en software estadístico Minitab con base en datos del artículo correspondiente de Araszkiewicz (2017).

Conclusión: se rechaza H_0 . La evidencia sugiere que CCPM reduce significativamente el tiempo de ejecución, con un ahorro promedio cercano al 24% respecto a CPM.

En la tabla 4 se puede observar el resumen de los resultados de los dos t test realizados anteriormente

Tabla 4.

Tabla resumen de los 2 t-tests realizados sobre las variables de duración y porcentaje de reducción de la duración.

Variable Analizada	Media	SD	t value	Grados de Libertad (v)	P value (Unilateral)
Δ Duration	64,45	25,86	7,88	9	<0,001
% of Reduction	23,99	6,44	11,79	9	<0,001

Nota. Elaboración propia con base en datos del artículo correspondiente de Araszkievicz (2017), **SD** = Standard Deviation. Las pruebas se realizaron con un nivel de significancia de $\alpha=0,05$.

8.3 Análisis de datos del artículo de investigación Traditional Critical Path Method versus Critical Chain Project Management: A Comparative View de Shurrab (2015).

8.3.1 Resumen del articulo

El artículo *Traditional Critical Path Method versus Critical Chain Project Management: A Comparative View* (Shurrab, 2015) presenta una comparación sistemática entre el método tradicional CPM y el enfoque CCPM bajo dos variantes de dimensionamiento y gestión de buffers: SSQ y C&PM. El trabajo se apoya en una serie de redes (proyectos) donde se controlan características estructurales del problema dentro de las cuales se encuentran número de actividades y disponibilidad/tipo de recursos y se evalúa el efecto del método de programación sobre dos dimensiones medibles del desempeño que en este caso son la duración del proyecto en días y el costo de este en Jordan Dinars (JD).

Lo más útil para esta tesis es que el artículo reporta, para cada red analizada, los resultados bajo los tres métodos de programación (CPM, CCPM-SSQ, CCPM-C&PM). Adicionalmente este articulo incluye los cambios respecto a CPM tanto en duración como en costo para cada red analizada. Esto

permite tratar cada red como una unidad experimental observada repetidamente bajo tres condiciones, lo cual encaja directamente con un ANOVA de medidas repetidas. En otras palabras, esto significa que no se comparan proyectos distintos entre sí “al azar”, sino el mismo proyecto/red bajo métodos distintos, que es precisamente el escenario donde un ANOVA de medidas repetidas o una prueba de Friedman tiene sentido inferencial desde el punto de vista estadístico.

8.3.2 ¿Qué significan SSQ y C&PM dentro de CCPM?

En CCPM, el principio no es quitar holuras por quitarlas, sino centralizar la protección o seguridad temporal en buffers para absorber variabilidad y proteger la fecha final del proyecto. El artículo compara dos formas conocidas de dimensionar/gestionar esa protección, las cuales son:

CCPM-SSQ (Square Root of the Sum of Squares)

La lógica SSQ se usa para dimensionar buffers a partir de la variabilidad de las tareas. De manera simplificada, el buffer se calcula como una raíz cuadrada de la suma de cuadrados de márgenes asociados a las actividades (por ejemplo, diferencias entre duraciones más conservadoras y duraciones medias). Una forma típica de expresarlo es mediante la siguiente ecuación:

$$B = \sqrt{\sum_{i=1}^m S_i} \quad (17)$$

Donde s_i representa una medida de seguridad o dispersión atribuida a la actividad i en una cadena alimentadora o en la cadena crítica. Su ventaja es que no suma linealmente toda la incertidumbre lo cual inflaría los buffers, sino que la agrega como si fuese variabilidad combinada.

CCPM-C&PM (Cut & Paste Method)

El método Cut & Paste se asocia a la idea clásica de recortar seguridad local que son duraciones infladas por prudencia y pegarla como protección central (buffers). En su forma más conocida, se elimina una porción de seguridad distribuida en actividades y se transfiere al Project Buffer y a los Feeding Buffers. Este método de programación es una regla más práctica que un modelo estadístico, y su valor está en que estandariza una disciplina la cual es menos protección local, más protección central visible y gobernable.

8.3.3 Justificación del uso de ANOVA de medias repetidas para las pruebas de hipótesis de esta tesis

El objetivo empírico aquí es evaluar si el método de programación (CPM vs CCPM-SSQ vs CCPM-C&PM) produce diferencias sistemáticas en el desempeño temporal (duración) y adicionalmente en costo manteniendo constante la red/proyecto. Esto implica que las observaciones no son independientes, ya que cada red genera tres medidas (una por método). Esta estructura viola el supuesto de independencia requerido por un ANOVA entre-sujetos, pero encaja de forma natural con un ANOVA de medidas repetidas (intra-sujeto), donde:

- Sujeto o bloque: la red o proyecto que es la unidad experimental.
- Factor intra-sujeto: método de programación compuesto por 3 niveles.
- Respuesta: duración en días y, por separado costo en Jordan Dinars (JD).

Este modelo es coherente con la hipótesis general de esta investigación porque evalúa, con inferencia estadística, si cambiar el método (TOC/CCPM) altera la eficiencia temporal respecto a CPM bajo condiciones comparables.

8.3.4 ANOVA y formulación de hipótesis para la variable Duración

- ❖ Variable respuesta del diseño

$$Y_{ij}: \text{Duracion del proyecto (dias) para la red } i \text{ bajo el metodo } j \quad (18)$$

- ❖ Factor intra-sujeto

Método con 3 niveles los cuales son: CPM, CCPM-SSQ y CCPM-C&PM

- ❖ Hipótesis a comprobar con el ANOVA

Hipótesis Nula

$$H_0: \mu_{CPM} = \mu_{CCPM-SSQ} = \mu_{CCPM-C\&PM} \quad (19)$$

En promedio, la duración del proyecto no cambia entre métodos

Hipótesis General

$$H_1: \text{Al menos una media difiere} \quad (20)$$

Existe efecto del método sobre la duración

8.3.5 ANOVA de medias repetidas para la variable Duración (días)

En el ANOVA de medias repetidas, el contraste principal se basa en la distribución de Fisher con el estadístico

$$F = \frac{MS_{metodo}}{MS_{error}} \quad (21)$$

donde MS_{metodo} es la variabilidad explicada por el método dentro del mismo sujeto o red y MS_{error} captura la variabilidad residual intra-sujeto.

Para desarrollar el ANOVA de medias repetidas tanto para la duración como para los costos vamos a usar el dataset de la tabla 5 cuyos datos fueron obtenidos del artículo en cuestión.

Tabla 5.

Dataset datos artículo de investigación Traditional Critical Path Method versus Critical Chain Project Management: A Comparative View (Shurrab, 2015) para elaboración de ANOVA de medias repetidas.

Project Number	Number of Activities	Number of Resources	CPM		CCPM							
			Duration (Days)	Cost (JD)*	SSQ				C&PM			
					Duration (Days)	Change In Duration (%)	Cost (JD)*	Change in Cost (%)	Duration (Days)	Change In Duration (%)	Cost (JD)* (%)	Change in Cost (%)
1	7	2	22,00	2448	16,61	24,50	1224	50,00	16,50	25,00	1224	50,00
	7	2(mix)	19,00	3200	14,48	23,79	1600	50,00	14,25	25,00	1600	50,00
	7	4	42,00	6320	32,75	22,02	3160	50,00	31,50	25,00	3160	50,00
	7	4(mix)	15,00	3184	11,53	23,13	1880	40,96	11,00	26,67	1880	40,96
2	17	5	48,00	3888	37,27	22,35	1944	50,00	40,50	15,63	1944	50,00
	17	5(mix)	41,00	3776	29,82	27,27	1888	50,00	32,50	20,73	1888	50,00
	17	8	41,00	3200	29,82	27,27	1600	50,00	32,50	20,73	1600	50,00
	17	8(mix)	35,00	3512	26,19	25,17	1756	50,00	28,25	19,29	1756	50,00
3	23	6	70,00	9184	45,14	35,51	4483	51,19	52,00	25,72	4483	51,19
	23	6(mix)	62,00	8200	46,81	24,50	4100	50,00	50,75	18,15	4100	50,00
	23	10	60,00	6860	46,91	21,82	3624	47,17	49,75	17,08	3624	47,17
	23	10(mix)	49,00	8048	39,53	19,33	4025	49,98	41,76	14,78	4025	49,98
4	30	9	88,00	10264	59,26	32,66	5132	50,00	69,50	21,02	5132	50,00
	30	9(mix)	73,00	9420	46,43	36,38	4710	50,00	54,75	25,00	4710	50,00
	30	13	88,00	8168	99,68	-13,28	4084	50,00	110,00	-25,00	4084	50,00
	30	13(mix)	78,00	6844	49,48	36,56	3422	50,00	58,50	25,00	3422	50,00
5	35	10	199,00	15603	135,12	32,10	7804	49,98	155,25	21,99	7804	49,99
	35	10(mix)	93,50	8144	109,33	-16,93	4072	50,00	122,38	-30,89	4072	50,00
	35	14	93,50	6684	82,33	11,95	3342	50,00	95,38	-2,01	3342	50,00
	35	14(mix)	83,75	7080	102,47	-22,35	3602	49,12	114,19	-36,35	3602	49,12

Project Number	Number of Activities	Number of Resources	CPM		CCPM							
			Duration (Days)	Cost (JD)*	SSQ				C&PM			
					Duration (Days)	Change In Duration (%)	Cost (JD)*	Change in Cost (%)	Duration (Days)	Change In Duration (%)	Cost (JD)* (%)	Change in Cost (%)
6	47	5	98,00	16644	61,35	37,40	8386	49,62	74,88	23,59	8386	49,62
	47	5(mix)	86,00	6160	65,15	24,24	3204	47,99	73,00	15,12	3204	47,99
	47	12	111,00	9304	74,16	33,19	4644	50,06	88,75	20,05	4644	50,09
	47	12(mix)	124,00	13579	57,23	53,85	6880	49,33	65,01	47,57	6881	49,33
7	55	8	64,00	21824	47,13	26,36	10912	50,00	57,50	10,16	10912	50,00
	55	8(mix)	57,00	17880	45,57	20,05	8940	50,00	51,88	8,98	8940	50,00
	55	13	64,00	16784	49,48	22,69	8892	47,02	57,50	10,16	8892	47,03
	55	13(mix)	55,00	17260	45,10	18,00	8630	50,00	53,34	3,02	8630	50,00
8	70	9	90,00	19084	83,06	7,71	9562	49,90	93,63	-4,03	9562	49,90
	70	9(mix)	77,00	17814	52,64	31,64	8776	50,74	61,50	20,13	8776	50,74
	70	15	93,00	19088	70,29	24,42	9960	47,82	85,75	7,80	9960	47,82
	70	15(mix)	90,00	21016	59,29	34,12	10503	50,02	71,25	20,83	10503	50,02
9	98	18	562,00	115096	329,22	41,42	57548	50,00	404,50	28,03	57548	50,00
	98	18(mix)	464,50	93600	267,74	42,36	50300	46,26	332,38	28,44	50300	46,26
	98	30	818,00	129024	482,45	41,02	64752	49,81	604,00	26,16	64752	49,81
	98	30(mix)	919,50	157700	533,68	41,96	78850	50,00	666,88	27,47	78850	50,00
10	120	15	161,00	488408	122,39	23,98	244076	50,02	168,25	-4,50	244076	50,03
	120	15(mix)	131,00	45292	97,96	25,22	22696	49,89	127,88	2,38	22696	49,89
	120	23	161,00	79664	121,11	24,78	39892	49,93	164,25	-2,02	39892	49,93
	120	23(mix)	113,00	44361	96,42	14,67	22181	50,00	136,75	-21,02	22181	50,00
11	150	15	649,00	164816	701,06	-8,02	134360	18,48	843,00	-29,89	134360	18,48
	150	15(mix)	609,50	171304	645,80	-5,96	133748	21,92	739,63	-21,35	133748	21,92
	150	30	657,00	145958	715,63	-8,92	110907	24,01	791,63	-20,49	110907	24,02

Project Number	Number of Activities	Number of Resources	CPM		CCPM							
			Duration (Days)	Cost (JD)*	SSQ				C&PM			
					Duration (Days)	Change In Duration (%)	Cost (JD)*	Change in Cost (%)	Duration (Days)	Change In Duration (%)	Cost (JD)* (%)	Change in Cost (%)
	150	30(mix)	689,50	224560	717,70	-4,09	141751	36,88	812,13	-17,79	141752	36,88
12	170	15	480,50	209712	427,96	10,93	129136	38,42	491,13	-2,21	129137	38,42
	170	15(mix)	428,00	260158	319,28	25,40	130081	50,00	413,63	3,36	130081	50,00
	170	30	1028,00	254774	884,36	13,97	127388	50,00	921,95	10,32	127388	50,00
	170	30(mix)	2254,86	1140853	2080,94	7,71	570441	50,00	2237,84	0,76	570442	50,00
13	190	15	649,00	210208	705,15	-8,65	165344	21,34	891,00	-37,29	165344	21,34
	190	15(mix)	609,50	216928	644,37	-5,72	162666	25,01	729,75	-19,73	162666	25,01
	190	30	715,00	181457	785,88	-9,91	135735	25,20	892,88	-24,88	135736	25,20
	190	30(mix)	715,00	235785	775,37	-8,44	174380	26,04	851,88	-19,14	174380	26,04
14	200	8	480,50	249585	425,98	11,35	189011	24,27	489,13	-1,80	189012	24,27
	200	8(mix)	448,50	232743	407,40	9,16	158763	31,79	505,25	-12,65	158764	31,79
	200	15	688,00	430667	535,86	22,11	215333	50,00	626,00	9,01	215333	50,00
	200	15(mix)	656,25	499651	489,17	25,46	249493	50,07	652,63	0,55	249494	50,07
15	220	15	649,00	239096	705,15	-8,65	189568	20,72	891,00	-37,29	189568	20,72
	220	15(mix)	609,50	231820	649,00	-6,48	187736	19,01	730,31	-19,82	187736	19,02
	220	30	715,00	211461	788,68	-10,30	154617	26,88	899,25	-25,77	154618	26,89
	220	30(mix)	715,00	91846	787,48	-10,13	204104	48,60	906,25	-26,75	204104	48,60
16	235	10	618,00	228540	616,11	0,31	156465	31,54	726,50	-17,56	156466	31,54
	235	10(mix)	483,00	234460	390,71	19,12	157442	32,85	500,61	-3,65	157442	32,85
	235	30	649,00	257456	425,93	34,37	128728	50,00	567,75	12,52	128728	50,00
	235	30(mix)	602,50	320536	407,03	32,44	160268	50,00	525,75	12,74	160268	50,00
17	250	15	649,00	268976	704,41	-8,54	213430	20,65	849,50	-30,89	213430	20,65
	250	15(mix)	609,50	264152	636,84	-4,49	212095	19,71	694,18	-13,89	212095	19,71

Project Number	Number of Activities	Number of Resources	CPM		CCPM							
			Duration (Days)	Cost (JD)*	SSQ				C&PM			
					Duration (Days)	Change In Duration (%)	Cost (JD)*	Change in Cost (%)	Duration (Days)	Change In Duration (%)	Cost (JD)* (%)	Change in Cost (%)
	250	30	787,00	231041	859,79	-9,25	167437	27,53	984,63	-25,11	167437	27,53
18	260	15	648,00	326592	426,93	34,12	163296	50,00	567,75	12,38	163296	50,00
	260	15(mix)	588,00	358362	392,61	33,23	179182	50,00	509,00	13,44	179182	50,00
	260	30	756,00	582188	498,84	34,02	310964	46,59	696,75	7,84	310965	46,59
	260	30(mix)	623,33	487629	420,12	32,60	247302	49,28	586,33	5,94	247302	49,29
19	280	10	1166,00	451272	1580,00	-35,51	307367	31,89	1861,76	-59,67	307368	31,89
	280	10(mix)	1295,50	703230	1600,00	-23,50	431187	38,69	1954,00	-50,83	431188	38,69
	280	30	1061,00	469304	659,32	37,86	313444	33,21	866,00	18,38	313444	33,21
	280	30(mix)	1061,00	455288	1105,30	-4,18	228508	49,81	1268,25	-19,53	228508	49,81
20	285	15	875,00	513404	841,38	3,84	258652	49,62	1031,25	-17,86	258652	49,62
	285	15(mix)	868,00	507860	930,12	-7,16	253940	50,00	1088,69	-25,43	253940	50,00
	285	30	814,00	405240	885,12	-8,74	202621	50,00	1015,25	-24,72	202622	50,00
	285	30(mix)	894,00	616462	1109,46	-24,10	308234	50,00	1084,00	-21,25	308234	50,00
21	300	10	649,00	427052	450,82	30,54	217568	49,05	585,50	9,78	221878	49,05
	300	10(mix)	486,00	440152	346,81	28,64	220080	50,00	451,25	7,15	220080	50,00
	300	30	810,00	406388	787,08	2,83	330430	18,69	902,50	-11,42	330430	18,69
	300	30(mix)	602,00	440872	402,95	33,07	222124	49,62	568,63	5,54	222124	49,62
22	320	15	718,50	341052	821,43	-14,33	308686	9,49	982,00	-36,67	308686	9,49
	320	15(mix)	868,00	341622	933,81	-7,58	248631	27,22	137,06	84,21	248632	27,22
	320	30	915,00	273144	999,69	-9,25	236379	13,46	1152,75	-25,98	236380	13,46
	320	30(mix)	984,00	387640	1193,00	-21,24	344618	11,10	1170,00	-18,90	344618	11,10
23	335	15	717,50	526824	463,00	35,47	263412	50,00	622,38	13,26	263572	50,00
	335	15(mix)	678,00	530756	443,17	34,64	265114	50,05	582,63	14,07	265114	50,05

Project Number	Number of Activities	Number of Resources	CPM		CCPM							
			Duration (Days)	Cost (JD)*	SSQ				C&PM			
					Duration (Days)	Change In Duration (%)	Cost (JD)*	Change in Cost (%)	Duration (Days)	Change In Duration (%)	Cost (JD)* (%)	Change in Cost (%)
	335	30	717,50	635268	709,19	1,16	362184	42,99	818,88	-14,13	362184	42,99
	335	30(mix)	813,50	627040	722,36	11,20	313520	50,00	849,63	-4,44	313520	50,00
24	350	20	1468,00	778825	1572,05	-7,09	389413	50,00	1946,50	-32,60	389414	50,00
	350	20(mix)	1050,50	690739	953,29	9,25	345371	50,00	1165,25	-10,92	345371	50,00
	350	30	915,00	541605	1346,42	-47,15	270805	50,00	1507,25	-64,73	270806	50,00
	350	30(mix)	872,25	339762	969,70	-11,17	155986	54,09	1083,54	-24,22	155986	54,09
25	365	12	891,00	792576	633,12	28,94	396288	50,00	797,25	10,52	396288	50,00
	365	12(mix)	660,00	622692	614,11	6,95	311346	50,00	704,00	-6,67	311346	50,00
	365	30	648,00	621340	612,45	5,49	310670	50,00	701,00	-8,18	310670	50,00
	365	30(mix)	837,00	803596	628,41	24,92	401798	50,00	748,25	10,60	401798	50,00
26	385	20	1775,67	945374	1163,81	34,46	542851	42,58	1482,95	16,49	542852	42,58
	385	20(mix)	1216,00	859831	1302,78	-7,14	474179	44,85	1510,75	-24,23	474179	44,85
	385	30	927,50	632662	782,70	15,61	332025	47,52	979,25	-5,58	332026	47,52
	385	30(mix)	900,50	748249	975,47	-8,33	373962	50,02	1114,80	-23,80	373962	50,02
27	400	20	1678,00	975604	1837,21	-9,49	487802	50,00	1835,38	-9,38	487802	50,00
	400	20(mix)	1678,00	1019685	1714,03	-2,15	511626	49,83	1779,17	-6,02	511627	49,83
	400	30	1370,00	841826	631,64	53,90	441349	47,57	843,00	38,47	441350	47,57
	400	30(mix)	1370,00	845137	1470,21	-7,32	422569	50,00	1610,50	-17,56	422569	50,00
28	415	20	1147,00	1143971	1232,18	-7,43	618648	45,92	1532,88	-33,64	618649	45,92
	415	20(mix)	1332,50	932113	1372,38	-3,00	526195	43,55	1639,38	-23,03	531879	43,55
	415	30	982,00	686558	812,74	17,23	358658	47,76	1033,00	-5,19	358658	47,76
	415	30(mix)	949,67	818709	981,79	-3,38	409239	50,01	1185,00	-24,78	409240	50,01
29	430	20	1605,00	1540505	993,40	38,11	872045	43,39	1262,63	21,33	872045	43,39

Project Number	Number of Activities	Number of Resources	CPM		CCPM							
			Duration (Days)	Cost (JD)*	SSQ				C&PM			
					Duration (Days)	Change In Duration (%)	Cost (JD)*	Change in Cost (%)	Duration (Days)	Change In Duration (%)	Cost (JD)* (%)	Change in Cost (%)
	430	20(mix)	1301,00	1229093	795,34	38,87	653806	46,81	1030,50	20,79	653807	46,81
	430	30	902,00	903482	615,13	31,80	469630	48,02	877,88	2,67	485297	48,02
	430	30(mix)	2149,00	2677032	1465,72	31,80	2045635	23,59	1649,00	23,27	2045636	23,59
30	450	20	1605,00	1581337	1097,00	31,65	856731	45,82	1498,00	6,67	856731	45,82
	450	20(mix)	1268,50	1284861	775,03	38,90	647000	49,64	976,13	23,05	647001	49,64
	450	30	902,00	923990	1217,75	-35,01	458962	50,33	1743,25	-93,27	458962	50,33
	450	30(mix)	1234,50	932583	1339,60	-8,51	466294	50,00	1490,00	-20,70	466294	50,00

Nota. Elaboración propia con base en datos del artículo correspondiente de Shurrab (2015). Los porcentajes negativos de cambio en duración indican casos en los que la programación mediante CCPM produjo una duración mayor que la obtenida mediante CPM. Estos valores corresponden a los resultados originales reportados por Shurrab (2015) y se conservaron sin modificación en el análisis estadístico. El autor reconoce que CCPM redujo la duración en algunos proyectos, mientras que en otros generó una sobreestimación, evidenciando variabilidad en su desempeño según las características de las redes analizadas y el método utilizado para el dimensionamiento de buffers.

Después de realizar el ANOVA de medias repetidas para la variable duración en Microsoft Excel y en el software Minitab para verificación se obtuvieron los resultados de la tabla 6.

Tabla 6.

Cálculo de la suma de cuadrados para la variable duración (días)

Fuente	SS	gl	MS	F	p
SS Total	91613107,43	356			
SS Método	628503,11	2	314251,56		
SS Sujeto	87145703,33	118	738522,91		
SS Error	3838900,99	236	16266,53	19,32	0,000000016978

Nota. Elaboración propia

Recordemos del libro de Diseño y Análisis de experimentos de Montgomery (2013) la formulación matemática del ANOVA de medias repetidas, que en este libro se registra como Modelo de bloques completos aleatorizados.

Sea:

- $i = 1, 2, \dots, a \rightarrow$ tratamientos (métodos)
- $j = 1, 2, \dots, b \rightarrow$ sujetos/bloques (proyectos)
- Y_{ij} = observación del tratamiento i en el sujeto j
- $\bar{Y}_{i.}$ = media del tratamiento i
- $\bar{Y}_{.j}$ = media del sujeto j
- $\bar{Y}_{..}$ = media global

❖ **Suma de Cuadrados Total (SS Total)**

$$SS_{Total} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (Y_{ij} - \bar{Y}_{..})^2 \quad (22)$$

Este parámetro representa la variabilidad total de los datos alrededor de la media global.

❖ **Suma de Cuadrados del Método (Tratamiento)**

$$SS_{Metodo} = b \sum_{i=1}^a (\bar{Y}_{i.} - \bar{Y}_{..})^2 \quad (23)$$

Este parámetro mide la variabilidad explicada por el método de programación (CPM, SSQ, C&PM).

❖ **Suma de Cuadrados del Sujeto (Bloque)**

$$SS_{Sujeto} = a \sum_{j=1}^b (\bar{Y}_{.j} - \bar{Y}_{..})^2 \quad (24)$$

Este parámetro captura la variabilidad entre proyectos-redes (diferencias estructurales entre proyectos).

❖ **Suma de Cuadrados del Error**

$$SS_{Error} = SS_{Total} - SS_{Metodo} - SS_{Sujeto} \quad (25)$$

❖ Grados de Libertad (Degrees of Freedom)

De acuerdo al libro Diseño y Análisis de Experimentos de Montgomery(2013) los grados de libertad del ANOVA de medias repetidas se pueden observar en la tabla 7.

Tabla 7.

Grados de libertad ANOVA de medias repetidas

Fuente	Grados de Libertad
Método	$a - 1$
Sujeto	$b - 1$
Error	$(a - 1)(b - 1)$
Total	$ab - 1$

Nota. Elaboración propia

❖ Medias Cuadráticas (Mean Squares)

$$MS_{Metodo} = \frac{SS_{Metodo}}{a - 1} \quad (26)$$

$$MS_{Sujeto} = \frac{SS_{Sujeto}}{b - 1} \quad (27)$$

$$MS_{Error} = \frac{SS_{Error}}{(a - 1)(b - 1)} \quad (28)$$

❖ Estadístico F (Usado para el efecto del método)

$$F_{Metodo} = \frac{MS_{Metodo}}{MS_{Error}} \quad (29)$$

Este es el estadístico que se compara contra la distribución F con los grados de libertad

$$v_1 = a - 1 \quad (30)$$

$$v_2 = (a - 1)(b - 1) \quad (31)$$

❖ P-Value

$$p = P(F_{v_1, v_2} \geq F_{Observado}) \quad (32)$$

Es la probabilidad de obtener un valor de F igual o mayor que el observado bajo la hipótesis nula:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a \quad (33)$$

❖ Modelo estadístico según Montgomery

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \quad (34)$$

donde:

μ = media general

τ_i = efecto del tratamiento i (método)

β_j = efecto del bloque j (proyecto)

ε_{ij} = error aleatorio, con

Con los errores aleatorios aproximadamente distribuidos normalmente con media 0 y varianza σ^2 como sigue

$$\varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2) \quad (35)$$

Con restricciones:

$$\sum_{i=1}^a \tau_i = 0 \quad (36)$$

$$\sum_{j=1}^b \beta_j = 0 \quad (37)$$

8.3.6 Conclusión del ANOVA de medias repetidas para la variable Duración medida en días

Como se puede observar el valor p es considerablemente menor que el nivel de significancia adoptado ($\alpha = 0.05$), por lo cual se rechaza la hipótesis nula. Esto indica que existen diferencias estadísticamente significativas en la duración promedio de los proyectos según el método de programación utilizado.

Este resultado respalda la hipótesis de que la aplicación de CCPM, en sus distintas variantes, se asocia con modificaciones relevantes en el desempeño temporal de los proyectos frente al método CPM tradicional.

Como medida del tamaño del efecto, se calculó la eta cuadrada parcial con la siguiente expresión:

$$\eta_p^2 = \frac{F * df_1}{F * df_1 + df_2} \quad (38)$$

En donde:

F: Estadístico *F* de distribución Fisher

df1: Grados de libertad asociados al factor (*k* – 1)

df2: Grados de libertad del error

η_p^2 : proporción de la varianza de la duración o costo del proyecto explicada exclusivamente por el método de programación, controlando la variabilidad entre proyectos

Al aplicar la expresión anterior se obtuvo un valor aproximado de $\eta_p^2 = 0.14$, lo cual sugiere un efecto de magnitud moderada. En términos prácticos, esto significa que una proporción significativa de la variabilidad en la duración del proyecto puede atribuirse al método de programación empleado.

Para mayor aclaración de cómo se ejecutó el ANOVA de medias repetidas por favor referirse al archivo Excel anexo (**Anexo C**) en el que se puede ver claramente los pasos y formulas aplicadas para llevar a cabo el ANOVA con los datos de la tabla número 5.

8.4 Verificación de supuestos y decisión de robustez no paramétrica

Si bien el **ANOVA** de medidas repetidas es una técnica robusta, su correcta interpretación depende de supuestos como la normalidad de los residuos y la esfericidad (Montgomery, 2013). Debido a que los datos corresponden a proyectos con duraciones muy heterogéneas y estructuras de red diversas, resulta razonable suponer que estos supuestos pueden no cumplirse estrictamente.

Con el fin de fortalecer la validez de los resultados y evitar conclusiones dependientes de supuestos paramétricos estrictos, se aplicó adicionalmente la prueba de Friedman, que constituye la alternativa no paramétrica al ANOVA de medidas repetidas.

8.4.1 Prueba de Friedman aplicada a la variable duración

La prueba de **Friedman** evalúa si existen diferencias sistemáticas entre tratamientos cuando las observaciones están emparejadas, basándose en rangos en lugar de valores absolutos. En este caso, cada proyecto fue clasificado según su duración bajo cada método, asignando rangos dentro de cada fila.

El estadístico de Friedman se calcula como:

$$\chi_F^2 = \frac{12}{nk(k+1)} \sum_{j=1}^k R_j^2 - 3n(k+1) \quad (39)$$

En donde:

n: Numero de Proyectos

k: Numero de Metodos

R_j: Suma de rango por metodos

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 8

Tabla 8.

Cálculo del estadístico Chi-Square de Friedman para la variable duración (días)

Method	CPM	SSQ	C&PM
Sum of Ranks (Rj)	257	168	289
n	119		
k	3		
df	2		
p-value	4,50E-15		
Friedman Chi-Square	66,07		

Nota. Elaboración propia

Dado que el valor p es extremadamente pequeño, se rechaza nuevamente la hipótesis nula. Esto confirma que las diferencias observadas entre métodos no son atribuibles al azar, incluso bajo un enfoque no paramétrico.

Como medida del tamaño del efecto, se calculó el valor Kendall's W con la siguiente expresión:

$$W = \frac{\chi_F^2}{n(k-1)} \quad (40)$$

Al calcular W nos arrojó un valor de 0,278, lo cual indica un grado moderado de concordancia en la superioridad/inferioridad relativa de los métodos en términos de duración. En otras palabras, existe un patrón consistente en cómo los métodos afectan el tiempo de ejecución de los proyectos.

❖ Análisis post-hoc no paramétrico para la variable duración

Una vez establecida la existencia de diferencias globales, se realizaron comparaciones pareadas mediante la prueba de Wilcoxon de rangos con signo, con ajuste de Holm para controlar el error por comparaciones múltiples.

Los resultados se pueden ver en la tabla 9

Tabla 9.

Cálculo del estadístico Holmed P ajustado para comparación de la variable duración de los tres métodos de programación

Comparison	W Statistic	p-value	Holm adjusted p
CPM vs SSQ	2567	0,007819432	0,015638863
CPM vs C&PM	2831,5	0,050187098	0,050187098
SSQ vs C&PM	203	4,31202E-19	1,29361E-18

Nota. Elaboración propia

La interpretación de los resultados del estadístico Holmed P se pueden observar en la tabla 10.

Tabla 10.

Análisis de resultados análisis post-hoc no paramétrico para la variable

Comparación	p (ajustado Holm)	Interpretación
CPM vs CCPM-SSQ	0.0156	Diferencia significativa
CPM vs CCPM-C&PM	0.0502	Diferencia marginal
SSQ vs C&PM	1.29×10^{-18}	Diferencia altamente significativa

Nota. Elaboración propia

Estos resultados indican que, dentro del conjunto analizado, el método CCPM-SSQ presenta un comportamiento significativamente distinto tanto de CPM como de CCPM-C&PM, y que las dos variantes de CCPM no son equivalentes entre sí en términos de impacto sobre la duración.

8.4.2 ANOVA de medias repetidas para la variable Costo (JD)

Al igual que la variable duración, después de realizar el ANOVA de medias repetidas para la variable costo en Microsoft Excel se obtuvieron los resultados de la tabla 11.

Tabla 11.

Cálculo de la suma de cuadrados para la variable costo (JD)

Fuente	SS	gl	MS	F	p
SS Total	38.637.670.481.463	356			
SS Método	2.275.048.904.710	2	1.137.524.452.355		
SS Sujeto	33.659.674.430.326	118	285.251.478.223		
SS Error	2.702.947.146.426	236	11.453.165.875	99,3196523	5,06285E-32

Nota. Elaboración propia

8.4.3 Prueba de Friedman aplicada a la variable costo

Al igual que para la variable costo también se calculó el estadístico de Friedman para la variable costo. Los resultados se muestran en la tabla 12 que es como sigue

Tabla 12.

Cálculo del estadístico Chi-Square de Friedman para la variable costo (Jordan Dinars)

Method	CPM	SSQ	C&PM
Sum of Ranks (Rj)	355	164	195
n	119		
k	3		
df	2		
p-value	9,06E-48		
Friedman chi-square	176,5882353		

Nota. Elaboración propia

Como sucedió en la variable duración debido a que el valor p es extremadamente pequeño, se rechaza nuevamente la hipótesis nula. Esto confirma que las diferencias observadas entre métodos para el caso del costo no son atribuibles al azar, incluso bajo un enfoque no paramétrico.

Al calcular el valor de Kendall's W para la variable costo nos arroja un valor de 0,91 lo cual indica un nivel de concordancia extremadamente alto entre los rangos asignados a los métodos CPM, SSQ y C&PM a lo largo de los proyectos analizados. En términos prácticos, este valor cercano a 1 sugiere que existe una consistencia muy fuerte en el patrón de diferencias entre métodos, es decir, que la jerarquía observada en los costos se repite de manera estable en la mayoría de los proyectos.

❖ **Análisis post-hoc no paramétrico para la variable costo**

Al igual que en la variable costo se realizaron comparaciones pareadas mediante la prueba de Wilcoxon de rangos con signo, con ajuste de Holm para controlar el error por comparaciones múltiples.

Los resultados se pueden ver en la tabla 13

Tabla 13.

Cálculo del estadístico Holmed P ajustado para comparación de la variable costo de los tres métodos de programación

Comparison	W Statistic	p-value (2-sided)	Holm adjusted p	Significant ($\alpha=0.05$)
CPM vs CCPM-SSQ	377,1007823	0	0	Yes
CPM vs CCPM-C&PM	377,1007823	0	0	Yes
CCPM-SSQ vs CCPM-C&PM	51,02940329	1,17419E-06	1,17419E-06	Yes

Nota. Elaboración propia

8.4.4 Tabla de resumen resultados ANOVA de medias repetidas

En la tabla 14 se pueden observar los resultados del ANOVA de medias repetidas y de la prueba no paramétrica de Friedman para comprobar nuestras hipótesis de investigación.

Tabla 14.

Resultados del ANOVA de medidas repetidas y prueba de Friedman (Duración y Costo)

Variable	Prueba	Estadístico	gl	p-value	Tamaño de efecto
Duración	ANOVA RM	F = 19.32	(2,236)	1.70×10^{-8}	$\eta^2_p \approx 0.14$
Duración	Friedman	$\chi^2 = 66.07$	2	4.50×10^{-15}	W = 0.278
Costo	ANOVA RM	F = 99.32	(2,236)	5.06×10^{-32}	—
Costo	Friedman	$\chi^2 = 216.64$	2	9.07×10^{-48}	W = 0.91

Nota. Elaboración propia

8.4.5 Conclusión del ANOVA y relación con la hipótesis de investigación

Los resultados obtenidos a partir del conjunto de datos de Shurrah (2015) proporcionan evidencia estadística sólida de que el método de programación influye de manera significativa en la duración de los proyectos. Tanto el ANOVA de medidas repetidas como la prueba de Friedman convergen en

rechazar la hipótesis nula, lo que respalda la hipótesis central de esta tesis, la cual es la aplicación de TOC-CCPM se asocia con mejoras en la eficiencia temporal de proyectos con enfoque predictivo.

Adicionalmente, el análisis post-hoc muestra que no todas las implementaciones de CCPM son equivalentes, lo cual refuerza la necesidad planteada en el modelo conceptual de esta investigación de definir con claridad las reglas de implementación, el dimensionamiento de buffers y la disciplina de ejecución asociada.

En conjunto, este ANOVA no solo valida empíricamente la conveniencia de CCPM frente a CPM, sino que aporta profundidad al análisis al mostrar que la forma específica en que se aplica TOC dentro de CCPM condiciona los resultados obtenidos.

En el anexo F se presentan los resultados del ANOVA de medias repetidas realizado con el software estadístico Minitab.

9 Modelo de aplicación procedimental de la TOC mediante la metodología CCPM, aplicado a proyectos con enfoque predictivo propuesto y ejemplo de su aplicación.

Para desarrollar y validar el modelo de aplicación procedimental de la TOC mediante la metodología *CCPM*, aplicado a proyectos con enfoque predictivo resultado de esta investigación se siguieron los pasos del procedimiento metodológico descrito en el numeral 7,3 para el caso del modelo en cuestión los cuales se describen en seguida. Una vez expuesto el procedimiento que se aplicó para lograr el modelo propuesto se describe el mismo en detalle y un ejemplo de su aplicación como se puede observar más adelante.

9.1 Procedimiento usado para la elaboración y formulación del modelo conceptual-procedimental de la investigación.

La elaboración del modelo conceptual-procedimental se realizó mediante un proceso estructurado que integró la información recopilada durante la investigación. A continuación, se presenta el desarrollo de cada una de las etapas que dieron origen al modelo propuesto.

9.1.1 Sistematizar literatura científica sobre TOC y CCPM

Después de identificar y seleccionar literatura relevante como se describió en el numeral 8,1 se obtuvo la matriz de sistematización documental que se observa en la tabla 15.

Tabla 15.

Matriz extracción documental de artículos y estudios aplicados relacionados con la elaboración y formulación del modelo producto de la investigación.

Autor / Año	Tipo de documento	Contexto o sector de aplicación	Concepto principal abordado	Aporte teórico al modelo	Aporte procedimental al modelo	Variables o elementos identificados	Relación con TOC/CCPM	Herramientas, técnicas o mecanismos propuestos	Restricciones o limitaciones identificadas	Indicadores o criterios de desempeño mencionados	Aplicabilidad al modelo propuesto	Observaciones relevantes	Fuente URL
AlNasseri (2015)	Tesis / investigación académica	Construcción	Planificación y programación de proyectos	Refuerza la necesidad de programación formal en construcción y de integrar incertidumbre y recursos.	Sirve como base contextual para justificar el uso de cronogramas predictivos antes de aplicar CCPM.	CPM, planificación, control, recursos, incertidumbre.	Contextualiza el problema que CCPM busca mejorar frente a la programación tradicional.	CPM, planificación, seguimiento de cronograma.	No es un modelo CCPM; requiere complementarse con TOC y buffers.	Cumplimiento de cronograma, control de tiempos.	Alta como soporte contextual, no como módulo operativo.	Útil para justificar que el modelo nace desde un cronograma predictivo existente.	https://lucris.lub.lu.se/ws/files/4293873/7767270.pdf
Anastasliu, Câmpian & Roman (2023)	Artículo científico	Construcción	Aplicación de CCPM para mejorar plazos	Aporta evidencia reciente sobre uso de CCPM en proyectos de construcción.	Apoya la inclusión de buffers, control de cronograma y comparación con métodos tradicionales.	Duración, buffers, ruta/cadena crítica, desempeño temporal.	Directa: aplicación CCPM en construcción.	Critical Chain, buffer management, comparación temporal.	Generalización limitada al caso estudiado.	Reducción de duración, cumplimiento temporal.	Alta; puede reforzar la validación empírica indirecta.	Puede citarse en la explicación de pertinencia sectorial del modelo.	https://doi.org/10.3390/buildings13051249
Ahuja & Thiruvengadam (2004)	Artículo científico	Construcción	Estado de investigación en programación y monitoreo	Sustenta la necesidad de mejorar mecanismos de monitoreo y control.	Apoya el componente de seguimiento del modelo, especialmente control de avance.	Monitoreo, cronograma, recursos, control de desempeño.	Indirecta: explica limitaciones de enfoques tradicionales que CCPM complementa.	Técnicas de programación y monitoreo.	No desarrolla CCPM directamente.	Avance, control de tiempo, desempeño del proyecto.	Media; útil para fundamentar el control, no para fórmulas.	Puede alimentar recomendaciones de comunicación y seguimiento.	https://doi.org/10.1108/14714170410814980
Araszkiewicz (2017)	Artículo científico / caso de estudio	Construcción multiproyecto	Aplicación de Critical Chain Management	Aporta evidencia aplicada de CCM/CCPM en entorno multiproyecto.	Sirve para comparar duración CPM vs CCPM y para validar empíricamente el modelo.	CPM, CCPM, project buffer, feeding buffer, multiproyecto.	Directa: caso de aplicación de CCPM.	Comparación de cronogramas, buffers, gestión multiproyecto.	Caso específico; resultados no generalizables sin cautela.	Duración CPM, duración CCPM, tamaño de buffers.	Muy alta; base para pruebas y ejemplo numérico.	Debe separarse evidencia empírica de diseño del modelo.	https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.108
Chen et al. (2020)	Artículo / preprint académico	Gestión de proyectos	Dimensionamiento de buffers por descomposición de red	Amplía la discusión de métodos avanzados de cálculo de buffers.	Puede justificar que SSQ es una elección simplificada frente a métodos más complejos.	Buffer sizing, red del proyecto, descomposición, incertidumbre.	Directa: mejora técnica de CCPM.	Network decomposition, cálculo de buffers.	Puede requerir información adicional y mayor complejidad matemática.	Tamaño de buffer, protección del cronograma.	Media; recomendable como mejora futura.	No conviene incorporarlo operativamente si se quiere mantener simple el modelo.	https://wrap.warwick.ac.uk/id/eprint/145239
Critical Chain Projects (s. f.)	Guía técnica / resumen	Gestión de proyectos	Resumen de Critical Chain	Sintetiza conceptos prácticos de CCPM.	Apoya explicación de buffers, cadena crítica y gestión por prioridades.	Critical chain, buffers, tareas, recursos.	Directa: guía de CCPM.	Project buffer, feeding buffer, resource buffer.	Fuente no académica; usar solo como apoyo práctico.	Consumo de buffer, avance, prioridades.	Media; útil para lenguaje operativo.	No debe sustituir artículos científicos o libros base.	https://critical-chain-projects.com/medias/fichiers/critical_chain_summary.pdf
Cox & Schleier (2010)	Libro académico	Operaciones y gestión	TOC como teoría de gestión de operaciones	Da base conceptual fuerte a TOC como teoría de gestión sistémica.	Sustenta diagnóstico, explotación, subordinación y mejora continua.	Restricción, throughput, inventario, gasto operativo, mejora continua.	Directa: fundamentos TOC.	Cinco pasos de enfoque, pensamiento sistémico.	No se centra exclusivamente en proyectos.	Desempeño global del sistema, flujo.	Alta; base conceptual del modelo.	Usarlo para explicar por qué no se optimizan actividades aisladas.	https://www.routledge.com/Theory-of-Constraints-Handbook/Cox-Schleier/p/book/9780071665544

Aplicación de la Teoría de Restricciones para mejorar la eficiencia temporal en proyectos con enfoque predictivo: desarrollo de un modelo conceptual basado en evidencia experimental.

Autor / Año	Tipo de documento	Contexto o sector de aplicación	Concepto principal abordado	Aporte teórico al modelo	Aporte procedimental al modelo	Variables o elementos identificados	Relación con TOC/CCPM	Herramientas, técnicas o mecanismos propuestos	Restricciones o limitaciones identificadas	Indicadores o criterios de desempeño mencionados	Aplicabilidad al modelo propuesto	Observaciones relevantes	Fuente URL
De Oliveira Martins et al. (2025)	Revisión sistemática	Gestión de proyectos / CCPM	Tendencias y aplicaciones empíricas de CCPM	Aporta visión reciente de aplicaciones, tendencias y brechas de CCPM.	Permite justificar recomendaciones cualitativas y limitaciones de adopción.	Aplicaciones empíricas, barreras, sectores, tendencias.	Directa: revisión de CCPM.	Revisión sistemática, análisis de aplicaciones.	Al ser revisión reciente, puede depender de criterios de búsqueda específicos.	Frecuencia de aplicaciones, tipos de resultados, desempeño.	Alta para fundamentar estado del arte y brechas.	Útil para reforzar que el modelo debe incluir condiciones de implementación.	https://doi.org/10.3390/app15158147
Kramer & Jenkins (2006)	Artículo PMI / guía técnica	Gestión de proyectos	Cálculos CPM y software de programación	Refuerza la comprensión de CPM como base previa del modelo.	Apoya la construcción de red lógica, forward pass, backward pass y holgura.	ES, EF, LS, LF, holgura, ruta crítica.	Indirecta: base CPM antes de CCPM.	Cálculos CPM, interpretación de software.	No incorpora restricciones de recursos como CCPM.	Duración, holgura, ruta crítica.	Alta como soporte del componente CPM.	Útil para explicar que el modelo parte de CPM pero lo transforma.	https://www.pmi.org/learning/library/critical-path-method-calculations-scheduling-8040
Ghaffari & Emsley (2015)	Artículo científico / revisión	Gestión de proyectos / CCPM	Estado actual y potencial futuro de investigación en CCPM	Identifica líneas innovadoras: recursos, variabilidad, robustez, EVM, software, cultura.	Permite agregar requisitos cualitativos y criterios de madurez.	Carga de recursos, variabilidad, robustez, estabilidad, EVM, barreras culturales. Restricción, explotación, subordinación, elevación, inercia.	Directa: revisión crítica de CCPM.	Agenda de investigación, clasificación de tópicos CCPM.	Muchas propuestas son áreas futuras, no necesariamente métodos cerrados.	Robustez, estabilidad, desempeño, control, adopción.	Muy alta; base principal para ampliar el modelo.	Debe usarse para crear capa cualitativa de implementación y recomendaciones .	https://doi.org/10.1016/j.sorms.2015.10.001
Goldratt (1990)	Libro fundacional	Gestión de operaciones	Implementación de TOC	Aporta la lógica de identificar y gestionar restricciones.	Soporta diagnóstico TOC y ciclo de mejora continua del modelo.	Student Syndrome, Parkinson, multitarea, buffers, cadena crítica.	Directa: fundamento TOC.	Cinco pasos de enfoque, cambio de políticas.	No es específico de construcción ni ofrece fórmulas CCPM.	Mejora global del sistema, flujo.	Muy alta como marco teórico.	Debe articularse con CCPM como aplicación al entorno de proyectos.	https://www.tocinstitute.org/theory-of-constraints.html
Goldratt (1997)	Libro fundacional	Proyectos	Critical Chain	Base conceptual original de CCPM.	Sustenta eliminación de seguridad local, buffers y gestión por cadena crítica.	Student Syndrome, Parkinson, multitarea, buffers, cadena crítica.	Directa: fuente principal CCPM.	Critical Chain Scheduling, Buffer Management.	Libro conceptual; requiere apoyo empírico y académico complementario .	Fecha final, consumo de buffer, flujo.	Muy alta; núcleo del modelo.	Debe citarse como origen del enfoque, no como única evidencia.	https://www.tocinstitute.org/the-goal-summary.html
Goldratt & Cox (2004)	Libro / novela empresarial	Manufactura y operaciones	Mejora continua basada en restricciones	Introduce de forma comprensible la lógica de flujo y restricción.	Apoya la narrativa de sistema, cuello de botella y mejora continua.	Cuello de botella, flujo, throughput, mejora continua.	Directa para TOC, indirecta para CCPM.	Pensamiento sistémico, gestión de restricciones.	No es artículo científico ni método formal de proyectos.	Throughput, eficiencia del sistema.	Media-alta como fundamento conceptual.	Usar para explicar filosofía TOC, no para cálculos del modelo.	https://www.tocinstitute.org/the-goal-summary.html
Gupta & Boyd (2008)	Artículo científico	Operaciones	TOC como teoría de operaciones	Fortalece la legitimidad académica de TOC.	Justifica tratar el proyecto como sistema con restricción dominante.	Restricción, operaciones, desempeño, teoría.	Directa: fundamento TOC.	Marco teórico de TOC.	No desarrolla CCPM en detalle.	Desempeño operativo, mejora sistémica.	Alta para marco teórico.	Útil para defender TOC ante críticas de falta de formalización.	https://doi.org/10.1108/01443570810903122
Herroelen & Leus (2004)	Artículo científico / revisión	Programación de proyectos	Programación robusta y reactiva	Aporta conceptos de robustez y estabilidad del cronograma.	Permite incluir criterio cualitativo de estabilidad y protocolo de reprogramación.	Robustez, estabilidad, interrupciones, baseline, reprogramación.	Indirecta pero muy relevante: complementa CCPM con enfoque robust/reactive.	Proactive scheduling, reactive scheduling, schedule repair.	Incluirlo numéricamente requeriría métricas adicionales de estabilidad.	Estabilidad, desviación de inicios, robustez, cumplimiento.	Alta como recomendación cualitativa; media como cálculo.	Puede incorporarse como criterio de revisión del cronograma.	https://doi.org/10.1080/00207540310001638055
Kim, Moon, Son & Park (2021)	Artículo científico	Construcción	Smart and robust critical chain scheduling using buffer extraction	Refuerza la relación entre CCPM, robustez y construcción.	Puede apoyar mejoras de buffer extraction y control robusto.	Buffer extraction, robustness, construction scheduling.	Directa: CCPM aplicado a construcción.	Smart scheduling, buffer extraction.	Método puede ser más complejo que SSQ.	Duración, robustez, protección del cronograma.	Alta como evidencia de robustez; media como implementación.	Puede citarse para justificar robustez sin cambiar la hoja.	https://doi.org/10.22712/susb.20210032

Aplicación de la Teoría de Restricciones para mejorar la eficiencia temporal en proyectos con enfoque predictivo: desarrollo de un modelo conceptual basado en evidencia experimental.

Autor / Año	Tipo de documento	Contexto o sector de aplicación	Concepto principal abordado	Aporte teórico al modelo	Aporte procedimental al modelo	Variables o elementos identificados	Relación con TOC/CCPM	Herramientas, técnicas o mecanismos propuestos	Restricciones o limitaciones identificadas	Indicadores o criterios de desempeño mencionados	Aplicabilidad al modelo propuesto	Observaciones relevantes	Fuente URL
Leach (1999)	Artículo científico	Gestión de proyectos	CCPM mejora el desempeño del proyecto	Aporta una de las referencias clásicas de desempeño CCPM.	Justifica reducción de multitarea, buffers y control por tiempo restante.	Critical chain, buffers, desempeño, incertidumbre.	Directa: CCPM.	Buffer management, programación por cadena crítica.	Puede presentar resultados tempranos que requieren comparación con literatura posterior.	Desempeño del proyecto, duración, confiabilidad.	Alta; soporte clásico del modelo.	Útil en antecedentes y justificación del modelo.	https://doi.org/10.1177/875697289903000207
Lean Production (s. f.)	Fuente divulgativa técnica	Operaciones / mejora continua	Resumen de Theory of Constraints	Aporta explicación sencilla de TOC y pasos de enfoque.	Puede apoyar redacción didáctica de diagnóstico y mejora continua.	Restricción, mejora continua, throughput.	Directa para TOC.	Five focusing steps.	Fuente no académica.	Flujo, capacidad, restricción.	Baja-media; usar solo como apoyo divulgativo.	No reemplaza Goldratt, Cox, Gupta o Şimşit.	https://www.leanproduction.com/theory-of-constraints/
Long & Ohsato (2008)	Artículo científico	Gestión de proyectos	Fuzzy critical chain under resource constraints and uncertainty	Aporta integración de restricciones de recursos, incertidumbre difusa y buffer.	Puede inspirar módulo opcional de incertidumbre avanzada y control dinámico.	RCPSP, números difusos, project buffer, incertidumbre.	Directa: extensión CCPM.	Fuzzy numbers, deterministic schedule under resource constraints, project buffer.	Incluir números difusos sí modificaría el Excel y elevaría la complejidad.	Duración difusa, buffer, cumplimiento del cronograma.	Alta como mejora conceptual; operativamente opcional.	Recomiendo usarlo como criterio cualitativo o mejora futura, no como núcleo del Excel actual.	https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2007.09.012
Ma, Jiang, Zhu & Jia (2019)	Artículo científico	Construcción	Cronogramas bajo escenarios de retrabajo	Introduce el retrabajo como fuente de variabilidad temporal.	Puede incorporarse como recomendación de riesgo/retrabajo antes de congelar baseline CCPM.	Rework, incertidumbre, construcción, duración.	Indirecta: complementa CCPM al identificar variabilidad por retrabajo.	Modelación de escenarios de retrabajo.	Aplicarlo numéricamente requeriría probabilidades o escenarios adicionales.	Impacto de retrabajo, duración, confiabilidad.	Media; recomendable como checklist de riesgo.	No tocaría Excel si se maneja como requisito de revisión de alcance/calidad.	https://doi.org/10.3390/su11205697
Newbold (1998)	Libro técnico	Gestión de proyectos	Aplicación de TOC a proyectos	Traduce TOC a gestión acelerada de proyectos.	Apoya reglas prácticas de priorización, liberación de trabajo y buffers.	Cadena crítica, buffers, recursos, prioridad.	Directa: TOC aplicada a proyectos.	Project management in the fast lane, buffer management.	Puede ser más práctico que empírico.	Duración, entrega, flujo de proyectos.	Alta; soporte procedimental.	Útil para explicar gestión multiproyecto y liberación de trabajo.	https://www.routledge.com/Project-Management-in-the-Fast-Lane-Appling-the-Theory-of-Constraints/Newbold/p/book/9781574441956
Patrick (2001)	Artículo PMI	Gestión de riesgos / proyectos	Buffers contra riesgo en Critical Chain	Conecta CCPM con gestión del riesgo temporal.	Sustenta que los buffers no eliminan el riesgo sino que lo centralizan y gestionan.	Riesgo, buffers, protección, control.	Directa: CCPM y riesgo.	Project buffer, feeding buffer, risk management.	Fuente de conferencia; requiere complementar con artículos.	Consumo de buffer, protección de fecha.	Alta para justificar lenguaje de riesgo.	Útil para explicar la filosofía de reubicar seguridad.	https://www.pmi.org/learning/library/against-critical-chain-risk-management-7854
Project Management Institute (2014)	Reporte profesional	Gestión de proyectos/programas	Gestión de requisitos como competencia central	Aporta dimensión cualitativa: requisitos claros antes de planificar. Aporta necesidad de adaptación, liderazgo y capacidades organizacionales	Puede incorporarse como condición de entrada del modelo.	Requisitos, alcance, éxito, cambios.	Indirecta: fortalece condiciones previas para aplicar CCPM.	Gestión de requisitos, trazabilidad.	Reporte profesional, no investigación CCPM.	Éxito de proyectos, gestión de requisitos.	Media; útil para checklist de entrada.	No afecta Excel; se incluye como requisito de aplicación.	https://www.pmi.org
Project Management Institute (2018)	Reporte profesional	Gestión de proyectos	Éxito en tiempos disruptivos		Apoya sección de gobernanza y liderazgo del modelo.	Disrupción, capacidades, cultura, éxito.	Indirecta: complementa implementación CCPM.	Gobernanza, liderazgo, adaptación.	Reporte general, no CCPM.	Éxito, desempeño, capacidades organizacionales	Media; útil como recomendación cualitativa.	No afecta el Excel.	https://www.pmi.org

Aplicación de la Teoría de Restricciones para mejorar la eficiencia temporal en proyectos con enfoque predictivo: desarrollo de un modelo conceptual basado en evidencia experimental.

Autor / Año	Tipo de documento	Contexto o sector de aplicación	Concepto principal abordado	Aporte teórico al modelo	Aporte procedimental al modelo	Variables o elementos identificados	Relación con TOC/CCPM	Herramientas, técnicas o mecanismos propuestos	Restricciones o limitaciones identificadas	Indicadores o criterios de desempeño mencionados	Aplicabilidad al modelo propuesto	Observaciones relevantes	Fuente URL
Robinson & Richards (2010)	Artículo IEEE / conferencia	Aeroespacial / proyectos complejos	Motivación y visión general de CCPM	Explica motivación, beneficios y lógica de CCPM.	Apoya comunicación del modelo y adopción organizacional.	Buffers, recursos, comportamiento , control.	Directa: overview CCPM.	Critical Chain Project Management overview.	General; puede no contener validación empírica fuerte.	Duración, control, cumplimiento.	Alta como apoyo explicativo.	Útil para fundamentar la capa de comunicación y adopción.	https://doi.org/10.1109/AERO.2010.5446879
Rodríguez & Pineda (2018)	Trabajo académico	Infraestructura en Colombia	Obras inconclusas e impacto en gestión de proyectos	Da contexto colombiano del problema de desempeño temporal.	Sirve para justificar pertinencia del modelo en infraestructura/Colombia .	Obras inconclusas, retrasos, gestión, impacto.	Indirecta: contexto de necesidad de mejora.	Análisis de obras inconclusas.	No es CCPM.	Retrasos, impacto, desempeño.	Media como contextualización del problema.	No debe usarse para diseñar fórmulas, solo para contexto.	
Shurrab (2015)	Artículo comparativo	Gestión de proyectos	CPM tradicional vs CCPM	Aporta comparación conceptual y cuantitativa entre CPM y variantes CCPM.	Sirve para validación empírica indirecta y contraste de métodos.	CPM, CCPM, buffers, duración.	Directa: comparación CCPM/CPM.	Comparative view, reducción de duración, métodos de buffer.	Calidad y alcance del artículo deben presentarse con cautela.	Duración CPM, duración CCPM, diferencias temporales.	Alta para comparación y pruebas.	Puede usarse para ANOVA/repeated measures si los datos son adecuados.	https://www.hilarispublisher.com/open-access/traditional-critical-path-method-versus-critical-chain-projectmanagement-a-comparative-view-2162-6359-1000292.pdf
Şimsit, Günay & Vayvay (2014)	Artículo científico / revisión	Gestión y operaciones	Revisión de literatura TOC	Refuerza desarrollo académico de TOC y sus aplicaciones.	Apoya marco teórico y selección de conceptos TOC.	TOC, aplicaciones, restricciones, mejora continua.	Directa para TOC.	Revisión bibliográfica.	No especifica de CCPM.	Desempeño, mejora, aplicaciones.	Alta para marco TOC.	Útil para conectar TOC con diferentes contextos de gestión.	https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.09.104
Tenera (2008)	Artículo PMI / investigación	Gestión de proyectos	Comparación de métodos de tamaño de buffer	Aporta comparación de métodos de buffer sizing.	Justifica elección de SSQ y discusión de alternativas.	Cut and paste, SSQ, buffer sizing.	Directa: buffer sizing CCPM.	Métodos comparativos de dimensionamiento de buffers.	Puede no cubrir todas las fuentes de incertidumbre.	Tamaño de buffer, desempeño del cronograma.	Alta; soporte técnico del Excel actual.	Debe citarse cerca de la fórmula SSQ.	https://www.pmi.org/learning/library/critical-chain-project-management-theory-7118
TCI Institute (s. f.)	Fuente institucional TOC	Gestión TOC	Cinco pasos de enfoque y TOC	Aporta descripción operativa de pasos TOC.	Apoya diagnóstico, explotación, subordinación, elevación e inercia.	Restricción, enfoque, mejora continua.	Directa para TOC.	Five focusing steps.	Fuente no académica; usar como apoyo.	Flujo, restricción, mejora.	Media; útil para redacción operativa.	No reemplaza fuentes académicas.	https://www.tocinstitute.org/five-focusing-steps.html
White & Fortune (2002)	Artículo científico	Práctica de gestión de proyectos	Prácticas actuales de project management	Aporta evidencia sobre brechas entre métodos y práctica real.	Sustenta necesidad de recomendaciones de implementación, cultura y comunicación.	Métodos, práctica, problemas, factores de éxito.	Indirecta: barreras de adopción para modelos como CCPM.	Estudio empírico de prácticas.	No aborda CCPM en específico.	Uso de herramientas, desempeño, factores de gestión.	Media; útil para capa cualitativa.	Apoya incluir gobernanza y liderazgo.	https://doi.org/10.1016/S0263-7863(00)00029-6
Zhang, Song & Díaz (2016)	Artículo científico	Gestión de proyectos	Project buffer sizing basado en resource tightness	Aporta método avanzado que incorpora estrechez de recursos.	Puede inspirar un factor cualitativo de carga segura de recursos o mejora futura del buffer.	Resource tightness, information flow, project buffer.	Directa: mejora de buffer sizing CCPM.	Comprehensive resource tightness, DSM, cálculo de PB.	Incluirlo numéricamente sí modificaría el Excel.	Tamaño de buffer, precisión, restricción de recursos.	Alta como mejora futura; media para versión actual.	Recomiendo incluir como criterio cualitativo de revisión de carga de recursos.	https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.07.009

Nota. Elaboración propia en base a búsqueda de literatura científica relevante según el numeral 8,1.

9.1.2 Identificar principios, técnicas y algoritmos recurrentes

A partir de la matriz de sistematización documental que se muestra en la tabla 15, se identificaron los principios, técnicas y procedimientos que presentaban mayor recurrencia en la literatura sobre TOC y CCPM. Este análisis permitió reconocer los elementos conceptuales y operativos más consistentes, como la identificación de restricciones, la programación bajo cadena crítica, la gestión mediante buffers, la nivelación básica de recursos y los mecanismos de seguimiento del desempeño del cronograma, los cuales constituyeron la base para la formulación del modelo propuesto en esta investigación.

9.1.3 Seleccionar técnicas aplicables al modelo propuesto

Con base en los hallazgos documentales de la matriz de la tabla 15, se seleccionaron únicamente aquellas técnicas que resultaban coherentes con el objetivo de desarrollar un modelo conceptual-procedimental de aplicación práctica para proyectos con enfoque predictivo en diferentes tipos de organizaciones. En consecuencia, se incorporaron herramientas ampliamente respaldadas por la literatura, como la red CPM, las duraciones t_{50} , la identificación de la cadena crítica, el cálculo de buffers mediante el método SSQ, la restricción ligera de recursos, el control mediante Fever Charts y la capa de control dinámico moderado, descartando enfoques de optimización matemática cuya complejidad excedía el alcance de la investigación y no hacen practica y sencilla la aplicación e interpretación de los resultados del modelo.

9.1.4 Analizar aplicabilidad y limitaciones de los enfoques

En esta etapa se evaluó la aplicabilidad de las técnicas seleccionadas, así como sus principales limitaciones, considerando su viabilidad de implementación en un modelo de carácter gerencial. Este análisis permitió identificar en la matriz respectiva aquellos elementos que podían incorporarse de forma directa y aquellos que debían adaptarse o simplificarse para preservar la claridad, la aplicabilidad

práctica y la coherencia metodológica del modelo, evitando convertir la propuesta en un problema de investigación de operaciones de optimización matemática de alta complejidad.

9.1.5 Integrar metodológicamente técnicas y algoritmos

Una vez seleccionadas las técnicas aplicables, se procedió a integrarlas dentro de una única secuencia metodológica. Para ello se combinaron de manera coherente y lógica los principios de la TOC con los procedimientos de CCPM y herramientas tradicionales de programación de proyectos, procurando que cada etapa del proceso se articulara de forma lógica y complementaria hasta conformar un único modelo de aplicación.

9.1.6 Definir etapas del modelo conceptual-procedimental

Las fases que componen el modelo procedimental propuesto se definieron con la integración metodológica llevada a cabo en la etapa previa. Para ello, se ordenaron estas etapas según el orden natural de un proyecto: planificación, programación, ejecución, seguimiento y mejora continua. Esta estructura posibilitó la definición de un procedimiento sistemático que asegura la conexión lógica entre cada una de las etapas del modelo y hace más sencilla su implementación práctica.

9.1.7 Definir entradas y salidas del modelo

En esta etapa se determinaron los datos de entrada necesarios para implementar el modelo y los resultados más relevantes que se esperaban en cada fase del proceso. Esta definición permitió determinar con precisión los datos requeridos para construir el cronograma, identificar la cadena crítica, calcular los buffers y realizar el seguimiento del proyecto, así como los productos generados por cada fase del modelo.

9.1.8 Definir reglas de decisión del modelo

Con el propósito de facilitar la toma de decisiones durante la ejecución del proyecto, se definieron reglas de actuación asociadas a las principales condiciones de seguimiento del modelo. Estas reglas establecen criterios para interpretar el comportamiento del cronograma, el consumo de buffers, la disponibilidad de recursos y la necesidad de activar mecanismos de control dinámico, proporcionando una guía práctica para la gestión del proyecto.

9.1.9 Estructurar el modelo conceptual-procedimental final

Finalmente, todos los elementos identificados durante el proceso de revisión documental e integración metodológica se consolidaron en un modelo conceptual-procedimental único. La estructura final organiza de forma secuencial las etapas de planificación, programación, control y mejora continua, incorporando los fundamentos de TOC y CCPM junto con los componentes adicionales propuestos en esta investigación para fortalecer la gestión del tiempo en proyectos con enfoque predictivo.

9.1.10 Validar conceptualmente el modelo propuesto

Como etapa final, se verificó la coherencia conceptual, metodológica y operativa del modelo mediante la revisión de la literatura especializada y la consistencia lógica entre sus etapas, ecuaciones, reglas de decisión y mecanismos de control. Esta validación permitió comprobar que la propuesta mantiene los principios fundamentales de TOC y CCPM, al tiempo que incorpora elementos complementarios que fortalecen su aplicabilidad práctica sin incrementar innecesariamente su complejidad.

9.2 Modelo conceptual procedimental de aplicación de la TOC mediante la metodología CCPM, aplicado a proyectos con enfoque predictivo

Como resultado del procedimiento desarrollado durante la investigación, se formuló un modelo conceptual-procedimental que integra los principios de la Teoría de Restricciones y la metodología CCPM dentro del ciclo de vida de proyectos con enfoque predictivo. En los siguientes apartados se presenta su estructura, los elementos que lo conforman y la lógica de aplicación propuesta.

9.2.1 Idea central del modelo

El modelo propuesto parte de una idea sencilla y es que en muchos proyectos predictivos el problema principal no es la ausencia de planificación, sino la forma en que el cronograma responde cuando aparecen incertidumbre, multitarea, recursos limitados y cambios de prioridad. En estos escenarios, los métodos tradicionales tienden a proteger cada actividad por separado, lo que genera márgenes ocultos, retrasos acumulados y poca visibilidad sobre el verdadero estado del proyecto.

Desde la lógica de la TOC, el proyecto se entiende como un sistema cuyo desempeño está condicionado por una o varias restricciones. En el caso de los proyectos, esas restricciones suelen estar asociadas a recursos especializados, cuadrillas, equipos técnicos o actividades que concentran la mayor presión sobre la fecha final.

Por esta razón, el modelo combina la estructura del CPM con la lógica de la CCPM. Primero se construye una red lógica del proyecto, luego se reducen las duraciones protegidas a estimaciones más realistas, se incorporan las restricciones de recursos, se identifica la cadena crítica y finalmente se protege el cronograma mediante buffers. El control posterior no se basa únicamente en revisar si cada actividad terminó a tiempo, sino en observar el consumo del buffer y el avance real de la cadena crítica.

9.2.2 Condiciones de entrada y supuestos del modelo

El modelo aplica principalmente a proyectos con enfoque predictivo, donde el alcance está relativamente definido desde el inicio y existe una secuencia lógica de actividades. También requiere que sea posible identificar actividades, precedencias, duraciones estimadas y recursos responsables.

Para aplicar el modelo se necesitan como mínimo los datos de la tabla 16:

Tabla 16.

Datos mínimos para la aplicación del modelo propuesto

Elemento	Descripción
Actividades del proyecto	Lista de tareas o paquetes de trabajo
Precedencias	Relaciones lógicas entre actividades
Duración segura	Duración tradicional con margen de protección
Duración agresiva o t50	Duración más ajustada, sin protección excesiva
Recursos asignados	Recurso principal requerido por cada actividad
Capacidad de recursos	Disponibilidad real del recurso por periodo
Fecha objetivo	Fecha esperada o comprometida de finalización

Nota. Elaboración propia

El modelo no busca resolver un problema exacto de programación matemática, sino proponer una forma práctica y gerencial de construir un cronograma más realista, protegido y controlable.

9.2.3 Diagnóstico TOC: identificación de la restricción del sistema o proyecto

El primer paso consiste en identificar cuál es la restricción principal del proyecto. Esta restricción puede ser una actividad, un recurso, una cuadrilla, un especialista, un equipo técnico o incluso una política de gestión que limite el flujo normal del trabajo.

En la práctica, la restricción se identifica revisando qué recurso aparece con mayor frecuencia en actividades importantes, cuál tiene mayor demanda acumulada, cuál genera esperas o reprogramaciones y cuál provoca multitarea.

La pregunta central de esta etapa es:

¿Qué elemento está limitando realmente la velocidad de avance del proyecto?

Una vez identificada la restricción, el modelo no intenta optimizar todas las actividades al mismo tiempo. La prioridad es proteger y administrar el recurso o secuencia que determina el flujo general del proyecto.

9.2.4 Construcción de la red CPM base

El proceso de planificación inicia con la construcción de la red lógica del proyecto utilizando los principios tradicionales del CPM. En esta etapa se identifican las actividades, sus relaciones de precedencia y sus duraciones estimadas.

Para calcular la duración del proyecto se aplican los procedimientos de *Forward Pass* y *Backward Pass*.

Durante el *forward pass* se calcula el inicio temprano y el fin temprano de cada actividad. Matemáticamente se expresa como:

$$ES_i = \max (EF_{pred}) \quad (41)$$

$$EF_i = ES_i + t_i \quad (42)$$

donde:

- ES_i = *Early Start* de la actividad i
- EF_i = *Early Finish* de la actividad i
- t_i = duración estimada de la actividad
- EF_{pred} = fin temprano de las actividades predecesoras

Posteriormente se realiza el *backward pass*, el cual permite determinar los tiempos tardíos:

$$LF_i = \min (LS_{succ}) \quad (43)$$

$$LS_i = LF_i - t_i \quad (44)$$

donde:

- LF_i = Late Finish
- LS_i = Late Start
- LS_{succ} = inicio tardío de las actividades sucesoras

Finalmente se calcula la holgura total (Slack) de cada actividad:

$$Slack_i = LS_i - ES_i = LF_i - EF_i \quad (45)$$

Las actividades cuya holgura es igual a cero conforman la ruta crítica del proyecto (*Critical Path*), es decir, la secuencia de actividades que determina la duración mínima del cronograma bajo el método CPM.

Aquí t_i es t_{safe} porque CPM está usando las duraciones seguras.

Sin embargo, esta ruta crítica inicial no considera todavía las restricciones reales de recursos ni los efectos de multitarea. Por esta razón, posteriormente el modelo incorpora nivelación de recursos y lógica de cadena crítica.

9.2.5 Estimación de duraciones y eliminación de la seguridad local

Después de construir la red CPM base, el modelo reduce la protección incluida dentro de cada actividad. En lugar de trabajar con duraciones demasiado conservadoras, se utiliza una duración más ajustada, cercana al percentil 50.

Se manejan dos duraciones como se observa en la tabla 17

Tabla 17.

Tipos de duraciones de las actividades de los proyectos en el modelo propuesto

Tipo de duración	Significado
t_{safe}	Duración segura o conservadora
t_{50}	Duración agresiva o más realista

Nota. Elaboración propia

La seguridad removida se calcula así:

$$S_i = t_{segura,i} - t_{50,i} \quad (46)$$

Esta seguridad no desaparece. Se retira de las actividades individuales y luego se concentra en buffers visibles y gestionables.

9.2.6 Restricción ligera de recursos

El modelo incorpora una restricción simplificada de capacidad de recursos inspirada en enfoques de programación bajo restricciones de recursos reportados en la literatura de Cadena Crítica. Sin embargo, el propósito del modelo no es resolver un problema exacto de optimización matemática o de programación lineal, sino establecer una validación práctica de disponibilidad de recursos que permita reducir conflictos de asignación y minimizar los efectos de la multitarea sobre el cronograma del proyecto.

En consecuencia, el modelo verifica que la demanda total de un recurso durante un periodo determinado no supere su capacidad disponible:

$$\sum r_{ik}(t) \leq R_k \quad (47)$$

donde:

- $r_{ik}(t)$ representa la demanda del recurso k por parte de la actividad i en el periodo t ,
- R_k corresponde a la capacidad disponible del recurso.

Esta restricción se utiliza como mecanismo de validación y nivelación básica del cronograma, permitiendo identificar situaciones de sobreasignación de recursos antes de la ejecución del proyecto.

9.2.7 Identificación de la cadena crítica

Una vez construida la red lógica del proyecto y estimadas las duraciones agresivas t_{50} , el modelo procede a recalcular el cronograma utilizando dichas duraciones. Este paso es necesario porque la ruta crítica inicial calculada con CPM representa el comportamiento del proyecto bajo duraciones seguras o conservadoras, mientras que la lógica CCPM requiere trabajar con tiempos más ajustados y sin protección local excesiva.

En este punto se conserva la red de precedencias del proyecto, pero se sustituyen las duraciones seguras por las duraciones t_{50} . De esta manera, se obtiene un primer cronograma agresivo que sirve como base para identificar la secuencia dominante antes de incorporar plenamente las restricciones de recursos.

Posteriormente, el modelo revisa los conflictos de asignación entre actividades que requieren el mismo recurso. A diferencia de la ruta crítica tradicional, que depende únicamente de las relaciones lógicas entre actividades, la cadena crítica considera también la disponibilidad real de recursos. Por esta

razón, dos actividades que no están relacionadas por precedencia, pero que requieren el mismo recurso crítico, no deben programarse de forma simultánea si la capacidad disponible no lo permite.

Formalmente, si dos actividades i y j utilizan el mismo recurso crítico, debe cumplirse una de las siguientes condiciones:

$$F_i \leq S_j \quad (48)$$

o

$$F_j \leq S_i \quad (49)$$

donde F_i y F_j representan los tiempos de finalización de las actividades, y S_i y S_j representan sus tiempos de inicio. Esta condición introduce una dependencia por recurso, la cual no necesariamente existía en la red CPM original.

Cuando esta condición no se cumple, las actividades en conflicto deben ser secuenciadas. Esta nivelación no se plantea como un modelo exacto de optimización matemática, sino como una regla práctica para construir un cronograma ejecutable bajo condiciones reales de recursos.

La nivelación de recursos utilizada para identificar la cadena crítica se apoya en la restricción ligera de capacidad definida previamente en el modelo. Cuando varias actividades requieren simultáneamente un mismo recurso y la capacidad disponible no resulta suficiente, dichas actividades deben ser secuenciadas para evitar conflictos de asignación y multitarea.

El procedimiento para identificar la cadena crítica puede resumirse así:

1. Tomar la red lógica CPM original.
2. Sustituir las duraciones seguras por duraciones t_{50} .
3. Recalcular los tiempos tempranos y tardíos con las nuevas duraciones.
4. Revisar actividades paralelas que compiten por el mismo recurso.
5. Aplicar la restricción ligera de capacidad.
6. Secuenciar las actividades que generan conflicto de recursos.

7. Recalcular el cronograma ya nivelado.
8. Identificar la secuencia que determina la fecha final del proyecto.

Aquí se aplica la misma lógica de precedencias, pero ahora con los nuevos predecesores CCPM de la siguiente manera:

$$Start_i = \max(Finish_{pred \text{ CCPM}}) \quad (50)$$

$$Finish_i = Start_i + t_{50,i} \quad (51)$$

Y para buffers:

$$Finish_{FB} = Start_{FB} + FB \quad (52)$$

La cadena crítica será entonces la secuencia más larga del cronograma una vez consideradas simultáneamente las precedencias lógicas y las restricciones de recursos. En otras palabras, representa el camino que realmente controla la duración del proyecto cuando el cronograma se vuelve ejecutable con recursos reales.

La duración base de la cadena crítica se calcula como

$$CC = \sum_{i \in CC} t_{50,i} \quad (53)$$

donde:

- CC = conjunto de actividades pertenecientes a la cadena crítica y $t_{50,i}$ corresponde a la duración agresiva de cada actividad incluida en dicha cadena.

Es importante señalar que la cadena crítica puede ser diferente de la ruta crítica CPM inicial. Esto ocurre porque la ruta crítica tradicional solo considera precedencias, mientras que la cadena crítica

incorpora también las esperas generadas por recursos compartidos. Por tanto, el resultado final no depende únicamente de la lógica técnica del proyecto, sino también de la forma en que se asignan y secuencian los recursos críticos.

9.2.8 Programación CCPM con lógica late start y buffers visibles

Una vez identificada la cadena crítica, el modelo reorganiza el cronograma para proteger el flujo del proyecto y evitar la liberación prematura de trabajo. En CPM tradicional, muchas actividades tienden a programarse tan pronto como sea posible. Sin embargo, desde la lógica CCPM, esta práctica puede aumentar el trabajo en proceso, dispersar la atención de los recursos y favorecer la multitarea.

Por esta razón, el modelo propone programar las actividades no críticas bajo una lógica cercana al inicio tardío o *late start*. Esto significa que las cadenas alimentadoras no se adelantan innecesariamente, sino que se programan para llegar a tiempo al punto donde se conectan con la cadena crítica.

La programación CCPM se estructura de la siguiente manera:

1. La cadena crítica se programa como la columna vertebral del proyecto, usando las duraciones t_{50} .
2. Las cadenas alimentadoras se programan hacia atrás desde su punto de unión con la cadena crítica.
3. Entre cada cadena alimentadora y la cadena crítica se incorpora un Feeding Buffer.
4. Al final de la cadena crítica se incorpora el Project Buffer.
5. Antes de actividades que dependen de recursos críticos se incorporan Resource Buffers como alertas de disponibilidad.

La lógica de programación de las cadenas alimentadoras puede expresarse así:

$$Finish_{FA_j} + FB_j \leq Start_{CC,m} \quad (54)$$

donde $Finish_{FA_j}$ representa la fecha de terminación de la cadena alimentadora j ,

FB_j corresponde al Feeding Buffer de dicha cadena, y $Start_{CC,m}$ representa el inicio de la actividad de la cadena crítica donde se conecta la cadena alimentadora.

Esto significa que la cadena alimentadora debe terminar con suficiente anticipación para que su posible retraso sea absorbido por el Feeding Buffer sin afectar la cadena crítica.

El Project Buffer se ubica al final de la cadena crítica y protege la fecha de compromiso del proyecto:

$$D_{CCPM} = CC + PB \quad (55)$$

donde D_{CCPM} representa la duración protegida del proyecto, CC es la duración base de la cadena crítica y PB es el Project Buffer.

En este punto es importante aclarar que el buffer no significa que el proyecto “deba demorarse más”. La duración operativa sigue siendo la cadena crítica calculada con t_{50} . El buffer representa una protección visible frente a la variabilidad y permite gestionar el riesgo temporal de forma más transparente.

El Resource Buffer se incorpora como una alerta anticipada, no necesariamente como una duración adicional del cronograma. Su función es asegurar que el recurso crítico esté disponible antes del inicio de una actividad relevante. Puede expresarse de forma sencilla como:

$$RB_i = \alpha \cdot t_{50,i} \quad (56)$$

donde RB_i representa el Resource Buffer asociado a la actividad i , α es un factor de alerta definido por el equipo del proyecto y $t_{50,i}$ corresponde a la duración agresiva de la actividad. En aplicaciones prácticas, este buffer también puede manejarse como una regla simple, por ejemplo, confirmar la disponibilidad del recurso uno o dos periodos antes del inicio programado.

Para efectos de representación, el cronograma CCPM debe mostrar los buffers como elementos visibles. Por tanto, en el Gantt del modelo se recomienda incluir filas independientes para actividades, Feeding Buffers, Resource Buffers y Project Buffer. Esto permite evidenciar que el modelo no elimina la incertidumbre, sino que la reubica en puntos concretos del cronograma donde puede ser monitoreada y gestionada.

La estructura mínima del Gantt CCPM se puede observar en la tabla 18.

Tabla 18.

Estructura mínima de un diagrama de Gantt CCPM

Ítem	Inicio	Duración	Tipo
Actividad de cadena crítica	Según secuencia nivelada	t_{50}	Actividad
Actividad alimentadora	Según late start	t_{50}	Actividad
Feeding Buffer	Antes del punto de unión	FB_j	Buffer
Resource Buffer	Antes del recurso crítico	RB_i	Alerta de recurso
Project Buffer	Al final de la cadena crítica	PB	Buffer de proyecto

Nota. Elaboración propia

En síntesis, la programación CCPM no consiste solamente en reducir duraciones. Su aporte principal está en reorganizar el cronograma alrededor de la cadena crítica, protegerla con buffers y evitar que los recursos se dispersen en actividades que no deben iniciarse todavía. De esta manera, el modelo busca un cronograma más corto en su duración operativa, pero al mismo tiempo más protegido y controlable frente a la variabilidad.

9.2.9 Tipo de buffers del modelo y su aplicación

Una vez identificada la cadena crítica y construido el cronograma nivelado por recursos, el modelo procede a incorporar mecanismos de protección temporal que permitan absorber la variabilidad inherente a la ejecución del proyecto. A diferencia de los enfoques tradicionales, donde cada actividad contiene su propia reserva de seguridad, la filosofía CCPM propone concentrar dicha protección en puntos estratégicos del cronograma mediante buffers visibles y gestionables.

Esta forma de protección busca evitar que pequeñas desviaciones locales se propaguen a lo largo del proyecto y terminen afectando la fecha final comprometida. En lugar de administrar múltiples

márgenes ocultos distribuidos entre actividades individuales, el modelo centraliza la incertidumbre en un número reducido de buffers que pueden ser monitoreados durante la ejecución.

Desde la perspectiva de la Teoría de Restricciones, los buffers constituyen mecanismos de protección del flujo del proyecto. Su función principal no es aumentar artificialmente la duración del cronograma, sino proporcionar capacidad de absorción frente a eventos de variabilidad, retrasos operativos, cambios de prioridad, interferencias entre recursos o desviaciones normales de ejecución.

En el modelo propuesto se incorporan tres tipos de buffers: Project Buffer, Feeding Buffer y Resource Buffer.

❖ Project Buffer (PB)

El Project Buffer constituye el principal mecanismo de protección temporal del proyecto. Se ubica inmediatamente después de la última actividad perteneciente a la cadena crítica y tiene como propósito absorber las desviaciones que puedan producirse durante la ejecución de las actividades que determinan directamente la fecha final del proyecto.

Su existencia responde al principio fundamental de CCPM según el cual la protección no debe estar dispersa entre actividades individuales, sino concentrada en un único punto de control visible. De esta forma, cualquier retraso que se produzca en la cadena crítica consume progresivamente el buffer, permitiendo evaluar de manera temprana el nivel de riesgo asociado al cumplimiento de la fecha comprometida.

En el modelo propuesto, el tamaño del Project Buffer se calcula mediante el método Square Root of the Sum of Squares (SSQ):

$$PB = \sqrt{\sum_{i \in CC} S_i^2} \quad (57)$$

donde:

- PB : tamaño del Project Buffer.
- S_i : margen de seguridad removido de la actividad i .
- CC : conjunto de actividades pertenecientes a la cadena crítica.

Este método permite consolidar la variabilidad de múltiples actividades sin asumir que todos los retrasos potenciales ocurrirán simultáneamente, evitando así sobredimensionar la protección temporal del proyecto.

❖ Feeding Buffer (FB)

Los Feeding Buffers tienen como objetivo proteger la cadena crítica frente a retrasos originados en rutas o cadenas alimentadoras que convergen hacia ella.

Aunque una actividad no pertenezca a la cadena crítica, un retraso significativo en una cadena secundaria podría afectar indirectamente el flujo principal del proyecto al impedir que determinada información, recurso, entregable o actividad esté disponible cuando sea requerida por la cadena crítica. Para evitar esta situación, CCPM incorpora Feeding Buffers en los puntos de convergencia entre cadenas alimentadoras y cadena crítica.

Estos buffers funcionan como zonas de amortiguamiento que absorben las desviaciones provenientes de rutas secundarias antes de que estas impacten el camino principal del proyecto.

Su cálculo se realiza mediante:

$$FB_j = \sqrt{\sum_{i \in FA_j} S_i^2} \quad (58)$$

donde:

- FB_j : Feeding Buffer asociado a la cadena alimentadora j .

- FA_j : conjunto de actividades pertenecientes a la cadena alimentadora correspondiente.
- S_i : margen de seguridad removido de cada actividad.

La incorporación de Feeding Buffers permite desacoplar parcialmente el comportamiento de las rutas secundarias respecto de la cadena crítica, reduciendo la probabilidad de propagación de retrasos dentro del sistema.

❖ Resource Buffer (RB)

El Resource Buffer cumple una función diferente a la de los buffers anteriores. Mientras el Project Buffer y los Feeding Buffers protegen el cronograma frente a la variabilidad temporal, el Resource Buffer busca proteger la disponibilidad de los recursos críticos.

En proyectos donde existen especialistas, cuadrillas, equipos técnicos o recursos altamente demandados, es común que se produzcan conflictos de asignación, cambios de prioridad o indisponibilidades inesperadas. En estos casos, incluso cuando las actividades se encuentran correctamente programadas, la ausencia o retraso del recurso crítico puede comprometer el flujo de la cadena crítica.

Por esta razón, el modelo incorpora Resource Buffers como mecanismos preventivos de coordinación y alerta temprana. Su función es asegurar que el recurso requerido se encuentre preparado y disponible antes del inicio de una actividad relevante de la cadena crítica.

A diferencia de los demás buffers, el Resource Buffer no necesariamente representa tiempo adicional incorporado al cronograma. En muchos casos actúa como un mecanismo de gestión y preparación que reduce el riesgo de interrupciones operativas.

De forma simplificada puede expresarse como:

$$RB_i = \alpha \cdot t_{50,i} \quad (59)$$

donde:

- RB_i : Resource Buffer asociado a la actividad i .
- α : factor de alerta definido por el equipo del proyecto.
- $t_{50,i}$: duración agresiva de la actividad.

En aplicaciones prácticas, el Resource Buffer puede implementarse mediante acciones como:

- Confirmación anticipada de disponibilidad del recurso;
- Verificación previa de materiales, herramientas o equipos;
- Coordinación entre áreas responsables;
- Liberación anticipada de órdenes de trabajo;
- Bloqueo de agenda de recursos críticos;
- Recordatorios o alertas de inicio próximos.

Desde la perspectiva de la Teoría de Restricciones, estos buffers contribuyen a explotar y proteger la restricción del sistema, evitando que interrupciones administrativas u operativas afecten el flujo de trabajo de la cadena crítica.

❖ Integración de los buffers dentro del modelo

Los tres tipos de buffers actúan de manera complementaria dentro del cronograma CCPM. El Project Buffer protege la fecha final del proyecto, los Feeding Buffers protegen la cadena crítica frente a retrasos provenientes de rutas secundarias y los Resource Buffers protegen la disponibilidad de los recursos críticos que permiten mantener el flujo del sistema.

En conjunto, estos mecanismos permiten transformar un cronograma tradicional basado únicamente en actividades y precedencias en un cronograma orientado a la gestión activa de la incertidumbre, donde la protección temporal se encuentra explícitamente identificada, cuantificada y controlada durante toda la ejecución del proyecto.

9.2.10 Duración protegida del proyecto

Una vez identificada la cadena crítica y calculado el Project Buffer, el modelo permite diferenciar entre dos conceptos importantes: la duración operativa del proyecto y la duración protegida o comprometida. La duración operativa corresponde al tiempo estimado para ejecutar la cadena crítica utilizando duraciones t_{50} , mientras que la duración protegida incorpora el buffer de proyecto como mecanismo de protección frente a la variabilidad.

La duración protegida del proyecto se expresa así:

$$D_{CCPM} = CC + PB \quad (60)$$

donde:

- D_{CCPM} : duración protegida del proyecto bajo CCPM.
- CC : duración de la cadena crítica calculada con duraciones t_{50} .
- PB : Project Buffer.

Esta expresión no significa que el proyecto necesariamente deba durar más. Lo que indica es que el modelo separa el tiempo de trabajo realista del tiempo de protección. En otras palabras, el cronograma operativo se basa en duraciones ajustadas, mientras que la fecha de compromiso queda protegida por un buffer visible y controlable.

Esta separación es importante porque evita que la seguridad permanezca escondida dentro de cada actividad. En cambio, la protección se concentra al final de la cadena crítica, permitiendo que el equipo del proyecto pueda monitorear su consumo durante la ejecución.

9.2.11 Gantt CCPM con buffers visibles

Después de definir la duración protegida, el cronograma debe representarse de una forma que permita entender claramente la lógica del modelo. Para ello, se recomienda construir un Gantt CCPM en

el que los buffers aparezcan como elementos visibles e independientes, y no únicamente como colores, márgenes ocultos o notas dentro de las actividades.

La estructura recomendada para el Gantt CCPM del modelo se encuentra en la tabla 19

Tabla 19.

Estructura recomendada del diagrama de Gantt del modelo CCPM propuesto

Item	Start	Duration	Type
Actividad crítica	Según secuencia de la cadena crítica	t_{50}	Task
Actividad alimentadora	Según lógica late start	t_{50}	Task
Feeding Buffer	Antes del punto de unión	FB	Buffer
Resource Buffer	Antes del recurso crítico	RB	Resource Alert
Project Buffer	Al final de la cadena crítica	PB	Project Buffer

Nota. Elaboración propia

Esta representación ayuda a mostrar una idea central de CCPM ya que el modelo no elimina la incertidumbre del proyecto, sino que la reorganiza en puntos estratégicos donde puede ser gestionada. Por eso, el Project Buffer protege la fecha final, los Feeding Buffers protegen la cadena crítica frente a retrasos de rutas secundarias y los Resource Buffers funcionan como alertas para garantizar disponibilidad de recursos críticos.

9.2.12 Ejecución y control mediante Fever Chart

Durante la ejecución, el modelo propone controlar el proyecto mediante la gestión del consumo de buffers, especialmente del Project Buffer. Para ello, se utiliza el Fever Chart, una herramienta que relaciona el avance de la cadena crítica con el consumo acumulado del buffer.

El seguimiento puede realizarse mediante una tabla periódica de reportes. La frecuencia puede ser semanal, aunque también puede ajustarse según la duración y complejidad del proyecto.

La tabla mínima de control es la que se establece en la tabla 20

Tabla 20

Tabla mínima de control mediante Fever Charts

Fecha de corte	Avance de cadena crítica	PB consumido	PB total	BC%	Zona	Acción

Nota. Elaboración propia

El consumo del Project Buffer se calcula así:

$$BC(\%) = \frac{PB_{consumido}}{PB_{total}} * 100 \quad (61)$$

donde:

- $PB_{consumido}$: Cantidad de buffer utilizado hasta la fecha de corte.
- PB_{total} : Tamaño total del Project Buffer.

El avance de la cadena crítica se calcula como:

$$Avance\ CC\% = \frac{Trabajo\ completado\ de\ la\ CC}{Trabajo\ total\ de\ la\ CC} * 100 \quad (62)$$

El Fever Chart cruza estas dos variables, las cuales son avance del proyecto y consumo del buffer.

A partir de esta relación, el estado del proyecto puede clasificarse en tres zonas que se describen en la tabla 21.

Tabla 21.

Estados del proyecto en el Fever Chart

Zona	Criterio	Acción
Verde	$BC < 33\%$	Monitoreo normal
Amarilla	$33\% \leq BC < 66\%$	Plan preventivo
Roja	$BC \geq 66\%$	Acción correctiva y revisión dinámica

Nota. Elaboración propia en base a Leach, L. P. (1999). Critical Chain Project Management improves project performance.

Esta lógica permite que el seguimiento no se limite a preguntar si una actividad terminó o no terminó. El análisis se centra en observar si el proyecto está consumiendo más protección de la esperada en relación con el avance real logrado.

9.2.13 Capa de control dinámico moderado

El modelo incorpora una capa de control dinámico moderado para responder a desviaciones relevantes durante la ejecución. Esta capa no busca recalcular la cadena crítica en cada corte de seguimiento, porque hacerlo podría volver el cronograma inestable y difícil de administrar. En cambio, propone activar la revisión dinámica únicamente cuando el consumo del Project Buffer alcanza una zona crítica.

La regla central es:

Si $BC\% \geq 66\%$, entonces se revisa la cadena crítica remanente (63)

El proceso se desarrolla así:

❖ Paso 1. Actualizar información real

En cada corte de seguimiento se identifican:

- Actividades terminadas;
- Actividades en ejecución;
- Actividades pendientes;
- Consumo real del Project Buffer;
- Consumo de Feeding Buffers;
- Disponibilidad de recursos críticos;
- Restricciones nuevas o cambios relevantes en el proyecto.

❖ Paso 2. Estimar duraciones restantes

Para cada actividad pendiente o en ejecución se estima la duración restante:

$$d_i^{rem} = \text{duración restante estimada de la actividad } i \quad (64)$$

Esta estimación debe basarse en el estado real de la actividad, no únicamente en el plan original.

❖ Paso 3. Recalcular rutas remanentes

Luego se revisan las rutas pendientes del proyecto:

$$Ruta_{rem}^k = \sum d_i^{rem} \quad (65)$$

donde $Ruta_{rem}^k$ representa una ruta pendiente posible dentro del cronograma.

La nueva cadena crítica remanente será la ruta pendiente de mayor duración:

$$CC_{rem} = \max (Ruta_{rem}^1, Ruta_{rem}^2, \dots, Ruta_{rem}^k) \quad (66)$$

❖ Paso 4. Recalcular fecha proyectada

Con la cadena crítica remanente se estima la nueva fecha proyectada de terminación:

$$EF_{forecast} = Fecha_{corte} + CC_{rem} \quad (67)$$

❖ Paso 5. Comparar contra la fecha protegida

Finalmente, se compara la fecha proyectada contra la fecha compromiso:

$$Desviación = EF_{forecast} - Fecha_{compromiso} \quad (68)$$

Si la desviación es menor o igual a cero, el proyecto todavía conserva capacidad de recuperación.

Si la desviación es positiva, se requiere una acción correctiva, como reprogramación parcial, reasignación de recursos, reducción de multitarea o intervención sobre la restricción principal.

La revisión dinámica propuesta en el modelo tiene como objetivo recalcular la cadena crítica remanente y actualizar la fecha proyectada de terminación del proyecto. No obstante, los buffers calculados durante la planificación inicial permanecen sin modificación, con el fin de conservar la estabilidad del sistema de control y mantener la comparabilidad del consumo acumulado de buffer a lo largo de la ejecución del proyecto.

9.2.14 Simulación ligera de variabilidad

El modelo también incorpora una simulación ligera de variabilidad. La idea no es desarrollar una simulación Monte Carlo compleja, sino crear una revisión sencilla de escenarios que permita anticipar cómo podría comportarse el cronograma bajo diferentes condiciones.

Se proponen tres escenarios los cuales se describen en la tabla 22

Tabla 22.

Descripción de escenarios de simulación ligera de variabilidad propuestos en el modelo

Escenario	Supuesto
Optimista	Las actividades restantes se completan cerca de t_{50}
Probable	Las actividades restantes siguen la estimación actualizada
Pesimista	Las actividades restantes consumen parte adicional del buffer

Nota. Elaboración propia

La duración restante de cada actividad bajo un escenario puede expresarse así:

$$d_i^{rem,esc} = d_i^{rem} + \Delta_i \quad (69)$$

donde:

- $d_i^{rem,esc}$: duración restante de la actividad i bajo el escenario analizado.
- d_i^{rem} : duración restante estimada en el corte.
- Δ_i : variación adicional definida para el escenario.

Luego se calcula la cadena crítica remanente bajo cada escenario:

$$CC_{rem}^{esc} = \sum d_i^{rem,esc} \quad (70)$$

Finalmente, cada resultado se compara contra el buffer disponible. Si el escenario pesimista supera la protección restante, el modelo permite anticipar una posible desviación antes de que esta se materialice completamente.

Esta simulación no cambia la estructura principal del modelo. Funciona como una tabla adicional de sensibilidad que ayuda a tomar mejores decisiones durante el seguimiento.

9.2.15 Reglas de decisión del modelo

Para que el modelo sea aplicable, los indicadores deben traducirse en decisiones concretas. Por esta razón, se establecen reglas de actuación asociadas al consumo de buffers, disponibilidad de recursos y comportamiento de la cadena crítica remanente que se observan en la tabla número 23.

Tabla 23.

Reglas de decisión concretas asociadas al consumo de buffers, disponibilidad de recursos y comportamiento de la cadena crítica remanente del modelo propuesto

Condición	Decisión
$BC < 33\%$	Continuar ejecución normal
$33\% < BC < 66\%$	Revisar causas y preparar acciones preventivas
$BC > 66\%$	Activar control dinámico moderado
Feeding Buffer consumido totalmente	Revisar impacto sobre la cadena crítica
Recurso crítico no disponible	Activar Resource Buffer y reprogramar actividad si es necesario
Nueva ruta remanente mayor que la cadena crítica actual	Actualizar cadena crítica remanente
$EF_{Forecast} > Fecha_{Compromiso}$	Aplicar acciones correctivas
$EF_{Forecast} < Fecha_{Compromiso}$	Mantener control reforzado sin reprogramación mayor

Nota. Elaboración propia

Estas reglas permiten que el modelo no se quede solamente en el cálculo. Su valor está en conectar medición, interpretación y respuesta gerencial.

9.2.16 Mejora continua bajo TOC

El modelo finaliza con una etapa de mejora continua basada en la Teoría de Restricciones. Cuando los buffers se consumen repetidamente o cuando la cadena crítica cambia de forma frecuente, el problema no debe interpretarse únicamente como una mala estimación inicial. También puede indicar que existe una restricción más profunda dentro del sistema de gestión del proyecto.

Entre las causas más frecuentes se encuentran:

- Multitarea;
- Mala liberación de trabajo;
- Recursos sobrecargados;
- Falta de preparación previa;
- Cambios frecuentes de prioridad;
- Baja coordinación entre áreas;
- Restricciones organizacionales o culturales.

Después de cada ciclo de control, el equipo debe registrar la causa principal del consumo del buffer y definir una acción de mejora. Esta acción puede orientarse a proteger mejor el recurso crítico, mejorar la coordinación entre actividades, reducir multitarea, ajustar la lógica de liberación de trabajo o fortalecer la planificación inicial.

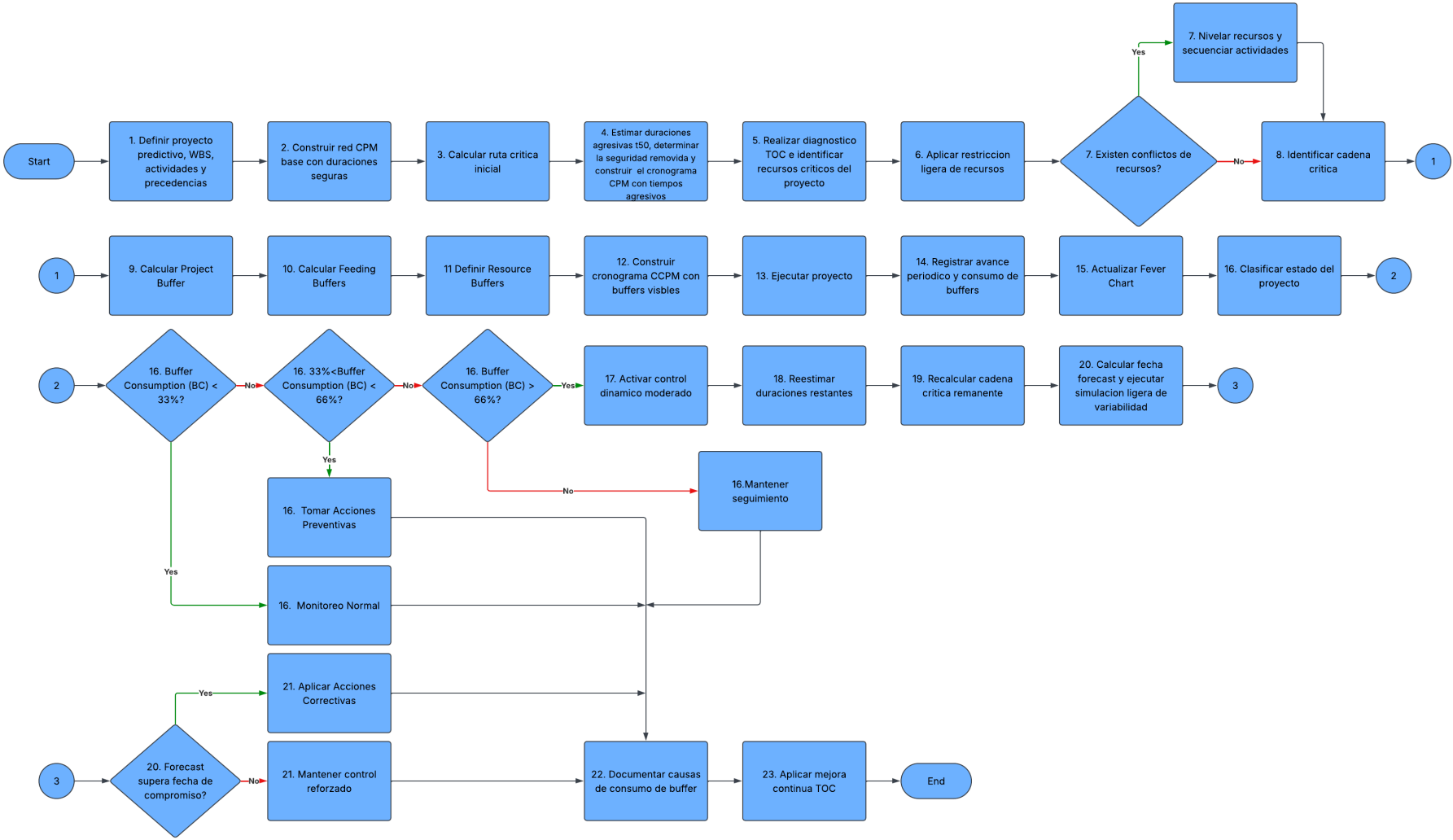
De esta manera, el modelo no se limita a controlar un proyecto específico. También genera aprendizaje para futuros proyectos, permitiendo que la organización mejore progresivamente su forma de planificar, ejecutar y controlar cronogramas bajo incertidumbre.

9.2.17 Diagrama de Flujo del Modelo

En la figura 9 se puede observar el diagrama de flujo del modelo propuesto

Figura 9.

Diagrama de flujo modelo conceptual-procedimental de implementación de la TOC por medio de la metodología CCPM a proyectos con enfoque predictivo propuesto



9.2.18 Correspondencia entre la secuencia operativa y los componentes del modelo propuesto

La correspondencia entre la secuencia operativa del diagrama de flujo y los componentes del modelo propuesto expuestos en el numeral 9.12 se puede observar en la tabla 24.

Tabla 24.

Correspondencia entre la secuencia operativa y los componentes del modelo propuesto

Paso	Actividad	Numeral del modelo
1	Definir proyecto predictivo, WBS, actividades y precedencias	9.2.2
2	Construir red CPM base con duraciones seguras	9.2.4
3	Calcular ruta crítica inicial	9.2.4
4	Estimar duraciones agresivas (t_{50}), determinar la seguridad removida y construir el cronograma CPM con tiempos agresivos	9.2.5 y 9.2.7
5	Realizar diagnostico TOC e identificar recursos críticos	9.2.3
6	Aplicar restricción ligera de recursos	9.2.6
7	Verificar conflictos de recursos y nivelar cronograma	9.2.7
8	Identificar la cadena crítica	9.2.7
9	Calcular Project Buffer	9.2.9.1
10	Calcular Feeding Buffers	9.2.9.2
11	Definir Resource Buffers	9.2.9.3
12	Construir cronograma CCPM con buffers visibles	9.2.8, 9.2.10 y 9.2.11
13	Ejecutar proyecto	9.2.12
14	Registrar avance periódico y consumo de buffers	9.2.12
15	Actualizar Fever Chart	9.2.12
16	Clasificar estado del proyecto	9.2.12
17	Activar control dinámico moderado ($(BC \geq 66\%)$)	9.2.12
18	Reestimar duraciones restantes	9.2.13
19	Recalcular cadena crítica remanente	9.2.13
20	Calcular fecha forecast, ejecutar la simulación ligera de variabilidad y comparar contra la fecha compromiso	9.2.13 y 9.2.14
21	Aplicar acciones correctivas o mantener control reforzado	9.2.15
22	Documentar causas de consumo de buffer y aplicar mejora continua TOC	9.2.16

Nota. Elaboración propia

En el Anexo G se presenta la aplicación del modelo a un proyecto ficticio.

10 Validación conceptual del modelo propuesto

La validación conceptual del modelo se realizó mediante el contraste de su estructura con los fundamentos teóricos de la Theory of Constraints (TOC) y la Critical Chain Project Management (CCPM), así como con la evidencia empírica identificada durante la revisión documental desarrollada en esta investigación.

En primer lugar, se verificó que la secuencia de actividades propuesta mantuviera los principios fundamentales de TOC, particularmente la identificación de la restricción del sistema, la subordinación de las demás decisiones a dicha restricción, la elevación de la capacidad cuando resulta necesario y el mejoramiento continuo del sistema. Estos principios constituyen el eje central del modelo y orientan cada una de las etapas que lo conforman.

De igual manera, se comprobó la coherencia del modelo con los conceptos esenciales de CCPM, incorporando la estimación de duraciones agresivas, la identificación de la cadena crítica, la utilización de Project Buffers, Feeding Buffers y Resource Buffers, así como el seguimiento del proyecto mediante el consumo de buffers y el uso del Fever Chart. Aunque el modelo conserva estos fundamentos, incorpora una estructura metodológica simplificada que facilita su aplicación en proyectos con enfoque predictivo sin recurrir a procedimientos matemáticos complejos.

La comparación con la literatura también permitió evidenciar que el modelo conserva los aportes de autores como Goldratt, (1997), Leach (1999), Newbold, (1998), y Long & Ohsato (2008), incorporando únicamente aquellos elementos que aportan valor práctico para la gestión del cronograma y del recurso restringido. De esta manera, se evita aumentar innecesariamente la complejidad del proceso de planificación.

La aplicación desarrollada en el capítulo anterior permitió comprobar la coherencia lógica entre todas las etapas del modelo. Cada procedimiento genera la información requerida por la etapa siguiente, sin presentar contradicciones entre el análisis de restricciones, la construcción del cronograma CCPM, la determinación de buffers y el proceso de seguimiento y control.

Finalmente, desde una perspectiva práctica, el modelo presenta condiciones favorables para ser implementado en proyectos con enfoque predictivo pertenecientes a diferentes sectores productivos, debido a que utiliza procedimientos comprensibles, fácilmente reproducibles y compatibles con herramientas informáticas de uso común como Microsoft Excel. En consecuencia, puede afirmarse que el modelo posee consistencia conceptual, respaldo teórico y viabilidad de aplicación como herramienta para apoyar la gestión del tiempo en proyectos desarrollados bajo enfoques predictivos.

La validación del modelo se resume en la tabla número 25

Tabla 25

Validación conceptual del modelo propuesto

Criterio de validación	Método de validación	Evidencia obtenida	Resultado
Coherencia con TOC	Comparación con los principios de la Theory of Constraints	El modelo conserva la identificación, subordinación, elevación y mejora continua de la restricción.	Cumple
Coherencia con CCPM	Contraste con los fundamentos de CCPM	Se incorporan la cadena crítica, buffers, gestión del recurso y seguimiento mediante Fever Chart.	Cumple
Sustento bibliográfico	Comparación con la literatura científica	El modelo integra aportes de Goldratt, Leach, Newbold, Raz, Long y Ohsato, entre otros.	Cumple
Coherencia lógica	Revisión secuencial del procedimiento	Cada etapa genera la información requerida por la siguiente sin inconsistencias.	Cumple
Aplicabilidad	Desarrollo del caso de aplicación	El modelo pudo implementarse completamente mediante el ejemplo desarrollado en Excel.	Cumple

Nota. Elaboración propia

11 Discusión

Los resultados obtenidos durante esta investigación permiten afirmar que la integración de los principios de la Theory of Constraints (TOC) y la Critical Chain Project Management (CCPM) constituye una alternativa metodológica sólida para mejorar la eficiencia temporal de proyectos con enfoque predictivo. La evidencia empírica analizada mediante la revisión sistemática de la literatura y el análisis estadístico confirma la tendencia reportada por diversos investigadores, quienes coinciden en que la aplicación de CCPM favorece la reducción de los tiempos de ejecución, mejora la confiabilidad del cronograma y permite un uso más eficiente de los recursos críticos (De Oliveira Martins et al., 2025; Goldratt, 1997; Leach, 1999)

Uno de los principales aportes de esta investigación consiste en transformar ese conocimiento, tradicionalmente disperso entre múltiples publicaciones, en un modelo conceptual-procedimental que organiza de forma secuencial las diferentes etapas necesarias para implementar TOC mediante CCPM en proyectos con enfoque predictivo. Mientras gran parte de la literatura se concentra en explicar componentes específicos de la metodología o en presentar estudios de caso independientes, el modelo desarrollado integra la identificación de restricciones, la estimación de duraciones agresivas, la construcción de la cadena crítica, la determinación y gestión de buffers, el seguimiento mediante Fever Chart, el control dinámico, la simulación ligera de variabilidad y la mejora continua dentro de un único procedimiento metodológico.

En comparación con propuestas como la desarrollada por Long & Ohsato (2008), el modelo presentado reduce significativamente la complejidad de implementación al prescindir de técnicas avanzadas de optimización, programación difusa y algoritmos matemáticos especializados. Esta decisión fue deliberada y responde al propósito de construir una metodología que pueda ser aplicada por gerentes de proyecto utilizando herramientas ampliamente disponibles, sin requerir conocimientos avanzados en investigación de operaciones o software especializado. Desde esta perspectiva, el modelo

busca privilegiar la aplicabilidad práctica sin perder coherencia con los principios fundamentales de TOC y CCPM.

De igual manera, la investigación conserva la filosofía planteada originalmente por Goldratt, (1997) al concentrar la protección del cronograma en Project Buffers y Feeding Buffers administrables, evitando distribuir márgenes de seguridad dentro de cada actividad. Esta característica permite que el desempeño del proyecto sea evaluado mediante el consumo de buffers y no únicamente mediante el cumplimiento individual del cronograma, fortaleciendo la capacidad de anticipar desviaciones y facilitar la toma oportuna de decisiones. En este sentido, los resultados obtenidos son coherentes con las observaciones realizadas por Patrick (2001), Kim et al (2021) y Zhang et al (2016), quienes destacan la importancia de una adecuada administración de buffers para incrementar la robustez del cronograma.

Otro aporte relevante corresponde a la incorporación de los Resource Buffers como mecanismos preventivos para garantizar la disponibilidad oportuna de los recursos críticos. A diferencia de algunos enfoques que consideran estos buffers como extensiones del cronograma, en el modelo propuesto fueron concebidos como alertas de preparación y coordinación que permiten anticipar posibles restricciones sin modificar artificialmente la duración del proyecto. Asimismo, la inclusión del Remaining Critical Chain, del control dinámico y de una simulación ligera de variabilidad representa una adaptación práctica inspirada en los planteamientos de Long & Ohsato (2008), orientada a fortalecer el seguimiento del proyecto conservando un nivel de complejidad compatible con las necesidades de organizaciones que desarrollan proyectos predictivos.

No obstante, los resultados deben interpretarse considerando las delimitaciones establecidas para esta investigación. En primer lugar, la validación del modelo se apoyó en evidencia empírica proveniente de investigaciones previamente publicadas y no en la ejecución directa de proyectos propios. Esta decisión metodológica resulta coherente con el enfoque de revisión sistemática adoptado y permitió fundamentar el modelo sobre resultados previamente contrastados en diferentes contextos

(Arksey & O'Malley, 2005; Kitchenham, 2004; Tranfield et al., 2003). Sin embargo, futuras investigaciones podrán ampliar la validación mediante estudios experimentales o aplicaciones longitudinales en proyectos reales.

En segundo lugar, el alcance de la investigación se restringió exclusivamente a proyectos con enfoque predictivo, por lo que las conclusiones obtenidas no deben extrapolarse directamente a proyectos ágiles o híbridos. Esta delimitación fue establecida debido a que CCPM fue concebida originalmente para entornos donde la planificación detallada del cronograma constituye un elemento central del proceso de dirección del proyecto (Goldratt, 1997; Newbold, 1998). En consecuencia, la adaptación del modelo a otros enfoques de gestión representa una oportunidad de investigación futura más que una limitación de sus resultados.

De igual manera, el análisis estadístico se desarrolló a partir de datos secundarios obtenidos de investigaciones previamente publicadas, lo que introduce algunas limitaciones que deben considerarse al interpretar los resultados. Aunque la muestra documental final estuvo conformada por 32 estudios, únicamente Araszkiewicz (2017) y Shurrab (2015) proporcionaron datos cuantitativos con el nivel de detalle y la estructura necesarios para realizar las pruebas estadísticas inferenciales planteadas. Esta situación introduce un posible sesgo de selección por disponibilidad de datos, debido a que la inclusión de estos estudios en el análisis estadístico estuvo condicionada no solo por su pertinencia temática y metodológica, sino también por la posibilidad de recuperar datos cuantitativos comparables. A pesar de que se realizó la búsqueda de otros estudios que permitieran comparar tiempos de ejecución bajo CPM y CCPM, no fue posible identificar conjuntos adicionales con las características necesarias para incorporarlos al análisis inferencial.

Asimismo, los estudios analizados proceden de contextos, sectores y diseños metodológicos diferentes, por lo que sus resultados no fueron tratados como una única muestra estadística ni combinados directamente entre sí. Las comparaciones se realizaron dentro de cada conjunto de datos,

respetando su estructura original. Al tratarse de información secundaria, tampoco fue posible controlar directamente la calidad de los datos originales, los procedimientos utilizados para su generación, las condiciones particulares de cada proyecto ni otras variables que pudieran haber influido en los resultados. A esto se suma la posibilidad de sesgo de publicación, debido a que la literatura disponible puede presentar con mayor frecuencia estudios que reportan resultados favorables o estadísticamente significativos sobre CCPM frente a aquellos que encuentran efectos nulos, negativos o menos concluyentes.

En consecuencia, los resultados estadísticos obtenidos deben interpretarse como evidencia favorable dentro de los conjuntos de datos analizados y no como demostración causal o universal de la superioridad de CCPM sobre CPM. El diseño no experimental y el uso de datos secundarios no permiten establecer por sí solos que las diferencias observadas hayan sido causadas exclusivamente por el método de programación, ni generalizar los resultados a todos los proyectos con enfoque predictivo, sectores o contextos organizacionales. Por esta razón, los resultados inferenciales fueron interpretados conjuntamente con la evidencia teórica, documental y empírica de los demás estudios incluidos en la investigación. Futuras investigaciones podrán fortalecer esta evidencia mediante un mayor número de datasets comparables, aplicaciones en proyectos reales y diseños que permitan controlar de manera más directa las variables que pueden afectar el desempeño temporal.

Otra delimitación importante consiste en que la investigación evaluó exclusivamente la eficiencia temporal de los proyectos, sin abordar variables relacionadas con costos, calidad, alcance o satisfacción de los interesados. Esta decisión responde al objetivo central del estudio, el cual buscó analizar específicamente el comportamiento del tiempo como restricción fundamental dentro del enfoque TOC. No obstante, resulta razonable considerar que futuras investigaciones puedan ampliar el modelo incorporando una evaluación integrada del desempeño del proyecto desde una perspectiva multidimensional.

Finalmente, el modelo desarrollado corresponde a una propuesta conceptual-procedimental y no constituye una herramienta computacional para la planificación y control de proyectos. Aunque el caso de aplicación fue implementado exitosamente mediante Microsoft Excel para demostrar su viabilidad operativa, la automatización integral del procedimiento mediante una plataforma informática especializada representa una evolución natural del trabajo realizado. El creciente interés por incorporar soluciones digitales para apoyar la gestión basada en CCPM, evidenciado en investigaciones recientes (Anastasiu et al., 2023; De Oliveira Martins et al., 2025), confirma que esta constituye una de las principales oportunidades de desarrollo derivadas de la presente investigación.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten concluir que el modelo propuesto mantiene coherencia con los fundamentos teóricos de TOC y CCPM, incorpora de manera estructurada los principales hallazgos reportados por la literatura especializada y ofrece un procedimiento metodológico aplicable para fortalecer la planificación, el seguimiento y el control del tiempo en proyectos con enfoque predictivo. Su principal contribución no consiste únicamente en confirmar los beneficios previamente reportados para CCPM, sino en proporcionar una metodología integrada que facilita la transferencia de dichos fundamentos teóricos hacia escenarios reales de aplicación, contribuyendo a reducir la brecha existente entre la investigación académica y la práctica profesional en gerencia de proyectos.

12 Conclusiones y Trabajo Futuro

La presente investigación tuvo como propósito desarrollar y validar un modelo conceptual-procedimental basado en la TOC, implementada mediante la metodología CCPM, para mejorar la eficiencia temporal de proyectos con enfoque predictivo. Los resultados obtenidos permiten formular las siguientes conclusiones:

❖ Respuesta al problema de investigación

La investigación permitió responder al problema planteado al inicio del estudio. La revisión de la literatura permitió identificar una limitada disponibilidad de modelos procedimentales que integren de manera clara, secuencial y aplicable los principios de TOC y CCPM dentro del ciclo de vida de proyectos con enfoque predictivo. El modelo desarrollado en esta investigación contribuye a abordar ese vacío al proporcionar una metodología estructurada que facilita la implementación práctica de TOC mediante CCPM.

❖ Cumplimiento del objetivo general

Se cumplió el objetivo general de la investigación mediante el desarrollo conceptual de un modelo procedimental soportado en evidencia teórica y empírica, cuya aplicación a un caso de estudio permitió verificar la coherencia y el funcionamiento lógico de la integración de los principios de TOC y CCPM orientados al mejoramiento de la eficiencia temporal de proyectos con enfoque predictivo.

❖ Primer objetivo específico

El análisis de los fundamentos teóricos permitió establecer que la TOC y CCPM mantienen una relación directa con la gestión del tiempo en proyectos predictivos. Se identificó que la adecuada gestión de las restricciones, la eliminación de márgenes de seguridad individuales y la protección centralizada mediante buffers constituyen los principales mecanismos asociados con las mejoras reportadas en la eficiencia temporal.

❖ Segundo objetivo específico

La revisión de la literatura permitió identificar evidencia favorable acerca de los beneficios reportados mediante la aplicación de TOC-CCPM en proyectos predictivos. Los estudios cualitativos y cuantitativos analizados reportan reducciones en la duración de los proyectos, mejoras en la confiabilidad de las fechas de entrega y una utilización más eficiente de los recursos críticos, aunque estos resultados presentan diferencias según los contextos y diseños metodológicos de las investigaciones revisadas.

❖ Tercer objetivo específico

La aplicación de las pruebas estadísticas a los conjuntos de datos seleccionados permitió identificar diferencias estadísticamente significativas en la duración de los proyectos entre los métodos de programación analizados. Los resultados obtenidos mediante la prueba t para muestras relacionadas y el ANOVA de medidas repetidas aportaron evidencia estadística favorable al desempeño temporal de las alternativas basadas en CCPM frente a CPM dentro de los datasets de Araszkievicz (2017) y Shurrah (2015). Estos resultados se circunscriben a los conjuntos de datos analizados y no implican por sí mismos una relación causal ni su generalización a todos los proyectos con enfoque predictivo.

❖ Cuarto objetivo específico

Como principal aporte de esta investigación se desarrolló un modelo conceptual-procedimental que organiza de manera lógica y secuencial la aplicación de TOC mediante CCPM dentro del ciclo de vida de proyectos con enfoque predictivo. El modelo integra procesos de planificación, identificación de restricciones, gestión de recursos, construcción de la cadena crítica, determinación de buffers, seguimiento mediante Fever Chart, control dinámico, simulación ligera de variabilidad y mejora continua, facilitando su implementación en contextos organizacionales reales.

❖ Quinto objetivo específico

La validación conceptual del modelo permitió establecer que la propuesta desarrollada es coherente con los principios de la Teoría de Restricciones y de la metodología CCPM, además de ser consistente con la evidencia teórica y empírica analizada y con los resultados obtenidos mediante el análisis estadístico. Asimismo, su aplicación al caso de estudio permitió verificar el funcionamiento lógico del procedimiento propuesto en un proyecto con enfoque predictivo. En conjunto, estos resultados respaldaron la hipótesis general de investigación y permitieron concluir que la aplicación de TOC mediante CCPM puede contribuir significativamente a mejorar la eficiencia temporal frente a metodologías tradicionales como CPM, dentro del alcance y las limitaciones de la investigación.

❖ Contraste de las hipótesis

Los análisis estadísticos realizados aportaron evidencia favorable a la hipótesis general y a la subhipótesis relacionada directamente con la duración de los proyectos, dentro de los conjuntos de datos analizados. En particular, las pruebas aplicadas permitieron identificar diferencias estadísticamente significativas entre los métodos de programación respecto a la duración.

❖ Comportamiento de las variables de investigación

El análisis de las variables mostró diferencias en el desempeño temporal asociadas con los métodos de programación dentro de los conjuntos de datos analizados, particularmente en relación con la duración total y la reducción porcentual del tiempo. Otras variables consideradas en la investigación, como la confiabilidad del cronograma, la gestión de buffers, la disponibilidad de recursos y la variabilidad, no fueron sometidas directamente a contraste estadístico debido a las características de los datos disponibles; por esta razón, su análisis tuvo principalmente un carácter documental e interpretativo y sirvió como soporte para la estructuración del modelo conceptual-procedimental.

❖ Aporte científico de la investigación

La principal contribución de esta investigación no consiste únicamente en aportar evidencia adicional sobre los beneficios potenciales de la aplicación de TOC mediante CCPM en la eficiencia temporal de proyectos con enfoque predictivo, aspecto previamente reportado por diversos autores. Su aporte fundamental radica en integrar y transformar el conocimiento teórico, documental y empírico disponible en un modelo conceptual-procedimental estructurado, que organiza de manera lógica y secuencial los principales elementos de TOC y CCPM para facilitar su aplicación en la gestión temporal de este tipo de proyectos. Asimismo, la investigación complementa esta propuesta mediante el análisis estadístico de los datos cuantitativos disponibles en los estudios seleccionados y la aplicación del modelo a un caso de estudio, permitiendo evaluar su coherencia conceptual y funcionamiento lógico dentro del alcance definido. En este sentido, la investigación proporciona una propuesta metodológica que contribuye a disminuir la brecha existente entre el desarrollo teórico de TOC y CCPM y su aplicación práctica en la gerencia de proyectos, reconociendo las limitaciones de generalización derivadas del uso de fuentes secundarias y del carácter no experimental del estudio.

❖ Conclusión general

En síntesis, los resultados de esta investigación muestran que la gestión de la eficiencia temporal de los proyectos puede abordarse no solo desde la reducción de la duración de las actividades, sino también desde la identificación y gestión de las restricciones que condicionan el desempeño del sistema. El modelo conceptual-procedimental desarrollado proporciona una metodología estructurada para integrar los principios de la TOC y de CCPM en un proceso de aplicación claro y orientado a la toma de decisiones. Su coherencia fue evaluada mediante la integración de la evidencia teórica y documental, los resultados estadísticos obtenidos a partir de los datasets analizados y su aplicación a un caso de estudio, reconociendo las limitaciones de generalización y causalidad derivadas del diseño no experimental y del uso de fuentes secundarias.

En la tabla 26 se observan las Conclusiones derivadas del comportamiento de cada una de las variables de investigación

Tabla 26.

Conclusiones derivadas del comportamiento de cada una de las variables de investigación

Variable de investigación	Resultado observado	Conclusión
Método de programación del proyecto	En los conjuntos de datos analizados se observaron diferencias en el desempeño temporal entre CPM y las alternativas basadas en CCPM.	Los resultados aportan evidencia de diferencias en el desempeño temporal asociadas con el método de programación dentro de los datasets analizados, sin que ello permita establecer por sí solo una relación causal generalizable.
Eficiencia temporal del proyecto	Los análisis estadísticos evidenciaron diferencias significativas en indicadores de duración dentro de los conjuntos de datos analizados.	La evidencia estadística obtenida respalda un comportamiento favorable de CCPM respecto a la eficiencia temporal, específicamente en las dimensiones cuantitativas evaluadas y dentro de los datasets analizados.
Duración total del proyecto	Se observaron diferencias y reducciones en la duración de ejecución a favor de CCPM en una parte importante de los casos analizados.	Los análisis realizados aportan evidencia estadística favorable a una menor duración bajo CCPM frente a CPM dentro de los conjuntos de datos estudiados.
Diferencia de duración (Δ Duración)	La mayoría de los casos presentó diferencias de duración favorables a CCPM, aunque también se identificaron casos con resultados negativos.	La distribución de las diferencias muestra una tendencia predominantemente favorable a CCPM dentro de los casos analizados, reconociendo la existencia de observaciones en las que esta ventaja no se presentó.
Reducción porcentual del tiempo	Se identificaron variaciones porcentuales en la duración entre los métodos de programación, predominantemente favorables a CCPM.	La reducción porcentual permitió cuantificar descriptivamente las diferencias temporales observadas entre los métodos dentro de los datasets analizados, sin asumir que estas reducciones sean generalizables a todos los proyectos predictivos.
Confiabilidad del cronograma	La literatura revisada reporta mejoras en la estabilidad del cronograma y el cumplimiento de fechas asociadas con la aplicación de CCPM y la gestión de buffers.	La evidencia documental analizada respalda conceptualmente la relación entre la gestión mediante buffers y una mayor confiabilidad del cronograma; esta variable no fue contrastada estadísticamente de manera directa en la investigación.

Variable de investigación	Resultado observado	Conclusión
Consumo y gestión de buffers	La revisión documental y la estructuración del modelo identificaron el Project Buffer, Feeding Buffers y Resource Buffers como elementos relevantes para el seguimiento y control temporal.	La gestión de buffers constituye un componente central de CCPM y fue incorporada al modelo como mecanismo de seguimiento y control, con respaldo en la literatura analizada, pero sin contraste estadístico directo en esta investigación.
Presión por recursos compartidos	La literatura y el modelo propuesto consideran la identificación y gestión de recursos restringidos como elementos relevantes para la planificación y coordinación del proyecto.	La gestión de las restricciones de recursos fue incorporada como componente conceptual del modelo debido a su relevancia en la literatura sobre TOC y CCPM; su efecto sobre el desempeño temporal no fue medido directamente mediante las pruebas estadísticas realizadas.
Nivel de incertidumbre o variabilidad esperada	La simulación ligera incorporada al modelo permitió analizar conceptualmente el comportamiento del cronograma frente a posibles desviaciones.	La consideración de la variabilidad fue incorporada al modelo como mecanismo preventivo para analizar posibles desviaciones del cronograma; sus efectos sobre la robustez no fueron contrastados empíricamente mediante los datasets utilizados.

Nota. Elaboración propia

12.1 Trabajo futuro

Los resultados obtenidos durante esta investigación abren diversas oportunidades para el desarrollo de nuevas líneas de trabajo.

Una primera línea consiste en validar el modelo mediante su aplicación en proyectos reales pertenecientes a diferentes sectores económicos, con el fin de analizar su comportamiento bajo distintos niveles de complejidad, disponibilidad de recursos y condiciones de incertidumbre.

De igual manera, resulta de interés incorporar técnicas avanzadas de simulación y optimización que permitan analizar escenarios con mayor variabilidad, así como comparar el desempeño del modelo frente a otros enfoques contemporáneos de programación y control de proyectos.

Una línea de investigación especialmente relevante corresponde al desarrollo de un software especializado que implemente integralmente el modelo propuesto. Esta herramienta podría automatizar la construcción del cronograma CCPM, la identificación de la cadena crítica, el cálculo de Project Buffers, Feeding Buffers y Resource Buffers, la gestión del Remaining Critical Chain, el seguimiento mediante Fever Charts dinámicos y la simulación de escenarios de variabilidad. De esta manera, el modelo conceptual desarrollado en esta investigación evolucionaría hacia una plataforma tecnológica orientada a apoyar la gestión profesional de proyectos con enfoque predictivo.

Finalmente, futuras investigaciones podrán evaluar la adaptación del modelo a proyectos con enfoques híbridos y ágiles, analizando qué componentes pueden mantenerse y cuáles requieren modificaciones para responder a entornos de mayor incertidumbre y cambios frecuentes.

13 Referencias

- AlNasseri, H. A. (2015). *Understanding applications of project planning and scheduling in construction projects*. [Doctoral dissertation, Lund University]. Lund University.
<https://lucris.lub.lu.se/ws/files/4293873/7767270.pdf>
- Ahuja, V., & Thiruvengadam, V. (2004). Project scheduling and monitoring: Current research status. *Construction Innovation*, 4(1), 19–31. <https://doi.org/10.1108/14714170410814980>
- Anastasiu, L., Câmpian, C., & Roman, N. (2023). Boosting construction project timeline: The case of Critical Chain Project Management (CCPM). *Buildings*, 13(5), 1249.
<https://doi.org/10.3390/buildings13051249>
- Araszkiewicz, K. (2017). Application of Critical Chain Management in construction projects schedules in a multi-project environment: A case study. *Procedia Engineering*, 182, 33–41.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.108>
- Arksey, H., & O'Malley, L. (2005). Scoping studies: Towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology*, 8(1), 19–32.
<https://doi.org/10.1080/1364557032000119616>
- Chen, Y.-T. (2020). *Buffer sizing in critical chain project management via network decomposition*. University of Warwick. <https://wrap.warwick.ac.uk/id/eprint/145239>
- Critical Chain Projects. (s. f.). *Critical Chain summary*. https://critical-chain-projects.com/medias/fichiers/critical_chain_summary.pdf
- Cox, J. F., III, & Schleier, J. G., Jr. (Eds.). (2010). *Theory of constraints handbook*. McGraw-Hill.
- Creswell, J. W., & Plano Clark, V. L. (2011). *Designing and conducting mixed methods research* (2nd ed.). SAGE Publications. <https://books.google.com/books?id=6tYNo0UpEqkC>

- De Oliveira Martins, A., Benetti, V. G., dos Anjos, F. E. V., da Silva, D. O., & Alves, C. J. R. (2025). Systematic review on the use of CCPM in project management: Empirical applications and trends. *Applied Sciences*, 15(15), 8147. <https://doi.org/10.3390/app15158147>
- Delgado-Ortiz, S. M., & Moreno-Monsalve, N. A. (2023). Learning capacity and effectiveness in the management of organizational projects. *DYNA*, 90(228), 39–46.
- Ghaffari, M., & Emsley, M. W. (2015). Current status and future potential of the research on Critical Chain Project Management. *Surveys in Operations Research and Management Science*, 20(2), 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.sorms.2015.10.001>
- Goldratt, E. M. (1990). *What is this thing called Theory of Constraints and how should it be implemented?* North River Press.
- Goldratt, E. M. (1997). *Critical chain*. North River Press.
- Goldratt, E. M., & Cox, J. (2004). *The goal: A process of ongoing improvement* (3rd ed.). North River Press.
- Gupta, M. C., & Boyd, L. H. (2008). Theory of constraints: A theory for operations management. *International Journal of Operations & Production Management*, 28(10), 991–1012. <https://doi.org/10.1108/01443570810903122>
- Heaton, J. (2004). *Reworking qualitative data*. SAGE Publications. <https://doi.org/10.4135/9781849209878>
- Herroelen, W., & Leus, R. (2004). Robust and reactive project scheduling: A review and classification of procedures. *International Journal of Production Research*, 42(8), 1599–1620. <https://doi.org/10.1080/00207540310001638055>
- Kim, N., Moon, H., Son, B., & Park, M. (2021). Smart and robust critical chain scheduling for construction projects using buffer extraction. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 12(4), 394–409. <https://doi.org/10.22712/susb.20210032>

Kitchenham, B. (2004). *Procedures for performing systematic reviews*. Keele University.

<https://www.inf.ufsc.br/~aldo.vw/kitchenham.pdf>

Kramer, S. W., & Jenkins, J. L. (2006). Understanding the basics of CPM calculations: what is scheduling software really telling you?. Project Management Institute.

Leach, L. P. (1999). Critical Chain Project Management improves project performance. *Project Management Journal*, 30(2), 39–51. <https://doi.org/10.1177/875697289903000207>

Lean Production. (n.d.). *Theory of constraints*. Retrieved <https://www.leanproduction.com/theory-of-constraints/>

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, G., Jiang, S., Zhu, T., & Jia, J. (2019). A novel method of developing construction projects schedule under rework scenarios. *Sustainability*, 11(20), 5710. <https://doi.org/10.3390/su11205710>

Montgomery, D. C. (2013). *Design and analysis of experiments* (8th ed.). John Wiley & Sons.

Moreno-Monsalve, N. A., Nuño de la Parra, J. P., & Delgado-Ortiz, S. M. (2020). Project management with high-performance work teams: Analysis of generic competencies that influence collective performance. In N. A. Moreno-Monsalve, H. M. Diez-Silva, F. A. Díaz-Piraquive, & R. Pérez-Urbe (Eds.), *Handbook of Research on Project Management Strategies and Tools for Organizational Success* (pp. 1–18). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-1934-9.ch001>

Newbold, R. C. (1998). *Project management in the fast lane: Applying the theory of constraints*. St. Lucie Press.

Palinkas, L. A., Horwitz, S. M., Green, C. A., Wisdom, J. P., Duan, N., & Hoagwood, K. (2015). Purposeful sampling for qualitative data collection and analysis in mixed method implementation

research. *Administration and Policy in Mental Health and Mental Health Services Research*, 42(5), 533–544. <https://doi.org/10.1007/s10488-013-0528-y>

Patrick, F. S. (2001). *Buffering against risk – critical chain and risk management*. Project Management Institute Annual Seminars & Symposium. <https://www.pmi.org/learning/library/against-critical-chain-risk-management-7854>

Patton, M. Q. (2002). *Qualitative research and evaluation methods* (3rd ed.). SAGE Publications. <https://books.google.com/books?id=FjBw2oi8El4C>

Project Management Institute. (2018). *Pulse of the profession: Success in disruptive times*. Project Management Institute. <https://www.pmi.org>

Project Management Institute. (2021). *A guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) (7th ed.)*. Project Management Institute. (n.d.).

Project Management Institute. (2014). *Pulse of the profession: Requirements management—A core competency for project and program success*. <https://www.pmi.org>

Robinson, H., & Richards, R. (2010). *Critical Chain Project Management: Motivation & overview*. 1–10. <https://doi.org/10.1109/AERO.2010.5446879>

Rodríguez, J. F., & Pineda, J. D. (2018). *Análisis de las obras inconclusas en Colombia y su impacto en la gestión de proyectos de infraestructura*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Shurrab, M. (2015). Traditional Critical Path Method versus Critical Chain Project Management: A comparative view. *International Journal of Economics & Management Sciences*, 4, Article 292.

Şimşit, Z. T., Günay, N. S., & Vayvay, Ö. (2014). Theory of Constraints: A literature review. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 150, 930–936. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.09.104>

Tenera, A. B. (2008). Critical chain buffer sizing: a comparative study. Paper presented at PMI® Research Conference: Defining the Future of Project Management, Warsaw, Poland. Newtown Square,

PA: Project Management Institute. <https://www.pmi.org/learning/library/critical-chain-project-management-theory-7118>

TCI Institute. (s. f.). *Five focusing steps*. <https://www.tocinstitute.org/five-focusing-steps.html>

TCI Institute. (s. f.). *The Goal summary*. <https://www.tocinstitute.org/the-goal-summary.html>

Theory of Constraints Institute. (n.d.). *Theory of constraints*. Retrieved <https://www.tocinstitute.org/theory-of-constraints.html>

Tranfield, D., Denyer, D., & Smart, P. (2003). Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. *British Journal of Management*, 14(3), 207–222. <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>

White, D., & Fortune, J. (2002). Current practice in project management—An empirical study. *International Journal of Project Management*, 20(1), 1–11. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(00\)00029-6](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(00)00029-6)

Zhang, J., Song, X., & Díaz, E. (2016). Project buffer sizing of a critical chain based on comprehensive resource tightness. *European Journal of Operational Research*, 248(1), 174–182. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.07.009>

14 Anexos

A continuación, se listan los anexos de la investigación

- ❖ Anexo A. Dataset Artículo de Investigación Araszkiewicz 2017 y t tests pareados
- ❖ Anexo B. Dataset ANOVA Artículo de Investigación Shurrab 2015
- ❖ Anexo C. ANOVA de Medias Repetidas Artículo de Investigación Shurrab 2015
- ❖ Anexo D. Friedman Test Post Hoc Holm aplicado a resultados del ANOVA
- ❖ Anexo E. Tablas de Cálculos en Excel de Aplicación de Modelo a Proyecto Ficticio
- ❖ Anexo F. ANOVA de medias repetidas aplicado a las variables duración del artículo de Shurrab (2015) hecho con el software estadístico Minitab
- ❖ Anexo G. Ejemplo de Aplicación del Modelo a un proyecto ficticio